

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

1) Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH

2) Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **434ZN**

Bestimmung optimaler Anpressdrücke in BZ-Stacks

(Bewilligungszeitraum: 01.05.2012 - 31.04.2014)

der AiF-Forschungsvereinigung

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.

Duisburg,

Dr. Burghard Lutter (ZBT)

Aachen,

Ort, Datum

M.Sc. Sangeetha Ramaswamy (ITA)

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Einleitung, Aufgabenstellung und Zusammenfassung des Projektes

1.1 Einleitung

In Brennstoffzellen wird elektrische Energie durch eine elektrochemische Reaktion zwischen dem Brennstoff, meistens Wasserstoff, und einem Oxidationsmittel, meistens Sauerstoff, ohne den Umweg über thermische und mechanische Energie erzeugt. Für einen langlebigen und leistungsfähigen Betrieb einer Brennstoffzelle bzw. eines Brennstoffzellenstacks müssen sowohl eine ausreichende und gleichmäßige Versorgung der Katalysatoren bzw. der Katalysatorschichten mit Brennstoff bzw. Oxidationsmittel als auch eine gute elektrische Leitfähigkeit zwischen der Katalysatorschicht und den als Stromableiter fungierenden Bipolarplatten gewährleistet sein. Für eine optimale Einstellung dieser Parameter spielt der Anpressdruck, mit dem ein Brennstoffzellenstack verspannt wird, eine zentrale Rolle. Dieser Anpressdruck wurde bisher experimentell an fertig montierten Stacks ermittelt. Ein Leitfaden zur Ermittlung des Optimalen Anpressdrucks anhand bekannter oder leicht zu ermittelnder Parameter der einzelnen Komponenten eines Stacks bietet generell die Möglichkeit sowohl die Entwicklung der Stacks zu beschleunigen als auch einen Beitrag zur Steigerung der Betriebszeit des Stacks leisten.

Generell wird die elektrische Leitfähigkeit in einem Brennstoffzellenstack mit zunehmendem Anpressdruck verbessert. So wird z.B. der Kontaktwiderstand zwischen den einzelnen Schichten, z.B. den Flowfields und den Gasdiffusionsschichten, verringert. Eine zu geringe Anpresskraft führt zu hohen elektrischen Verlusten innerhalb des Stacks und zudem zu Leckagen, die Dichtungen sind dann nicht ausreichend verpresst. Durch eine zu hohe Anpresskraft wird allerdings die Porosität der Gasdiffusionsschicht zu stark verringert, so dass eine ausreichende Versorgung der Katalysatorschichten mit Brennstoff bzw. Oxidationsmittel nicht mehr gegeben ist. Dadurch sinkt zum einen die Leistungsfähigkeit der Zellen, zum anderen kann es durch die dadurch entstehende lokale Unterversorgung zu starker Korrosionen der Katalysatorschichten kommen. Des Weiteren können durch extrem hohe Anpresskräfte die Brennstoffzellen auch mechanisch beschädigt werden. Ein leistungsfähiger Betrieb eines Brennstoffzellenstacks kann somit nur erreicht werden, wenn dieser mit einer optimierten Anpresskraft zusammengebaut wurde.

Die Relevanz dieses Problems ist im Bereich der Brennstoffzellentechnik bekannt und wird, zumindest gemessen an der Anzahl der entsprechenden Veröffentlichungen, zunehmend intensiver bearbeitet. Dabei wurden jedoch die mit dieser Problematik verbundenen Phänomene wie die Kräfteverteilung in Dichtungen, GDLs und MEAs, die in komplexer, durch den momentanen Betriebszustand beeinflusster Wechselwirkung zueinander stehen, bisher kaum systematisch untersucht.

Innerhalb dieses Projektes wurde daher eine systematische Untersuchung der Kräfteverteilung in den Komponenten eines Brennstoffzellenstacks durchgeführt. Diese Messwerte wurden zur Erstellung von Simulationsmodellen verwendet. Anhand dieser Modelle wurde ein Leitfaden bzw. ein Werkzeug erstellt, mit dessen Hilfe die optimale Anpresskraft in Brennstoffzellenstacks anhand der

Materialparameter der eingesetzten Baugruppen ermittelt werden kann. Das Ziel dieses Projektes war es, dass unter Verwendung dieses Werkzeuges folgende Verbesserungen in Bezug auf den jetzigen Stand der Technik zu erreichen:

- Die Lebensdauer einer Brennstoffzelle sollte, gegenüber den heutigen, nicht optimal verspannten Zellen um 20% gesteigert werden.
- Die Funktionsfähigkeit der Brennstoffzellen sollte mindestens dem Niveau der heutigen, nicht optimal verspannten Zellen entsprechen.

Unter Verwendung dieses, seit Abschluss des Projektes zur Verfügung stehenden Werkzeuges ist es Entwicklern und Herstellern von Brennstoffzellenkomponenten und Stacks möglich, spezifische Untersuchungen eigenständig durchzuführen und daraus den für die vorliegenden Komponenten optimalen Anpressdruck zu berechnen.

1.2 Zusammenfassung

Gemäß den Zielen des beantragten Forschungsprojektes „Bestimmung optimaler Anpressdrücke in BZ-Stacks“ (434ZN) haben die beiden an diesem Projekt beteiligten Forschungsstellen ZBT (FS. 1) und ITA (FS. 2) an einem Simulationsmodell für Brennstoffzellenstacks gearbeitet. Dieses Modell kann jetzt, unter Verwendung eines ebenfalls erarbeiteten Leitfadens verwendet werden, um die optimalen Anpresskräfte in einem Brennstoffzellenstack zu ermitteln. Weil sich die unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen, in einem Stack verbauten Komponenten in Abhängigkeit des Anpressdruckes nicht analytisch beschreiben lassen, werden dazu gemäß des erarbeiteten Leitfadens Simulationen durchgeführt, um den optimalen Anpresskräfte empirisch zu ermitteln

Entsprechend dieser Zielsetzung wurden, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten, Modelle zur numerischen Simulation des thermomechanischen Verhaltens der Stacks sowie der elektrochemischen Prozesse erstellt. Die elektrochemische Simulation konnte dabei auf Grund der hohen Komplexität nur für kleine, begrenzte Ausschnitte des Stacks erstellt werden. Die Entwicklung dieser Simulationsmodelle wurde durch Experimente begleitet, durch die die entsprechenden (Teil) Modelle verifiziert und verbessert werden konnten. Für eine vollumfängliche Simulation sind detaillierte Angaben zu den Materialeigenschaften erforderlich, die über die Angaben der Datenblätter hinausgehen. Daher wurden insbesondere die Abhängigkeiten der Materialeigenschaften von den Anpresskräften experimentell ermittelt.

Gemäß des Projektplans wurden die Arbeiten zwischen den Forschungsstellen aufgeteilt. Am ZBT(FS1) wurden hauptsächlich Arbeiten zur Erstellung der Simulationsmodelle durchgeführt. Diese Modelle wurden unter Verwendung der Software „Comsol Multiphysics“ erstellt und durch vergleichende Messungen an realen Brennstoffzellenstacks verifiziert. Basierend auf diesen Arbeiten konnte ein Leitfaden, der die Ermittlung der optimalen Anpresskräfte in einem Brennstoffzellenstack ermöglicht erstellt werden. Dieser Leitfaden steht für Anwender zur Verfügung.

Das ITA (FS2) hat hauptsächlich durch umfangreiche Materialcharakterisierungen der in den Stacks eingesetzten Materialien die Entwicklung der Simulationsmodelle unterstützt. Zur Ermittlung der Parameter wie z.B. Kompressibilität, Wärmeleitfähigkeit, Porenvolumen, Gaspermeabilität und Beschaffenheit der Oberfläche wurde dabei auf die, aus dem Textilbereich stammenden Untersuchungsmethoden zurückgegriffen. Teilweise wurden dabei die verwendeten Geräte z.B. durch eine Temperaturkammer erweitert, um die Charakterisierungen unter brennstoffzellenrelevanten Bedingungen durchführen zu können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle im Projektantrag aufgelisteten Arbeiten erfolgreich durchgeführt wurden und der Leitfaden einschließlich aller erforderlichen Simulationsmodelle zur Verfügung steht.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Inhaltliche Bearbeitung der Arbeitspakete

2.1 (AP 1) Festlegung der Untersuchungsbedingungen des Stackdesigns und der verwendeten Komponenten

Der Schwerpunkt des ZBT innerhalb dieses Projektes ist die Erstellung von Simulationsmodellen von Brennstoffzellenstacks, mit dessen Hilfe der Leitfaden für die Ermittlung der optimalen Anpressdrücke in Brennstoffzellenstacks anhand der vorliegenden Materialeigenschaften ermittelt werden können. Trotzdem musste die Auswahl der in diesem Projekt eingesetzten Materialien und Stackkonstruktionen bereits sehr frühzeitig innerhalb dieses Projekts erfolgen. Prinzipiell können die Simulationsmodelle der einzelnen Komponenten zunächst einmal unabhängig von dem später eingesetzten Material erstellt werden. Für die Verifikation der einzelnen Modelle müssen in diese aber die Materialeigenschaften der jeweiligen Komponenten implementiert und entsprechende Versuche durchgeführt werden.

Werden die Modelle für den Stack selber erstellt, so werden dazu die CAD-Modelle eines ganz konkreten Stackaufbaus in das Simulationsmodell übertragen. Dabei spielen zwar Parameter wie z.B. der Anpressdruck noch keine große Rolle, was jedoch sehr ausschlaggebend ist, ist u.A. die Geometrie, also an welchen Stellen drücken die Flowfields auf die GDLs und wo liegen z.B. die Kühlkanäle. Im Vergleich zu den variablen Parametern wie z.B. der Temperatur, Feuchte und Anpresskraft können die geometrischen Abmessungen der Simulationsmodelle nur sehr zeitaufwändig geändert werden, es müssen bei jeder Änderung komplett neue Modelle erstellt werden. Auf Grund der wie im Zeitplan aufgelisteten sehr langen Vorlaufzeit bei der Erstellung der Simulationsmodelle war es daher erforderlich, dass die in den Untersuchungen verwendeten Stackmodelle sehr früh festgelegt wurden.

Bei der Auswahl der Stacks und der Materialien wurde auf folgende Punkte viel Wert gelegt:

- In den eingesetzten Stacks sollten alle mechanischen Komponenten und somit die mit diesen zusammenhängenden Wechselwirkungen wie in den kommerziellen Stacks vorkommen, um bereits ein umfassendes Simulationsmodell ermitteln zu können. Bei diesen Komponenten handelt es sich um: Dichtungen, Bipolarplatten, Zuganker, Endplatten, Isolierplatte, Stromabnehmer und aus Gasdiffusionsschichten und Membrane hergestellte Membran-Elektroden-Einheiten (MEA).
- Die eingesetzten Stacks sollten möglichst wenig konstruktive Abweichungen zu den am ZBT als Teststandard eingesetzten Stacks aufweisen, um die Verifikation der Simulationsmodelle auf eine möglichst breite Datenbasis stellen zu können.
- Es sollten möglichst leicht erhältliche „Standardkomponenten“ verwendet werden, um den Aufwand für den Aufbau der Versuchsmuster so gering wie möglich zu halten.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde für dieses Projekt ein am ZBT entwickelter und unter Verwendung handelsüblicher GDLs, Membranen und MEAs sowie durch ein massenfertigungstaugliches Verfahren hergestellter Bipolarplatten aufgebauter Stack mit einer aktiven Elektrodenfläche von 50cm² pro Einzelzelle ausgewählt. Hierbei fiel die Wahl auf einen aus 5 Einzelzellen bestehenden Stack. Diese Größe ist als Kurzstack ein Quasi-Standard am ZBT und dementsprechend liegt eine große Datenbasis für die Verifizierung der Simulationsdaten aus diesem Simulationsmodell vor. Des Weiteren weist ein aus 5 Einzelzellen bestehender Stack bereits nahezu alle charakteristischen Eigenschaften der größeren, für den praktischen Einsatz relevanten Stacks auf. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse und der Leitfaden können somit leicht in die Praxis umgesetzt werden.

Hierbei handelt es sich im Einzelnen um:

- **GDL:** Für die Gas-Diffusionsschichten (GDL) wurden das H2315 der Freudenberg FCCT SE & Co KG (Weinheim), sowie das TGP von Toray INC. (Japan) ausgewählt. Das in diesem Projekt zu erstellende Simulationsmodell soll für möglichst viele GDL Typen und somit universell geeignet sein. Durch diese Auswahl wurden zwei bedeutende GDL Materialien, ein Vlies-Werkstoff bzw. ein Kohlenstoff-Papier für dieses Projekt in Betracht gezogen. Mit dem I2C8 (GDS) wurde noch zusätzlich eine mit einer mikroporösen und für die Herstellung der mit Katalysator beschichteten Elektroden erforderlichen Schicht (MPL) versehenen Variante des H2315 ausgewählt.
- **GDE und MEA:** Für diese Materialien wurde auf die am ZBT als Standardmaterialien verwendeten MEAs und GDEs zurückgegriffen. Diese Materialien werden am ZBT selber, basierend auf dem I2C8 (GDE) sowie einer Nafion-Membran (MEA) selber hergestellt. Auf Grund des umfangreichen Einsatzes dieses Materials steht umfangreiches Datenmaterial über diese Komponenten für die spätere Simulation zur Verfügung.
- **Bipolarplatten:** Die Auswahl der Bipolarplatten wurde durch die Auswahl des Stacktyps bereits eingeeengt. Die genauere Auswahl fiel trotzdem auf die durch Spritzguss hergestellten Bipolarplatten. Im Vergleich zu alternativ durch Fräsen hergestellten Bipolarplatten repräsentieren die durch Spritzguss hergestellten Platten eher die für die spätere Massenproduktion von Brennstoffzellenstacks geeignete Technologie.
- **Dichtungsmaterial:** Die in diesem Projekt eingesetzten Dichtungen wurden durch die Auswahl des Stackdesigns festgelegt. Die in den ZBT-Kurzstacks eingesetzten Dichtungen werden mittels eines Dispenserprozesses eines Silikonwerkstoffs auf die Bipolarplatten aufgetragen.
- **Stacks:** Es wurde auf eine, am ZBT als Standard verwendete Stackkonstruktion zurückgegriffen. Dabei wurde ein aus 5 Einzelzellen bestehender Stack verwendet. Stacks mit dieser Größe weisen bereits alle Merkmale der größeren, für den praktischen Einsatz relevanten Eigenschaften auf, sind aber noch kompakt und können vollständig von einigen Simulationsmodellen simuliert werden.

Die innerhalb dieses Projektes durch Messungen ermittelten Material-eigenschaften wurden unmittelbar in die Simulationsmodelle integriert. Dadurch konnte die Aussagekraft der Simulationsergebnisse gesteigert werden.

2.2 (AP 2 - 4) Bestimmung der Materialeigenschaften der Brennstoffzellen- Komponenten und ihrer Änderung unter Kompression

Das Ziel dieser Arbeitspakete ist die Erhebung der Materialdaten für die Modellierung der Einzelkomponenten. Am ITA wurden die Eigenschaften von Gasdiffusionsschichten (GDL) sowie beschichteten Gasdiffusionsschichten bzw. Gasdiffusionssystemen (GDS) untersucht. Die Gasdiffusionsschicht bietet fünf Schlüsselfunktionen für eine PEM-Brennstoffzelle: Mechanische Unterstützung für die Proton Exchange Membrane (PEM), elektrische Leitfähigkeit, Wärmeabfuhr, Zugang der Reaktanden zur Katalysatorschicht und die Abnahme der Produkten von ihr [11; 12]. Die untersuchten Eigenschaften sind Kompressibilität, Luftdurchlässigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen getesteten Materialien und der verwendeten Testmethoden. Tabelle 2.2 enthält eine Übersicht der in dieser Arbeit getesteten GDL- und GDS-Materialien und ihren Herstellern. Ebenso sind die Bezeichnungen der jeweiligen GDL beinhaltet.

Messung	Material	Methode / Norm
Kompressibilität	GDL, GDS	Sondervorrichtung auf der Z100, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm
Gaspermeabilität	GDL, GDS	DIN EN ISO 9237
Wärmeleitfähigkeit	GDL, GDS	Alambeta Tester, Sensora, Liberec
Dicke	GDL, GDS	DIN ISO 9073-2 Universal Mikrometer, Frank Prüfgeräte GmbH, Birkenau
Flächengewicht	GDL, GDS	DIN ISO 9073-1, Waage AE 163; Mettler-Toledo, Ohio, USA
Untersuchung der Oberfläche	GDL, GDS	Leica - M205 C Stereomikroskop, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar
Elektrische Leitfähigkeit (inplane)	GDL, GDS	4 Leiter Messung, Eigenbau
Elektrische Leitfähigkeit (through plane)	GDL, GDS	4 Leiter Messung, Eigenbau
Elektrischer Kontaktwiderstand	GDS, Bipolarplatten	4 Leiter Messung, Quick Connect Fixture, balticFuelCells

Tab. 2.1 : Übersicht über verwendete Materialien und Testmethoden

Bezeichnung	Material	Hersteller
Toray GDL	Gasdiffusionsschicht	Toray International Europe GmbH, Neu-Isenburg
H2315 GDL	Gasdiffusionsschicht	Freudenberg FCCT SE & Co. KG, Weinheim
I2C8 GDS	H2315 mit mikroporöser Beschichtung	Freudenberg FCCT SE & Co. KG, Weinheim
MEA	Membran-Elektroden- Einheit, zweimal I2C8 mit Katalysatorschicht auf Nafionmembran	Eigene Herstellung aus den angegebenen Materialien im ZBT
Dichtung	Silikon, Dispenserschnüre	Schnüre im ZBT aufgetragen

Tab. 2.2 : Übersicht der verschiedenen GDL Materialien, ihrer Bezeichnungen und Hersteller.

2.2.1 Kompressibilität

Die Komponenten einer Brennstoffzelle werden durch Druckbelastung zusammengehalten. Der Anpressdruck ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle [3]. Bei optimaler Anpressung existiert im Stack ein Kompromiss zwischen minimierten elektrischen Übergangswiderständen zwischen Bipolarplatten (BPP) und Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) bzw. Gasdiffusionsschichten (GDL), guter Gasversorgung innerhalb der GDEs und einer ausreichenden gasundurchlässigen Dichtung des Stacks. Vom Optimum abweichende Anpresskräfte führen entweder zu hohen elektrischen Verlusten oder zu einer unzureichenden Medienversorgung der Katalysatoren. In beiden Fällen verringert sich die Leistungsfähigkeit des Stacks.

Am ITA wurden speziell die Auswirkungen der Anpresskräfte auf die Eigenschaften der GDL/GDE sowie der MEA untersucht. Die physikalischen Änderungen im GDL-Material aufgrund Kompression sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Allerdings kann eine Überkompression zum Verlust der Beschichtungsfläche und Bruch der Fasern der GDL bzw. GDS führen.

Physische Änderungen in der GDL	Auswirkung auf die GDL-Leistung
Verlust im Porenvolumen	Verringerte Gasdurchlässigkeit
Besserer Kontakt zwischen den Kohlenstofffasern in der GDL	Verbesserte thermische und elektrische Leitfähigkeit
Besserer Kontakt zwischen der GDL und anderen Komponenten	Verringerter elektrischer und thermischer Übergangswiderstand

Tab. 2.3 : Auswirkung der Kompression auf die physischen Eigenschaften und Leistung einer GDL [14; 15]

Die untersuchten Materialien weisen Dicken zwischen 180 µm und 350 µm auf. Um diese Materialien mit der vorhandenen Zugprüfmaschine (Zwick Z100) untersuchen zu können, wurde eine Sondervorrichtung angefertigt und in die, mit einer Temperaturkammer ausgestatteten Z100 integriert.

In einem ersten Schritt wurden die GDL Materialien H2315 und Toray GDL der beiden Hersteller, Freudenberg FCCT SE & Co. KG, Weinheim bzw. Toray International Europe GmbH, Neu-Isenburg charakterisiert und miteinander verglichen. Die Materialdaten, welche aus Messungen bei Raumtemperatur sowie bei Betriebstemperatur (ca. 80 °C) ermittelt wurden, flossen direkt in die Simulation bzw. in die Entwicklung der Methodik ein.

Für die Dickenmessung wird ein Universal Mikrometer der Firma Frank Prüfgeräte GmbH, Birkenau, verwendet. Die Vliesdicke wird in Anlehnung an DIN ISO 9073-2 bestimmt. Das Flächengewicht wird in Anlehnung an ISO 9073-1 bestimmt. Hierzu werden 3 Proben pro Materialtyp zu rechtwinkligen Proben geschnitten, vermessen und mit der Waage AE 163; Mettler-Toledo, Ohio, USA, gewogen.

Die Zugprüfmaschine und die Sondervorrichtung sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Um zusätzlich die Kompression zu testen, wurde ein Stempel mit 50 mm Durchmesser mit einer Kraft von 5 kN auf die Proben gedrückt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,1 mm/ min. Des Weiteren wurde die Auswirkung der Druckkraft und der jeweiligen Zeit auf die Dicke der GDL- und GDS-Materialien ermittelt.

Mittels Mikroskopie wurden die Oberflächen der GDLs vor und nach den Kompressionsversuchen untersucht. Mit einem Leica - M205 C Stereomikroskop der Firma Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, wurden Bilder aufgenommen.



Abb. 2.1 Die Zugprüfmaschine Zwick Z100 und die Sondervorrichtung für Kompressionsversuche von sehr dünnen Strukturen

Die Testergebnisse für die Dicke und das Flächengewicht der GDL und GDS Materialien werden in Tabelle 2.4 aufgezeigt.

		H2315, GDL	Toray, GDL	I ₂ C ₈ , GDS
Dicke t [μm]	Mittelwert	242	202	253
	Standard Abweichung	10,9	6,3	3,7
Flächengewicht M [g/m²]	Mittelwert	95,94	84,19	136,38
	Standard Abweichung	2,2	0,02	0,78
Dichte ρ [g/cm³]	Mittelwert	0,40	0,42	0,54

Tab. 2.4. Dicke, Flächengewicht der GDL- und GDS-Materialien im unverpressten Zustand und Raumtemperatur

Die Ergebnisse der Kompressionsversuche sind in den Abbildungen 2.2 – 2.7 dargestellt.

In Abbildung 2.2. sind die Ergebnisse der zyklischen Druckversuche an dem H2315 GDL und dem I2C8 GDS-Material dargestellt. Die Prüfung wurde mit einer Vorkraft von 5N durchgeführt. Die Proben wurden mit einem maximalen Druck von 1 MPa gepresst. Die Prüfgeschwindigkeit der Kompression betrug 1 mm/ min. Der Druck von 1 MPa wurde für fünf Minuten gehalten und die Proben wurden mit der selben

Rate zu ihrem Ursprungszustand entlastet. Die GDL- und GDS-Materialien weisen (nur) bei der ersten Kompression eine plastische Deformation auf. Dieses Verhalten ist aus dem unterschiedlichen Verlauf der Kennlinien beim hoch- und runterfahren des Druckes zu erkennen. Diese betragen bei einer anfänglichen Materialdicke von jeweils 242 μm für das H2315 und 253 μm für das I2C8 32,7 μm bzw. 20,6 μm . Auf derartige plastische Deformationen kann das, in AP8. beschriebene Schrumpfen eines Stacks bei Erstinbetriebnahme zurückgeführt werden.

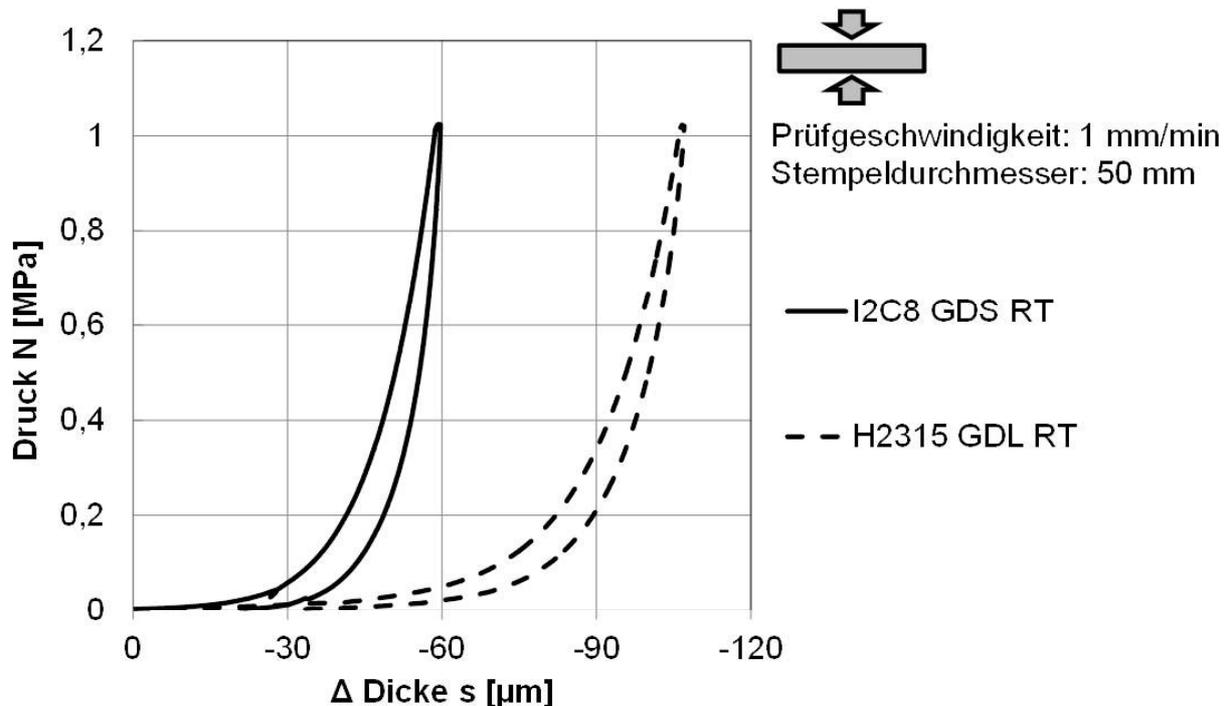


Abb. 2.2 Relative Änderung der Dicken von GDL Materialien mit und ohne Beschichtung bei Kompressionsversuchen bei Raumtemperatur. Änderungen bezogen auf den nicht verpressten Zustand.

In Abbildung 2.3. sind die Ergebnisse der Druckversuche an den H2315 GDL, Toray GDL- und I2C8 GDS-Materialien bei Raumtemperatur und bei 80 °C dargestellt. Die Prüfung wurde mit einer Vorkraft von 5N durchgeführt. Die Proben wurden mit einem maximalen Druck von 0,05 MPa belastet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,1 mm/min.

Ergänzend hierzu wurden weitere Kompressionsmessungen an den Materialien H2315, I2C8, Toray TGP sowie an einer, auf dem I2C8 basierenden, am ZBT hergestellten Gasdiffusionselektrode (GDE) durchgeführt. Bei diesen Messungen wurden die Proben mehrmals verpresst, wobei für jeden Durchgang der Druck von 0 MPa auf 3 MPa erhöht wurde (Abb. 2.4). Bei diesen Messungen zeigte sich durch einen Vergleich der ersten mit den folgenden Weg-Druck Kennlinien, dass die plastische Deformation bei den auf dem H2315 basierenden Materialien bzw. Elektroden innerhalb eines Druckbereiches bis 1 MPa stattfindet. Beim Toray TGP ist hingegen eine plastische Verformung über den gesamten untersuchten Druckbereich zu verzeichnen. Nach diesen, innerhalb der ersten Verpressung auftretenden Verformungen, sind die nachfolgenden Weg-Druckdiagramme deckungsgleich, d.h. es findet nur noch eine elastische Deformation statt.

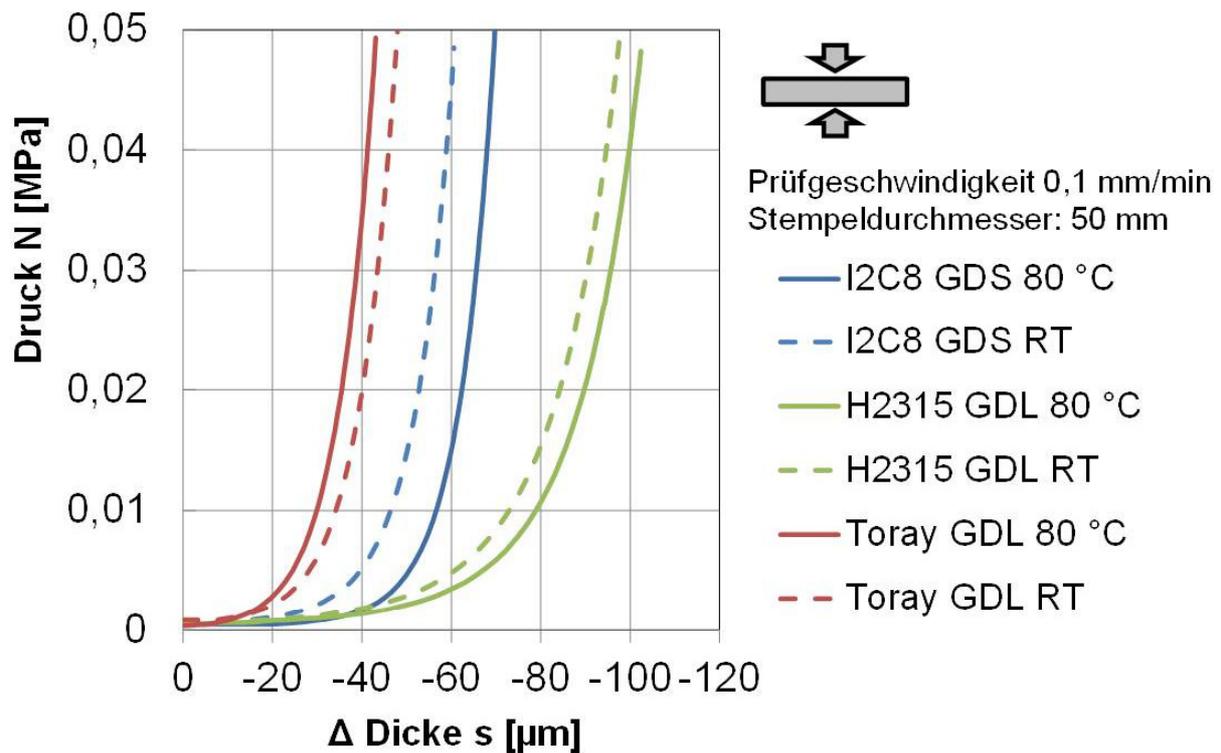


Abb. 2.3 Ergebnisse Kompressionsversuche von GDL Materialien beim RT und 80 °C

Bei einem Vergleich der Weg-Kraftdiagramme der auf dem H2315 basierenden Materialien H2315, I2C8 sowie einer am ZBT hergestellten GDE zeigt sich eine Parallelverschiebung der Kennlinien um den Betrag der Dicke der jeweils aufgetragenen Schichten (Abb. 2.5). Daraus kann gefolgert werden, dass das Deformationsverhalten der GDE hauptsächlich durch das GDL-Material bestimmt wird. Die zusätzliche mikroporöse Schicht beim I2C8 sowie die Katalysatorschicht bei der GDE liefern zwar einen Beitrag zu der Dicke des Materials, haben aber keine signifikante Auswirkung auf das Deformationsverhalten der Proben.

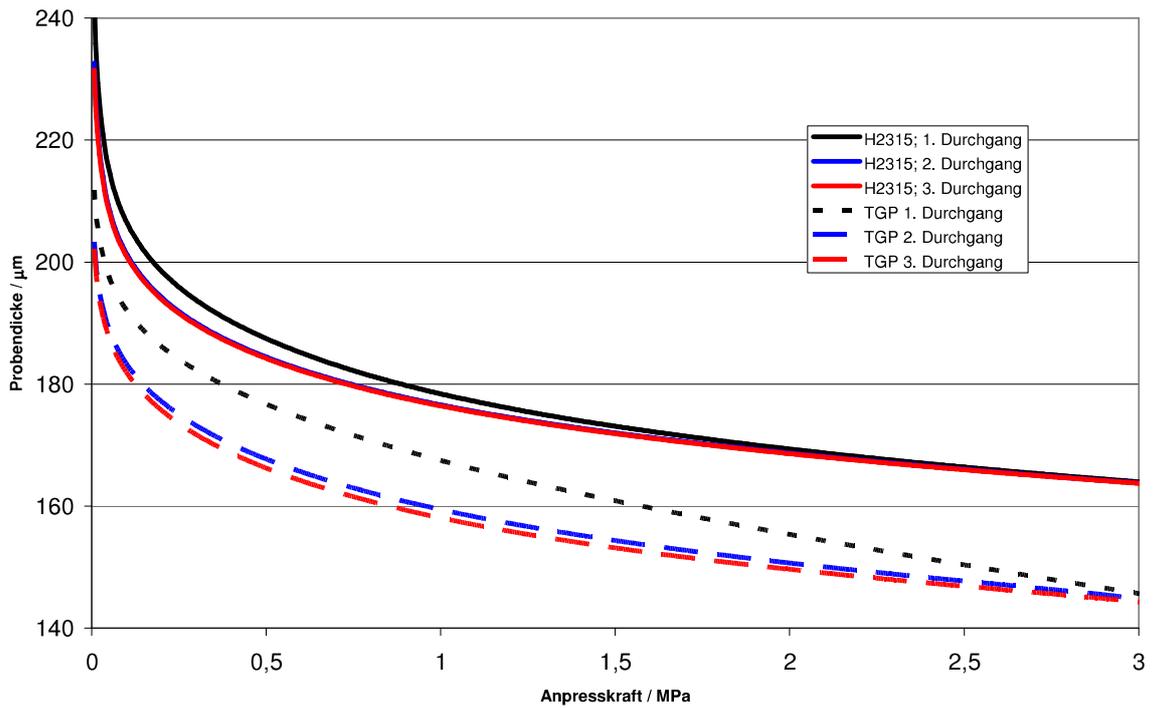


Abb. 2.4 Kompressionsverhalten der Materialien H2315 und Toray TGP

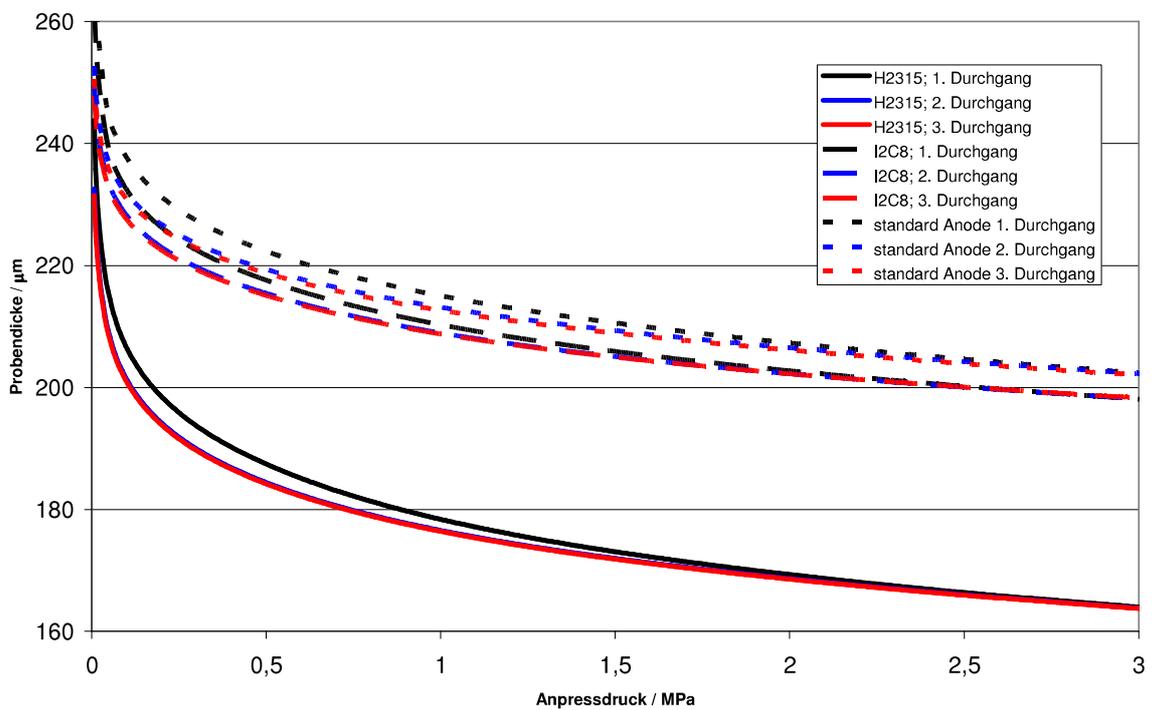


Abb. 2.5 Kompressionsverhalten der H2315 basierten Materialien H2315, I2C8 und der am ZBT hergestellten Standard Anode (GDE)

Neben den Drücken hat auch der Zeitraum, über den diese Drücke auf die GDL Materialien einwirken, einen wichtigen Einfluss auf die Deformation dieser Materialien. Diese Auswirkungen sind in den Abbildungen 2.6 – 2.7 dargestellt. Die Deformation der GDL wächst mit zunehmender Zeit ohne eine Veränderung des Drucks.

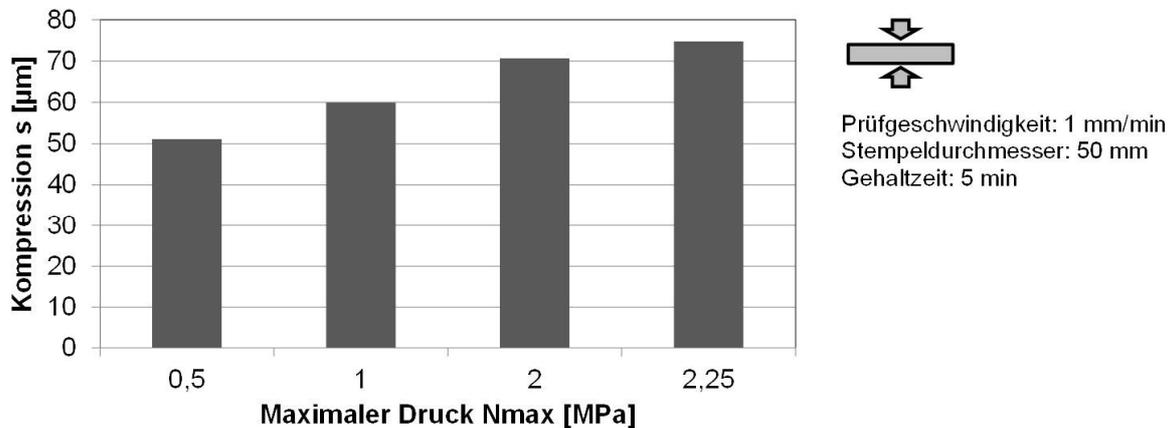


Abb. 2.6 Ergebnisse Kompressionsversuche von H2315 GDL-Materialien bei unterschiedlicher Kompression und 5 Minuten Haltezeit bei

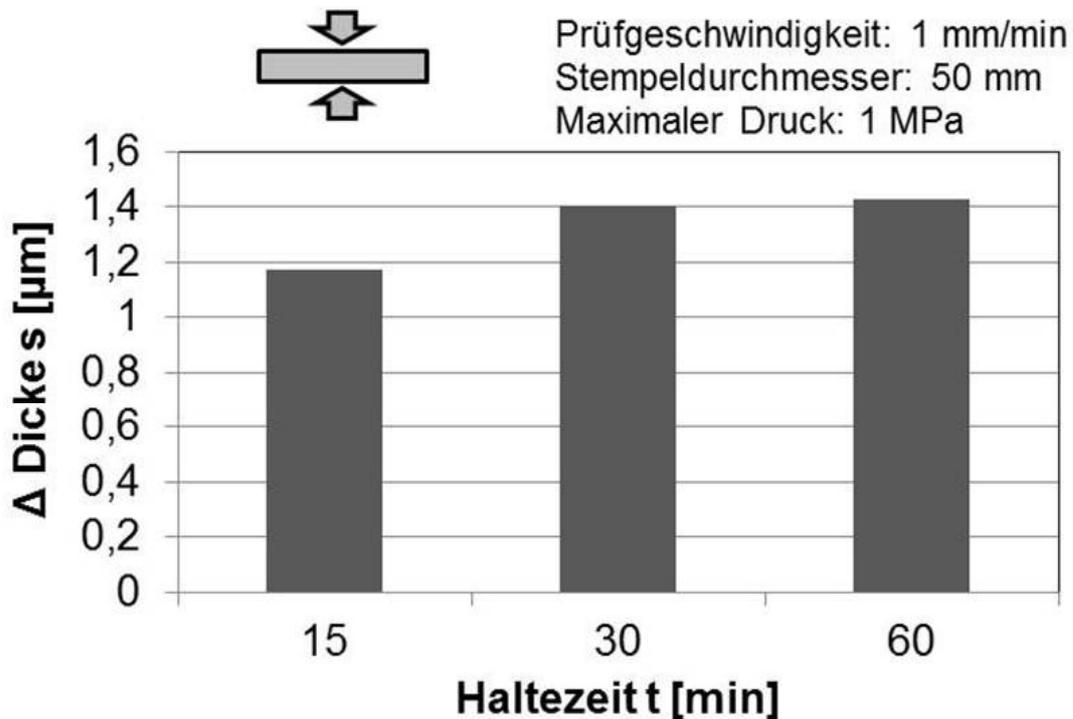


Abb. 2.7 Ergebnisse Kompressionsversuche von H2315 GDL-Materialien mit unterschiedlicher Haltezeit bei Raumtemperatur mit einem Anpressdruck von 1 MPa)

Die GDL- und GDS-Materialien wurden mikroskopisch nach Schäden in der Oberfläche untersucht. Die Ergebnisse der Oberflächenuntersuchung sind in den Abbildungen 2.8 – 2.9 dargestellt. Bei den GDL-Materialien konnten keine Beschädigungen in Folge der Kompressionsversuche festgestellt werden. Beim GDS-Material wurde hingegen die Beschichtung (mikroporöse Schicht, MPL) in Folge der Kompressionsversuche beschädigt. Während der Kompressionsuntersuchungen bildeten sich Risse in der Beschichtung. Das Ausmaß der Oberflächenbeschädigung wuchs mit zunehmender Druckkraft und Haltezeit.

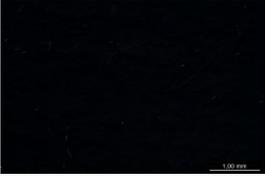
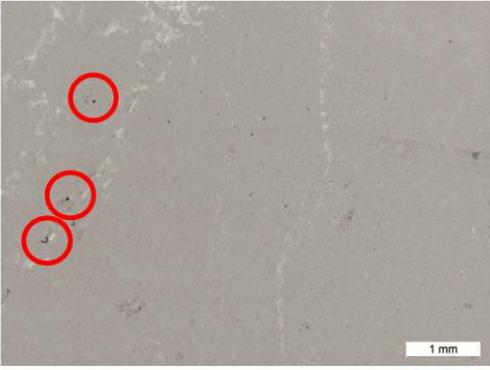
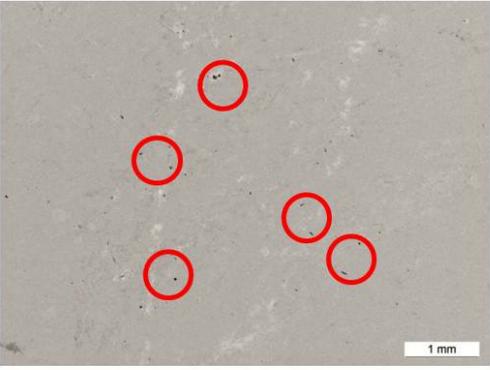
	H2315, GDL	Toray, GDL	I ₂ C ₈ , GDS
Raumtemperatur			
80 °C			

Abb. 2.8 Untersuchung der Oberflächen der GDL Materialien mittels Mikroskopie

I ₂ C ₈ , GDS		Maximaler Druck N _{max} [MPa]	
		0,5	2,5
Haltezeit t [min]	5		

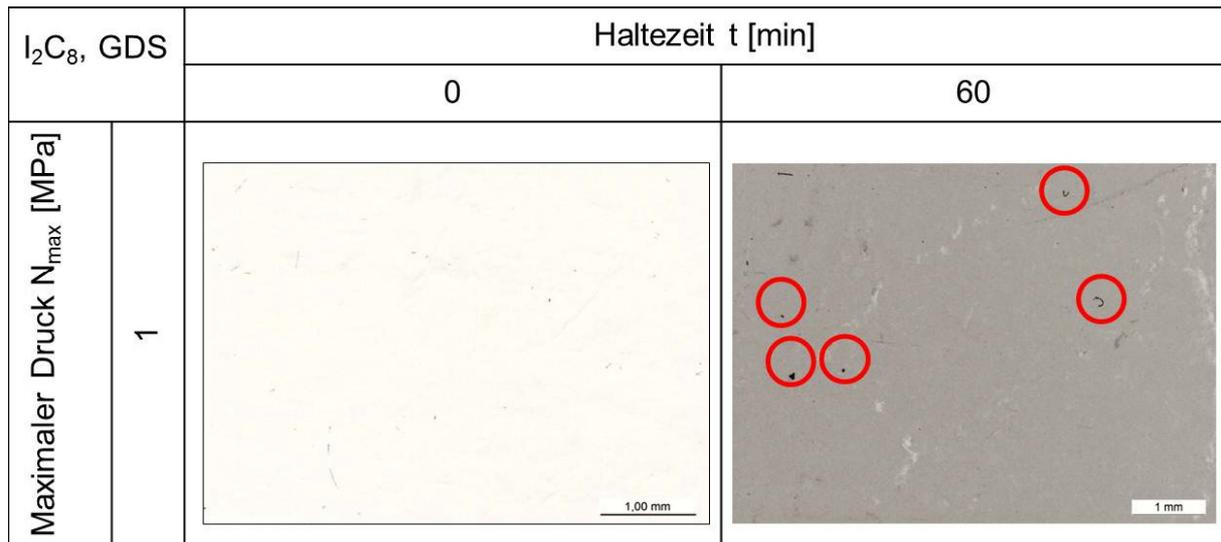


Abb. 2.9 Untersuchung der Oberflächen der GDS Materialien mittels Mikroskopie nach Kompression mit unterschiedlichen Drücken

Eine weitere, einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Stacks nehmende Komponente ist die Dichtung. Diese wird am ZBT in Form von Silikonschnüren auf die Bipolarplatten durch einen Dispenservorgang aufgetragen. Dieses Material ist durch ein rein elastisches Kompressionsverhalten gekennzeichnet, eine plastische Verformung findet nicht statt (Abb. 2.10).

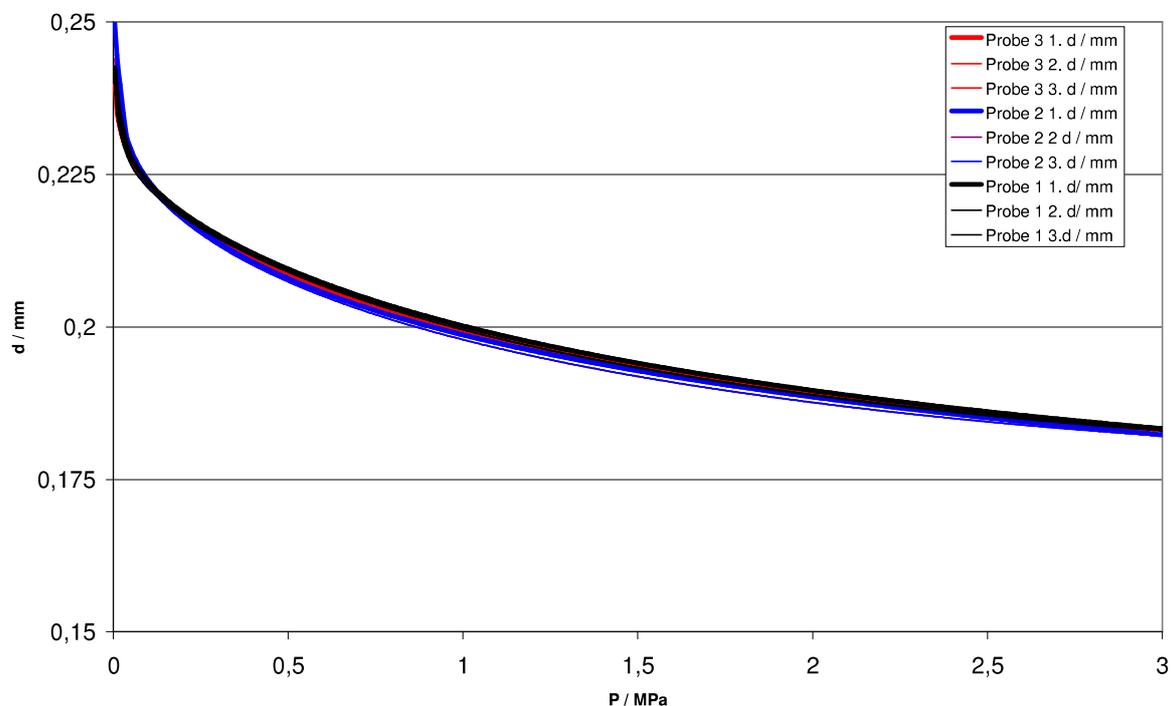


Abb. 2.10 Kompressionsverhalten des Dichtungsmaterials (Silikon)

Neben der Dicke der GDL- bzw. GDS-Materialien werden auch deren elektrische Eigenschaften durch die Anpresskräfte beeinflusst. Für diese Untersuchungen wurden von den Materialien H2315 und TGP die Leitfähigkeit senkrecht zur Ebene

des Materials in Abhängigkeit vom Anpressdruck ermittelt, beim H2315 erfolgten zusätzliche Untersuchungen zur Leitfähigkeit in der Ebene des GDLs (Abb. 2.11).

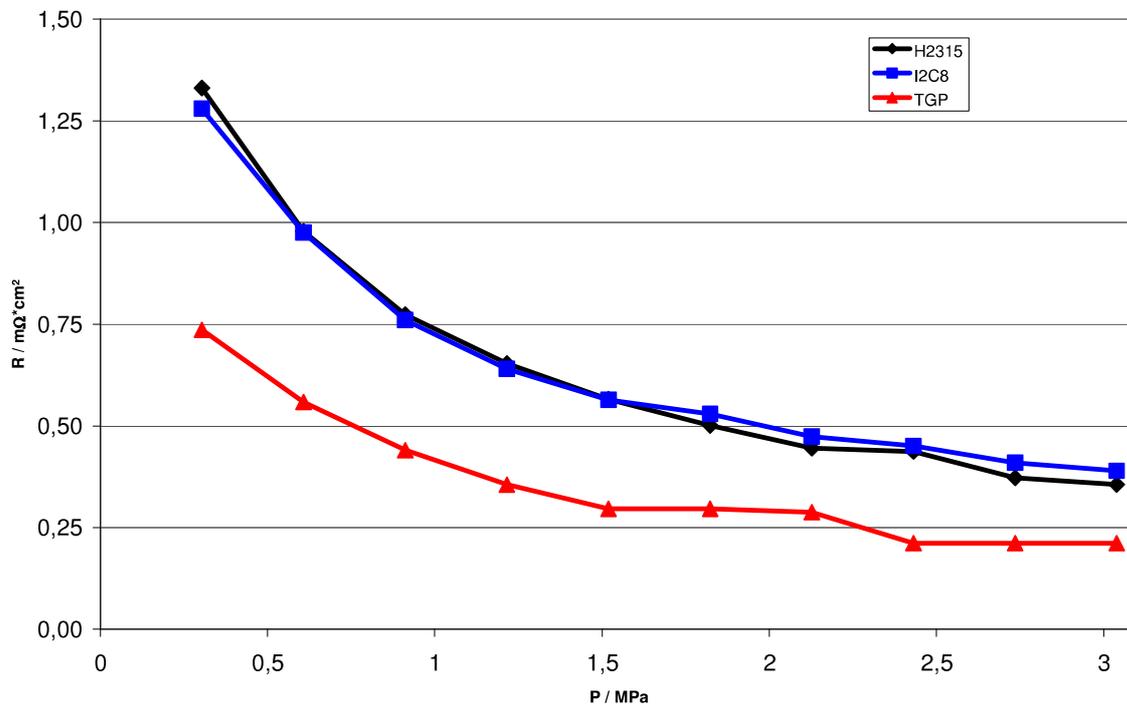


Abb. 2.11 Spezifische Widerstände senkrecht zur Ebene der GDL-Materialien H2315, I2C8 und TGP in Abhängigkeit vom Druck.

Bei beiden Materialtypen H2315/I2C8 und TGP zeigte sich, dass die spezifische Leitfähigkeit bei Drücken > 1,5 MPa kaum noch verändert wird. Das TGP zeichnet sich insgesamt durch einen geringeren spezifischen Widerstand als die auf dem H2315 basierenden Materialien aus.

Eine weitere wichtige elektrische Größe ist die elektrische Leitfähigkeit in der Ebene der GDL. Bei dem H2315 bzw. den auf diesem Material aufbauenden GDS und GDE zeigte sich, dass der Widerstand um den Faktor 2 variieren kann, je nach Ausrichtung des Materials (Abb. 2.12).

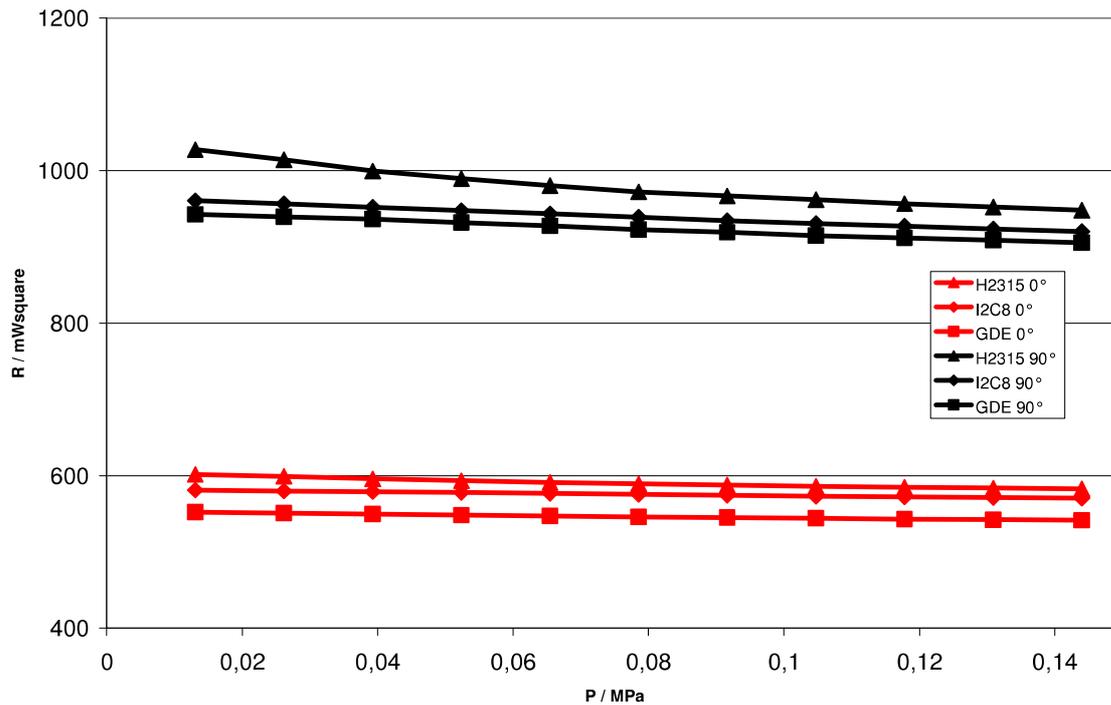


Abb. 2.12 Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes in der Ebene der H2315 basierten Materialien in Abhängigkeit vom Anpressdruck und der Ausrichtung

Neben dem elektrischen Widerstand innerhalb des GDL-Materials werden die elektrischen Verluste innerhalb eines Brennstoffzellenstacks durch die Übergangswiderstände zwischen GDL und den Bipolar- bzw. Endplatten bestimmt. Wie auch die elektrischen Widerstände in den GDL-Materialien, weisen auch die Übergangswiderstände eine starke Abhängigkeit vom Anpressdruck auf (Abb. 2.13).

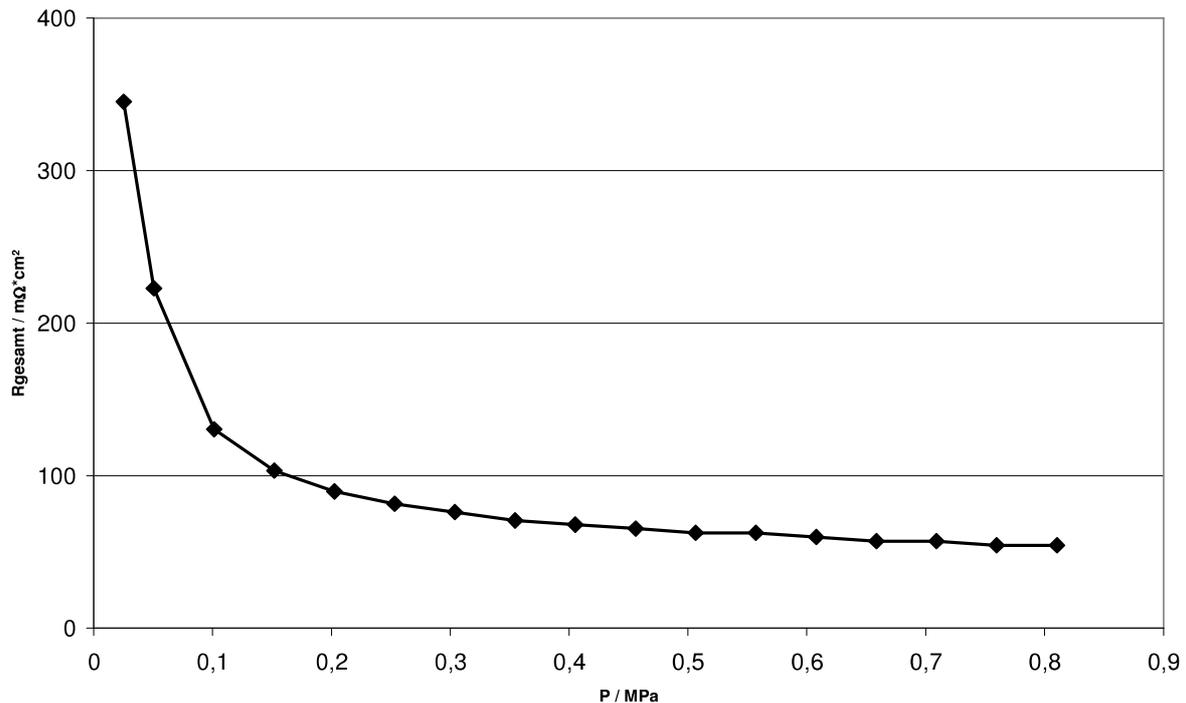


Abb. 2.13 Abhängigkeit der Kontaktwiderstände Flowfield – GDL - Flowfield in einer Brennstoffzelle vom Anpressdruck; quickConnect (balticFuelCells GmbH) mit beidseitig Graphit Flowfields und H2315 GDL unter Raumtemperatur und Umgebungsluft

Zur Ermittlung der Übergangswiderstände wurden Messungen am folgenden Aufbau: Bipolarplatte – GDL – Bipolarplatte durchgeführt, beinhalten also den Widerstand der GDL sowie 2 mal den Kontaktwiderstand zwischen GDL und Bipolarplatte; bei einem Anpressdruck von mehr als 0,1 MPa ist somit mit einem Kontaktwiderstand von etwa 25 mΩcm² zu rechnen. Verglichen mit dem Widerstand des GDL sind diese Übergangswiderstände die Stellen, an denen die größten rein elektrischen Verluste im Bereich der MEA zu erwarten sind; dazu kommen noch der Widerstand der Bipolarplatte an sich sowie der (ionische) Widerstand der Membran.

2.2.2 Gaspermeabilität

Für den Gastransport von den Gaskanälen durch die GDS bis hin zu den Katalysatoren sind zwei unterschiedliche Transportvorgänge von Bedeutung, die Konvektion und die Diffusion. Wie z.B. aus den Simulationsergebnissen (Abb. 2.46) zu erkennen ist, spielt die Konvektion von Gasen in der GDL eine wichtige Rolle bei der Versorgung der Katalysatoren mit Wasserstoff und Luft bzw. Sauerstoff. Die Diffusion als Stofftransport spielt nur in unmittelbarer Nähe zum Katalysator zur Überwindung von Grenzschichten eine Rolle.

Für die Entwicklung der Simulationsmodelle ist daher eine genaue Kenntnis der Permeabilität, des Widerstandes der dem Konvektionsfluss entgegengesetzt wird von Bedeutung und wird daher für alle, im Rahmen dieses Projektes eingesetzten GDL bzw. GDS Materialien experimentell ermittelt.

Der konvektive Gastransport senkrecht zur Ebene der GDL (through-plane) kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Bei diesen Methoden wird eine

Druckdifferenz aufgebaut und der resultierende Gas-Fluss gemessen. Im ITA wurde die Gaspermeabilität der GDL- und GDS-Proben an 20 cm² großen Proben mit einem Differenzdruck von 200 Pa [ΔP] nach DIN EN ISO 9237 ermittelt. Es wurde der Luftmengenstrom q_v [l*min-1] gemessen und daraus die Luftdurchlässigkeit R [mm*s⁻¹] nach folgender Gleichung bestimmt, wobei q_v das arithmetische Mittel des Luftstromes und A die Prüffläche ist.

$$R = \frac{q_v}{A}$$

Die spezifische Permeabilität K wird aus der Darcy-Gleichung berechnet:

$$R = \frac{K \Delta P}{\eta h}$$

Wobei η die Viskosität von Luft ist und h die Vliesdicke ist [16]. Für die Dickenmessung wurde ein Universal-Mikrometer der Firma Frank Prüfgeräte GmbH, Birkenau (Abb. 2.14) verwendet. Die Vliesdicke [h] wurde in Anlehnung an DIN ISO 9073-2 bestimmt.

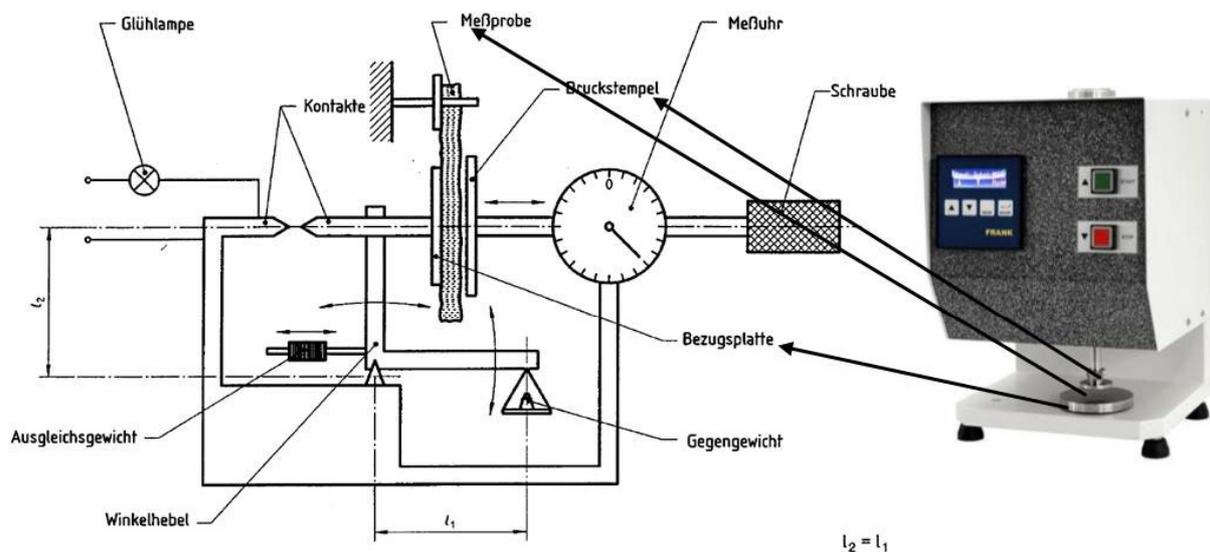


Abb. 2.14 Universal Mikrometer der Firma Frank Prüfgeräte GmbH Birkenau

Mittels Mikroskopie (Auflicht und Durchlicht) wird die Porenverteilung der GDLs bestimmt. Mit einem Leica - M205 C Stereomikroskop der Firma Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, wurden Bilder gemacht. Diese Bilder wurden mit Hilfe der Leica Application Suite Software analysiert und die Porengrößenverteilung ermittelt.

Die Messungen zur Bestimmung der Gaspermeabilitäten, der Probendicke sowie des Flächengewichtes wurden unter den folgenden, in den Tabellen 2.5, 2.6 bzw. 2.7 angegebenen Bedingungen durchgeführt.

Norm	DIN EN ISO 9237
Prüfgerät	FX 3300 LabAir IV, TEXTEST AG, Schweiz (Abb. 2.15)
Prüffläche A [cm ²]	20
Differenzdruck [Pa]	200
Temperatur [°C]	21,0
Re. Luftfeuchte [%]	64,0

Tab. 2.5 Prüfbedingungen zur Bestimmung der Gasspermeabilität



Abb. 2.15 FX 3300 LabAir IV, TEXTEST AG, Schweiz

Norm	DIN EN ISO 9073-2 (A)
Prüfgerät	Universal Mikrometer, Frank Prüfgeräte GmbH, Birkenau
Druckstempel [mm ²]	2500
Bezugsplatte [mm ²]	5024
Belastungsdauer [s]	10
Messdruck [kPa]	0,5
Temperatur [°C]	21,0
Re. Luftfeuchte [%]	64,0

Tab. 2.6 Prüfbedingungen zur Bestimmung der Probendicke

Norm	DIN EN 12127
Prüfgerät	Waage AE 163; Mettler-Toledo, Ohio, USA
Prüffläche A [cm ²]	100
Temperatur [°C]	21,0
Re. Luftfeuchte [%]	64,0

Tab. 2.7 Prüfbedingungen zur Bestimmung des Flächengewichts

In Abbildung 2.16 ist die Luftdurchlässigkeit der beiden Materialien FCCT sowie Toray dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das GDL-Materialien von Toray eine höhere Luftdurchlässigkeit besitzt als die von FCCT.

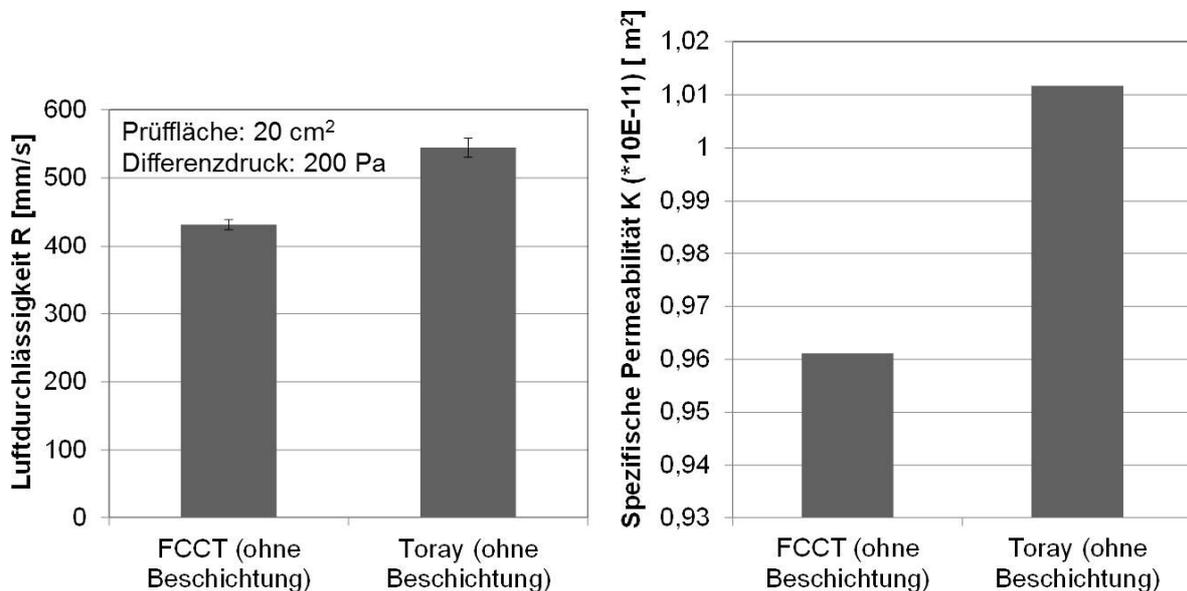


Abb. 2.16 Gaspermeabilität des GDL Materials

Die Auswirkung des Differenzdrucks auf die Luftdurchlässigkeit wurde ebenso ermittelt. Die Luftdurchlässigkeit durch ein poröses Flächengebilde hängt wie folgt von Differenzdruck p ab:

$$LD = A \cdot p^E$$

Wobei LD die Luftdurchlässigkeit, A die Materialkonstante, p der Differenzdruck und E der Exponent der Luftdurchlässigkeitskurve sind [16].

Daraus folgt:

$$E = \frac{\log\left(\frac{LD_1}{LD_2}\right)}{\log\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}$$

Wenn die beiden Prüfdrücke p_1 und p_2 so gewählt werden, dass sie sich genau um den Faktor 10 unterscheiden, ist $\log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 1$ und die Formel vereinfacht sich zu:

$$E = \log\left(\frac{LD_1}{LD_2}\right)$$

Die Kurvenexponent E ist eine Materialkonstante und liegt in den weitaus meisten Fällen zwischen 0,5 und 1,0.

Mit Hilfe des Kurvenexponenten E kann nun aus jedem der beiden ursprünglichen Messergebnisse die Luftdurchlässigkeit LD_3 des Flächengebildes bei jedem beliebigen Prüfdruck p_3 recht genau wie folgt berechnet werden:

$$LD_3 = LD_2 \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^E$$

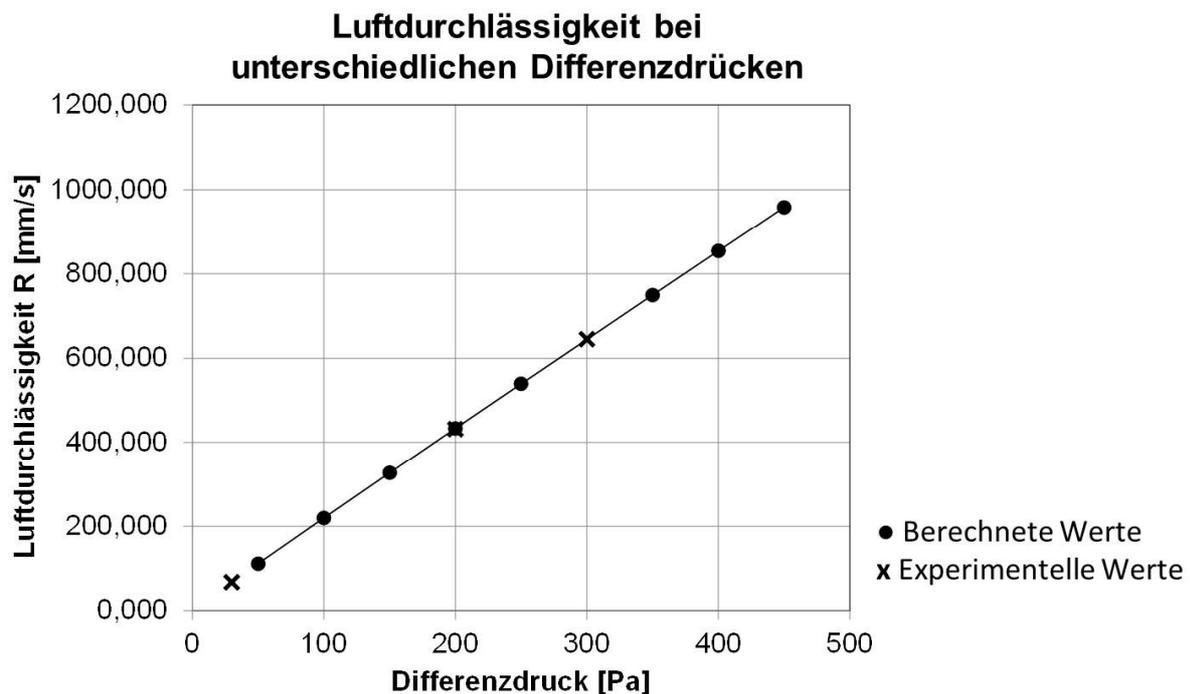


Abb. 2.17 Gaspermeabilität des H2315 GDL Materials bei unterschiedlichen Differenzdrücken

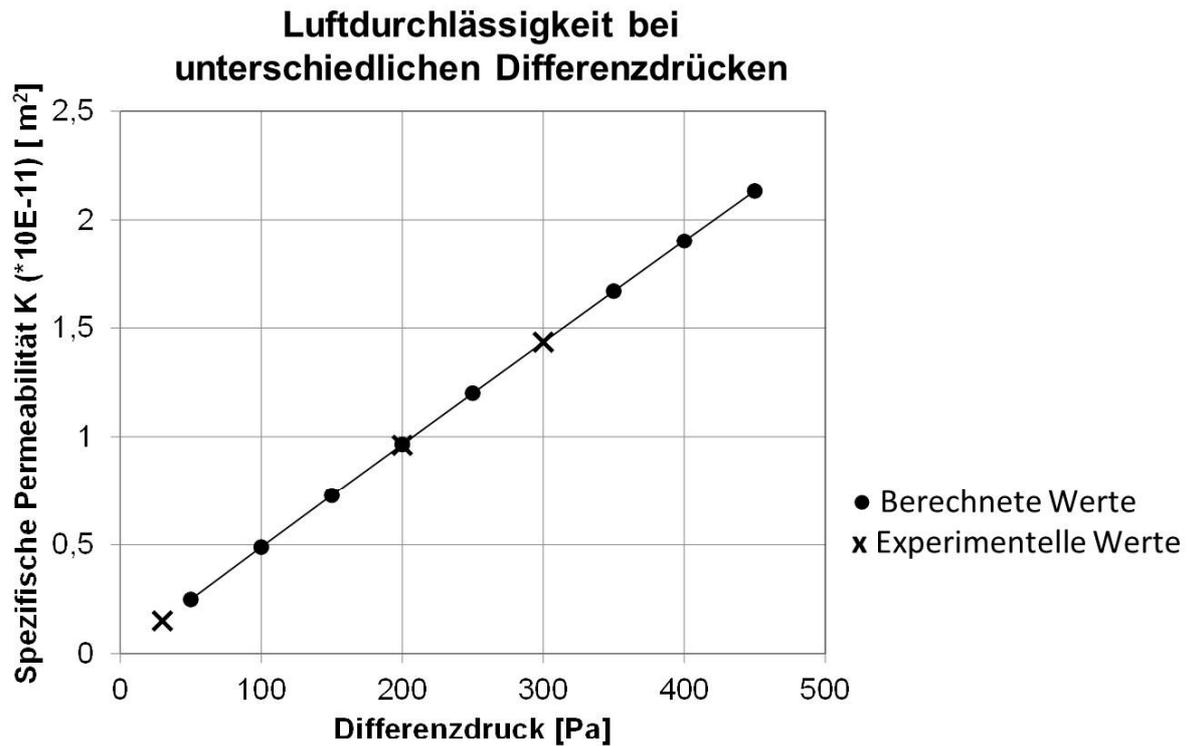


Abb. 2.18 Spezifische Permeabilität des H2315 GDL Materials bei unterschiedlichen Differenzdrücken

Abbildung 2.17 – 2.18 zeigt die Werte für die Gasdurchlässigkeit, die man für die verschiedene Differenzdrücke erhält. P1 und P2 werden zwischen 30 und 300 gewählt. Zur Prüfung wurde der Durchlässigkeitswert bei einem Differenzdruck von 200 Pa gemessen. So kann man sehen, dass die experimentell ermittelten Werte den berechneten entsprechen. Der für E berechnete Wert beträgt 0,98, was auf ein lineares Verhältnis zwischen Luftdurchlässigkeit und Differenzdruck schließen lässt.

Die mittels Auflichtmikroskopie erhaltenen Bilder für die Porenanalyse sind in Abb. 2.19 zu sehen. Die GDL (links) zeigt eine mikroporöse Struktur mit Fasernetzwerken, während die GDS (rechts) eine aufgrund der Beschichtung eine geschlossene Struktur aufweist. Daher konnte die Analyse der Porengrößen nur mit den GDL-Proben durchgeführt werden. In Abb. 2.20 ist die Porengrößenverteilung nach der Bearbeitung mit der Leica Application Suite Software für eine der getesteten GDL-Proben zu sehen.

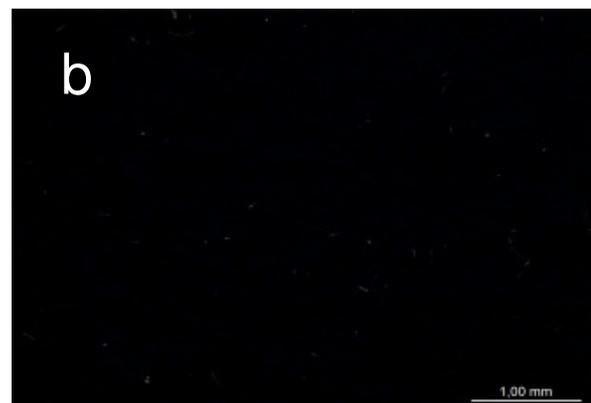
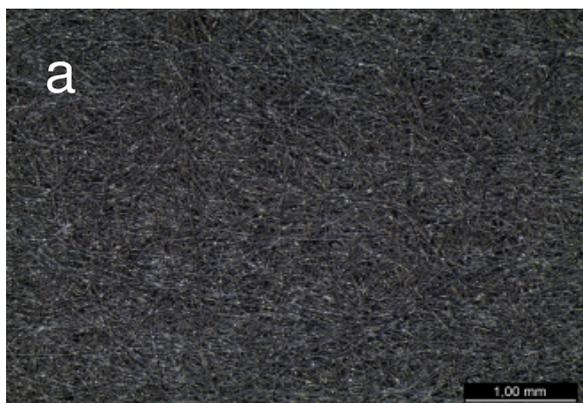


Abb. 2.19 Mikroskopische Analyse der (a) H2315 GDL und (b) I2C8-GDS-Material

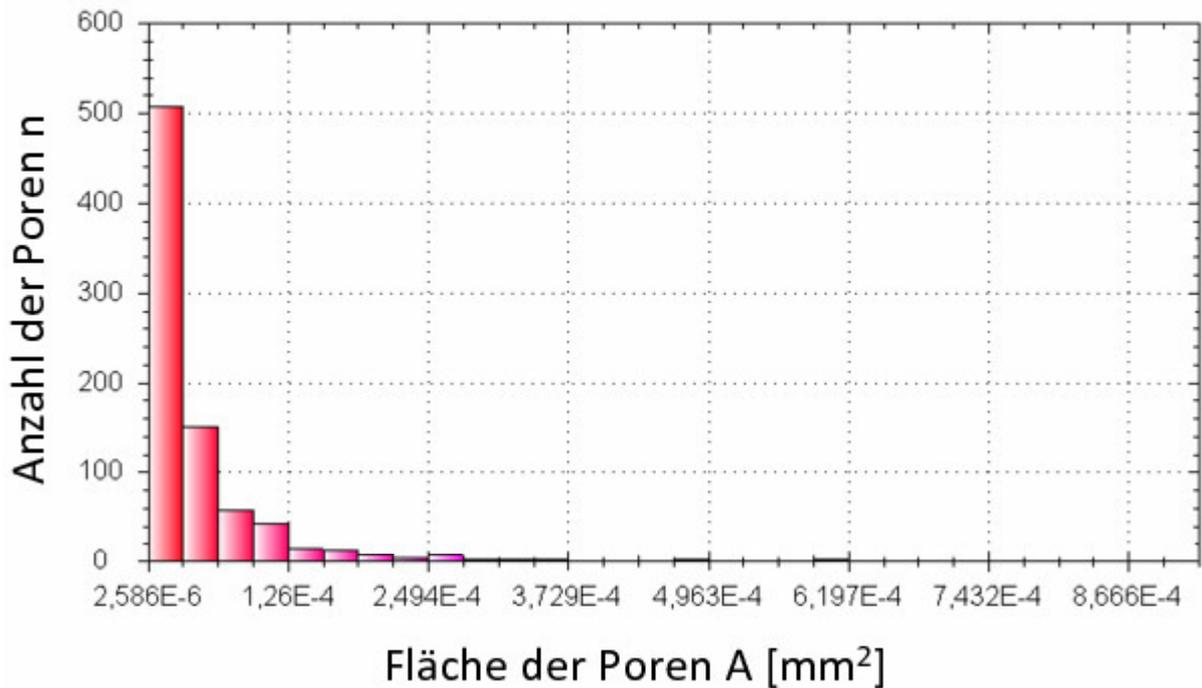


Abb. 2.20 Porengrößenverteilung der H2315 GDL- Probe

2.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Betriebstemperatur einer niedertemperatur PEM-Brennstoffzelle beträgt max. 80 - 90 °C und ihr durchschnittlicher Wirkungsgrad liegt bei 50 %. Die "verlorene" Energie wird in Wärme umgewandelt, die aus der MEA abgeführt werden muss und daher eine Temperaturerhöhung in der MEA gegenüber dem Kühlmedium erfordert. Lokale Temperaturunterschiede können aber zum Austrocknen bzw. Überfluten einer Zelle führen. Daher ist für den effizienten Betrieb einer PEM Brennstoffzelle ein effektives Wärmemanagement nötig. Die GDL ist dabei eine wichtige Komponente, über die die überschüssige Wärme aus der Brennstoffzelle abgeführt wird [17].

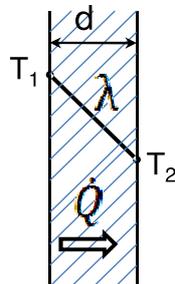


Abb. 2.21 Wärmetransport durch die Textilstruktur [18]

Die thermische Leitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Materials Wärme zu übertragen. In Textilstrukturen (hier GDL) findet Wärmetransport von einer Seite zur anderen Seite auf Grund der textilen und porösen Struktur durch hoch komplexe Vorgänge statt (Abbildung 2.21). Vereinfacht kann angenommen werden, dass

hauptsächlich der Wärmetransport durch Wärmeleitung innerhalb der Textilstruktur geschieht. Sie kann beschrieben werden durch das Fouriersche Gesetz:

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{(T_1 - T_2)}{d} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit \dot{Q} = Wärmeleitung [J/mK]

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

A = Querschnittsfläche [mm²]

T_1, T_2 = äußere Temperaturen [°C]

d = Materialdicke [mm]

Der Wärmeleitwiderstand R ist der von Materialdicke abhängige Reziprokwert der Wärmeleitfähigkeit λ und wird berechnet nach:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{Gl.2})$$

Die Wärmeleitfähigkeit durch die Ebene (through plane) wird mittels eines Alambeta Tester der Firma, Sensora, (Liberec, Tschechien) bestimmt. Mit diesem Messgerät sind auch kleine Wärmeleitfähigkeiten λT (0,01 - 2 W/mK) von z.B. GDL-Materialien messbar. Das Prinzip beruht auf der Messung des Zeitverlaufes des Wärmeflusses QL durch die Oberfläche des GDL-Materials. Das GDL-Material befindet sich im Messgerät zwischen zwei definiert beheizten Platten. Eine Prinzipskizze sowie ein Abbild des Alambeta-Testers sind in Abbildung 2.22 dargestellt.

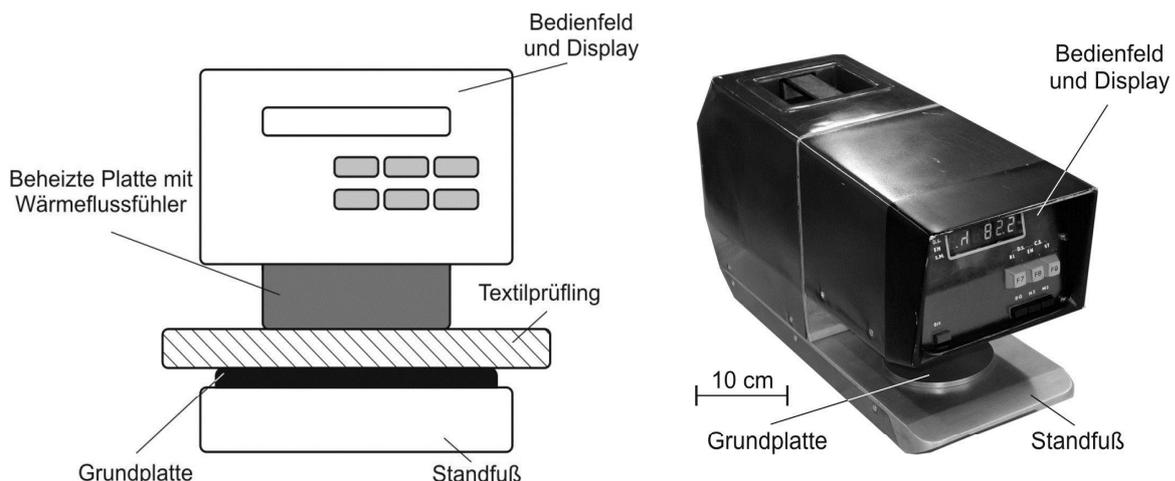


Abb. 2.22 Prinzipskizze und Abbildung des Alambeta-Testers

An einer Oberfläche des Textilprüflings wird die Temperatur T im Alambeta Tester durch eine beheizte Platte definiert erhöht. Ein Wärmeflussfühler misst den Wärmefluss QL zur anderen Oberfläche des Textilprüflings. Durch einen Algorithmus kann die Wärmeleitfähigkeit des Textils bestimmt werden. Aufgrund von

Vereinfachungen entsteht bei diesem Gerät ein Messfehler von ca. 5 bis 7 % [8]. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur thermischen through plane-Leitfähigkeit werden in Tabelle 2.8 zusammengefasst.

	H2315 GDL	I2C8 GDS
Thermische Leitfähigkeit λ [Watt / mK]	0,06	0,08
Wärmeleitwiderstand R [mm.mK/Watt]	4,03	3,16

Tab 2.8 Ergebnisse der thermischen Untersuchungen

2.2.4 Untersuchung der Kompressionseigenschaften der relevanten Komponenten in Kombination miteinander

Das Ziel dieser Arbeiten ist die Untersuchung der Wechselwirkungen der Komponenten miteinander bezüglich ihrer Kompressibilität. Die Membran-Elektroden-Einheit besteht aus zwei GDEs und der Membran.

Die MEAs wurden auf der Zugprüfmaschine des ITA auf elastische und plastische Kompressibilität hin untersucht. Dazu werden die Proben mit einem Durchmesser zwischen 30 und 45 mm mit einem Stempel der Größe 50 mm belastet. Die maximale Flächenpressung (FP) betrug 1 MPa (100 N/cm²). Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Die FP von 1 MPa wurde für fünf Minuten gehalten und die Proben wurden mit der selben Rate/Geschwindigkeit zu ihrem Ursprungszustand entlastet. Diese Untersuchungen werden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 80 °C durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur auf die MEAs zu erfassen (vgl. Arbeitspaket 2).

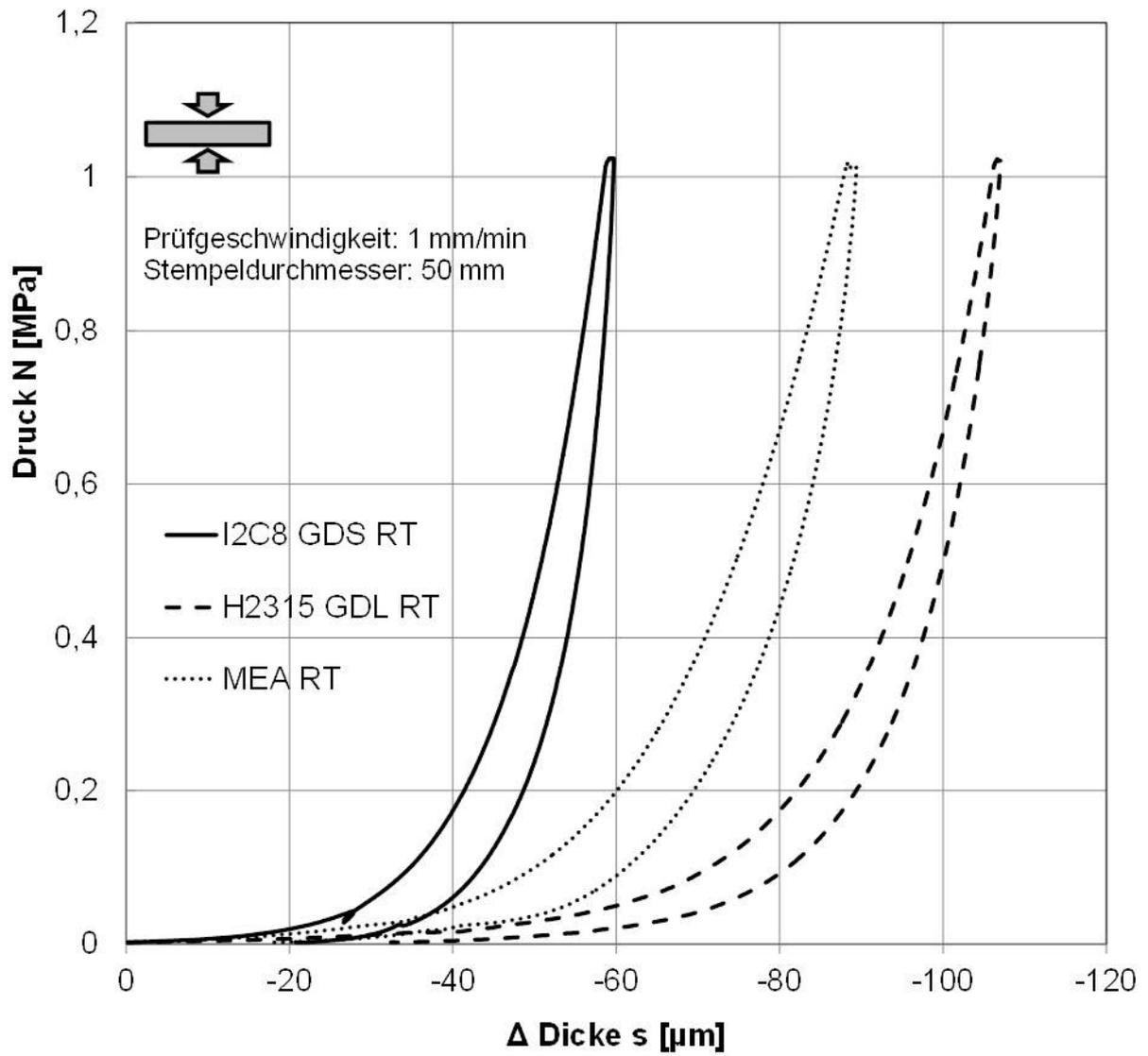


Abb. 2.23 Ergebnisse der Kompressionsversuche (Hin- und Rücklauf) von GDL, GDS, MEA bei Raumtemperatur

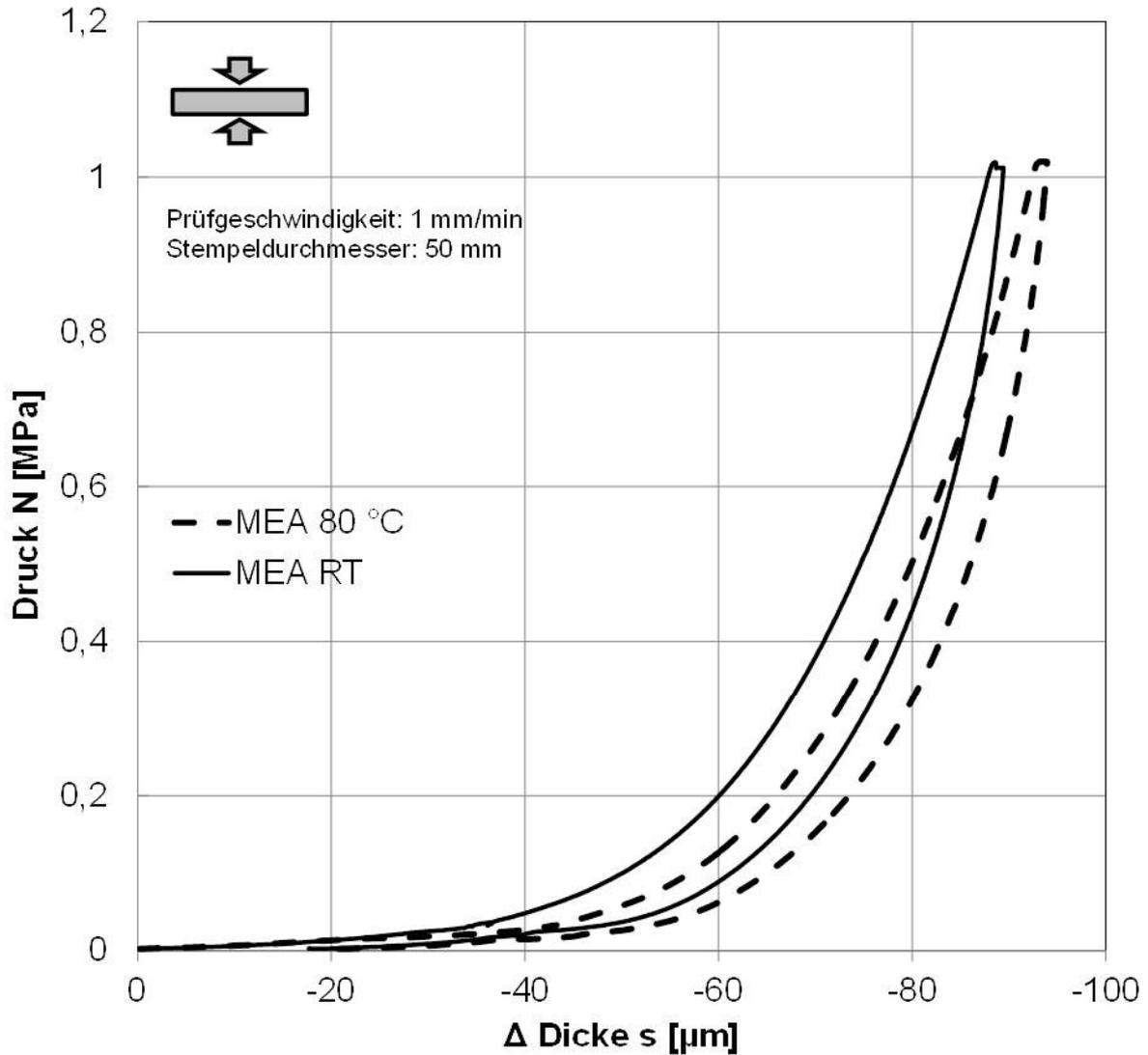


Abb. 2.24 Ergebnisse Kompressionsversuche (Hin- und Rücklauf) von MEA bei RT und 80 °C

Die Ergebnisse der Kompressionsversuche sind in Abbildung 2.23 dargestellt. Die MEA Materialien weisen bei der Kompression plastische Deformationen von 17,6 µm auf, während die H2315 GDL und I2C8 GDS jeweils eine plastische Deformation von 20,6 und 18,6 µm aufzeigen.

Die Ergebnisse der Druckversuche bei Raumtemperatur und bei 80 °C werden in Abbildung 2.24 gezeigt. Die Luftfeuchtigkeit der Temperierkammer betrug bei 80 °C 6,5 % r.H. Hier erreichte die plastische Deformation der MEA Materialien kompressionsbedingt einen Wert von 20,3 µm, welcher höher als der bei Raumtemperatur auftretende Wert ist.

2.2.5 Zusammenfassung

Tabelle 2 fasst alle Ergebnisse der experimentellen Evaluation der GDL-, GDS-Materialien sowie der MEA zusammen. Die erreichten Ergebnisse werden vom ZBT zur Modellierung der Einzelkomponenten und Komponentenkombinationen der Brennstoffzellen genutzt.

	H2315 GDL	I ₂ C ₈ GDS
Dicke t [µm] ohne Verpressung	242	253
Flächengewicht M [g/m ²]	95,94	136,38
Dichte ρ [g/cm ³]	0,40	0,54
spezifische Permeabilität K (*10E-11) [m ²]	431,70	-
Thermische Leitfähigkeit λ [Watt / m*K]	0,06	0,08
Wärmeleitwiderstand R [mm.mK/Watt]	4,03	3,16
Elektrischer Widerstand in plane 0°/90° R[mΩ _{square}]	1000 / 600	950 / 580
Elektrischer Widerstand through plane R [mΩcm ²]	1,2 – 0,4 je nach Anpresskraft	1,2 – 0,4 je nach Anpresskraft

	Material	Raumtemperatur	80 °C
Kompression beim 1 MPa s [µm]	H2315 GDL	105,25	110,5
	I2C8 GDS	63,73	65,67
	MEA	87,47	95,75
Plastische Kompression nach 1 MPa Kompression, 5 Minuten Haltezeit [µm]	H2315 GDL	20,6	
	I2C8 GDS	18,6	
	MEA	17,6	20,3

2.3 (AP 5-8) Entwicklung der Modelle und Modellierung mit COMSOL Multiphysics®

Mit Hilfe von numerischen Methoden können prinzipiell auch komplexe Wechselwirkungen in einem Brennstoffzellenstack simuliert werden. Für das im Rahmen dieses Projektes erstellte Simulationsmodell wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Auswirkung unterschiedlicher Anpresskräfte auf die elektrochemischen Eigenschaften des Stacks gelegt. Das in dieser Arbeit untersuchte, aus 5 Einzelzellen bestehende Stack sowie die zur Simulation benötigten CAD Modelle sind in Abb. 2.25 dargestellt.

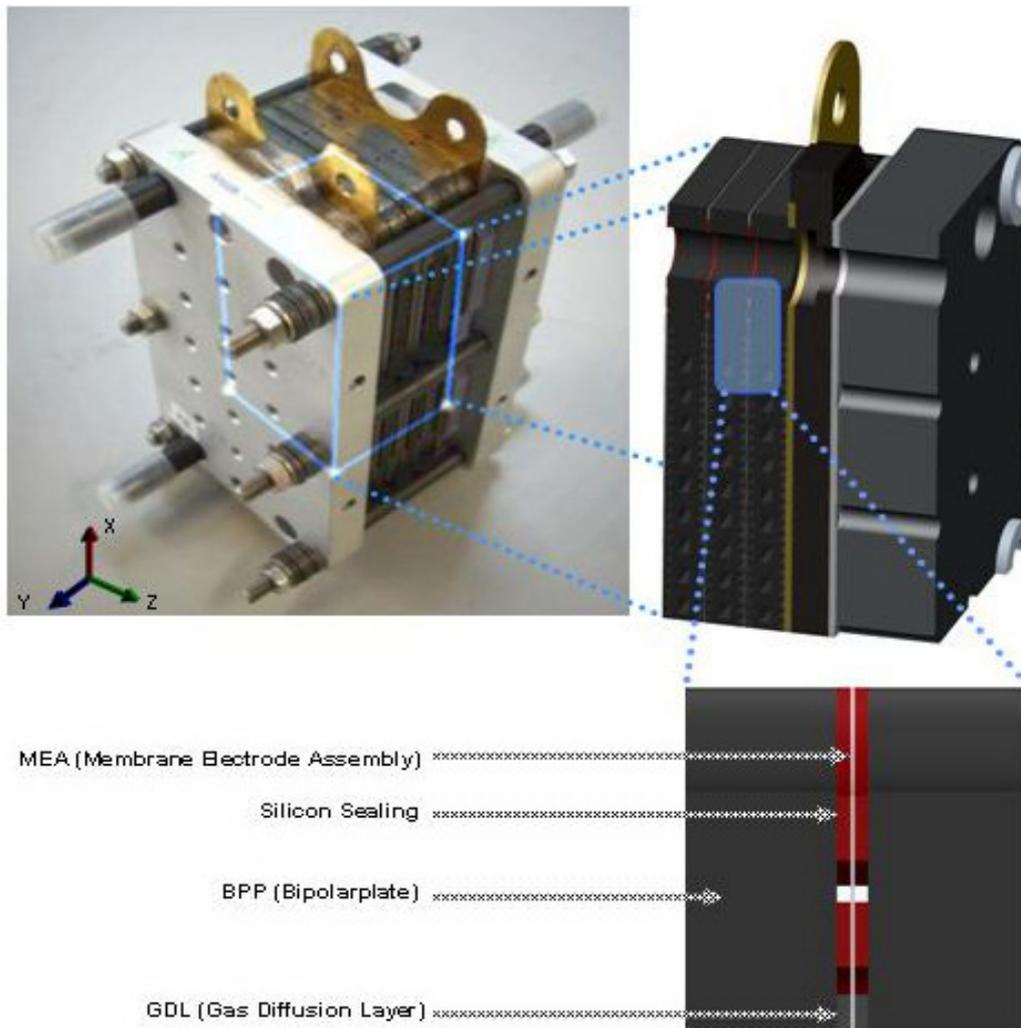


Abb. 2.25 Standard BZ-Stack und Berechnungsmodell

Für die anstehenden Simulationen wurde das Softwarepaket „Comsol Multiphysics“ einschließlich der erforderlichen Module ausgewählt und angeschafft. Durch externe Schulungen und Fortbildungen wurden zusätzliche Kenntnisse erworben, um dieses Softwarepaket effizient einsetzen zu können.

Die erforderlichen Simulationsmodelle wurden unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Rechnerkapazität entwickelt. Dazu wurden zwei Modelle erstellt.

Das erste Modell dient zur Analyse des thermomechanischen Verhaltens des gesamten Stacks. Mit dem zweiten Modell können die mechanischen Eigenschaften in Verbindung mit den elektrochemischen Prozessen simuliert werden. Auf Grund der sehr komplexen Zusammenhänge und der begrenzten Rechenkapazität konnte mit dem zweiten Modell nur ein begrenzter Ausschnitt des Stacks berechnet werden. Der detaillierte Aufbau der beiden Modelle sowie deren experimentelle Verifikation sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.3.1 Mechanische Simulation des Stacks

Für dieses Projekt wurde auf ein aus 5 Einzelzellen bestehendes Stack zurückgegriffen (Abb. 2.25). Bei diesem Stack handelt es sich um einen durch langjährige teilempirische Entwicklung optimierten Stack, welcher am ZBT als Standard verwendet wird. Durch diese Wahl ergeben sich folgende Vorteile:

- dieser Stack ist von der Größe her überschaubar, weist jedoch bereits alle Eigenschaften auf, die bei größeren, z.B. aus 30 oder mehr Einzelzellen bestehenden Stacks auftreten. Mit minimiertem Aufwand für die Simulationen können somit Ergebnisse gewonnen werden, die leicht auf alle für die praktischen Anwendungen relevanten Stackgrößen übertragen werden können.
- Durch die Verwendung des Standardstacks stehen zur Verifikation der in diesem Projekt durchgeführten Simulationen sehr umfangreiche Datensätze zur Verfügung.
- Durch die Verwendung von Standardkomponenten konnten die erforderlichen Versuchsaufbauten schnell realisiert werden. Dadurch konnte eine zügige Bearbeitung dieses Projektes sichergestellt werden.

Die Kernkomponente dieses thermomechanischen Modells besteht aus einer Kombination der mechanischen Kräfte und der thermischen Ausdehnung in Abhängigkeit des jeweils vorliegenden Temperaturprofils. Dies ist möglich mit der Kopplung der thermischen und strukturmechanischen Berechnungen durch den Einsatz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten ins Modell.

Für die umfassende thermomechanische Simulation des Stacks wurden die folgenden Gleichungen (Gl. 2 – 8) verwendet. Im einzelnen sind dies:

Die mechanische Dehnung wird durch die „Poisson Gleichung“ (Gl 3 – 4) berechnet.

Die grundlegenden, in diesem Modell zur Berechnung des Temperaturprofils verwendeten Gleichungen sind die Gleichungen 5 und 6.

Die gleichzeitige mechanische und thermische Ausdehnung des Modells wird durch die Gleichung 7 erfasst.

$\nabla \cdot (D \nabla \underline{u}) = 0$	Gl.(3)
$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$	Gl.(4)
$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$	Gl.(5)
$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p \underline{u} \cdot \nabla T$	Gl.(6)
$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}_{el} + \underline{\varepsilon}_{th} + \underline{\varepsilon}_0$	Gl.(7)

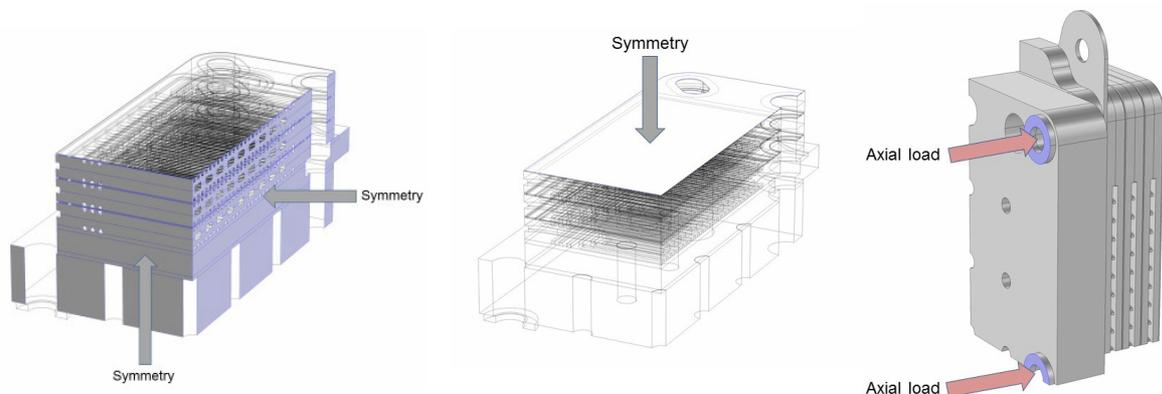


Abb. 2.26 Randbedingungen für die strukturmechanische Berechnungen

Das Simulationsmodell des Stacks wurde in mehrere Einheiten unterteilt. Diese Einheiten entsprechen den einzelnen Komponenten des Stacks; Endplatte, Dichtungen, Bipolarplatten, Stromabnehmerplatte, Druckplatte, Gas Diffusionsschichten (GDL) und Membran. In diesem Simulationsmodell wurden die Katalysatorschichten der MEA mit in die Membran implementiert.

Zur Vereinfachung des Simulationsmodells wurde die Dicke der Dichtungen der Dicke der GDLs gleichgesetzt. Die Aufnahmekraft der Dichtung, bis diese die Dicke der GDL erreicht hat wurde dabei vernachlässigt

Für die Erstellung des Modells des in Abb. 2.25 dargestellten Stacks konnten Symmetrie-Elemente wie oben erwähnt ausgenutzt werden. Hierdurch ist es möglich den Rechenaufwand sowie die erforderliche Rechnerkapazität erheblich zu reduzieren. Unter Ausnutzung von vorhandenen Symmetrieelementen und Spiegelebenen konnte deren Größe auf 1/8 des gesamten Stacks reduziert werden. Die simulierten Ausschnitte inklusive der Symmetrieelemente und vorherrschenden Anpresskräfte sind in Abb. 2.24, die Lage dieser Ausschnitte in Abb. 2.25 dargestellt.

Bei dem simulierten Stack werden die Anpresskräfte über Zuganker bzw. Gewindestangen in Verbindung mit Unterlegscheiben eingebracht. Die aus den Anzugsmomenten der Schrauben resultierenden Anpresskräfte wurden berechnet und in dieses Modell übertragen.

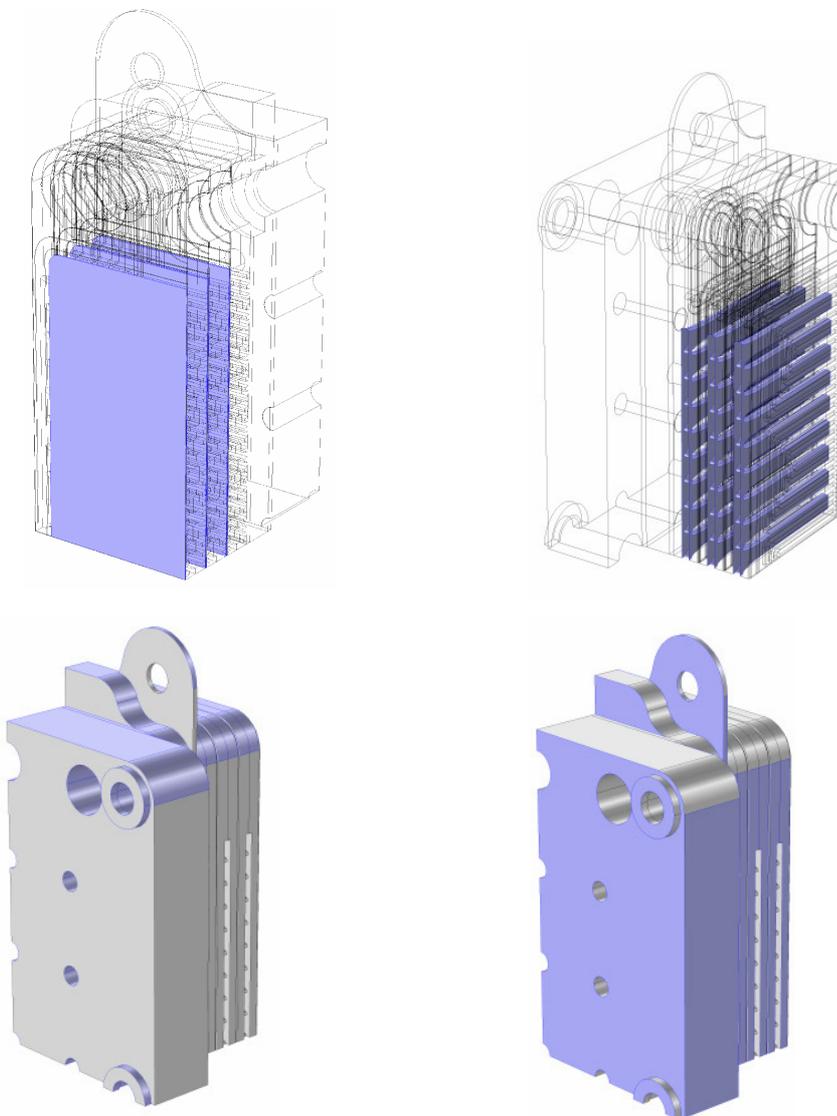


Abb. 2.27 Randbedingungen für die thermischen Berechnungen

Die Randbedingungen für die thermische Modellierung sind in Abbildung 2.27 dargestellt. Für diese Simulation wurde für die MEAs eine konstante, gleichmäßige Temperatur von (70°C) angenommen. Der Austrag der Wärmeenergie aus dem Stack wurde mit zwei Modellierungsansätzen berechnet. Ein Teil der Wärmeenergie wird über die Außenflächen des Stacks ausgetragen. Hierbei überwiegt die natürliche Konvektion der Umgebungsluft. Ein weiterer Teil wird über die Kühlkanäle ausgetragen. Hierbei überwiegt eine erzwungene Konvektion, die Luft wird mittels eines Gebläses durch die Kanäle befördert.

Für die Berechnungen von sowohl der freien als auch der erzwungenen Konvektionseffekte wurde auf die entsprechenden, vordefinierten Funktionen der Software „Comsol Multiphysics“ zurückgegriffen.

In einem ersten Schritt wurde per Simulation überprüft, ob die thermische Ausdehnung des Stacks einen Einfluss auf dessen mechanische Eigenschaften hat. Dazu wurden die Ergebnisse einer rein strukturmechanischen Simulation mit denen einer thermomechanischen, unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung verglichen. Durch den Vergleich dieser Ergebnisse (Abb. 2.28; 2.29) konnte der Einfluss der Temperatur bzw. des Temperaturprofils auf die mechanischen Eigenschaften des Stacks verdeutlicht werden. Dabei zeigte sich, dass die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Kräfteverteilung hat und somit für die weiteren Simulationen mit berücksichtigt werden muss.

Die im Bereich zwischen 20-70°C auftretenden mechanischen, durch das Simulationsmodell vorhergesagten Ausdehnungen, konnten durch Messungen an einem Kurzstack bestätigt werden. Dabei zeigte sich, dass die Ausdehnung des Stacks von der Temperatur dominiert wird. Weitere Einflüsse, wie z.B. Schwellen oder Austrocknen der Membran können demgegenüber vernachlässigt werden.

Die simulierten Ausdehnungen des Stacks können der Abbildung 2.28 entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass sich der Stack ungleichmäßig ausdehnt. Dadurch ändern sich in den einzelnen Elementen neben den reinen Druckspannungen auch die Scherspannungen. Die Verteilung der Summe aller Einzelspannungen auf die Membran ist in Abb. 2.29 durch die von-Mises-Vergleichsspannung dargestellt.

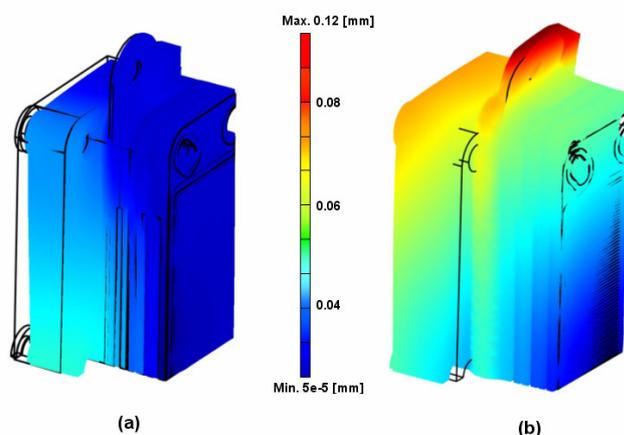


Abb. 2.28 Dehnung in BZ-Stack (a) strukturmechanische (b) thermomechanische Analyse

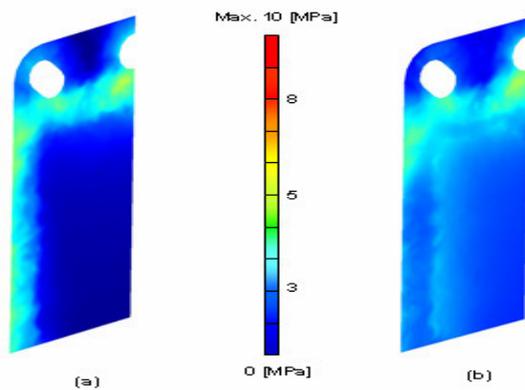


Abb. 2.29 Von Mises Spannung auf Membran von der ersten Zelle (a) strukturmechanische; (b) thermomechanische Analyse

Durch die Anpresskräfte werden die GDL/GDS teilweise in die Kanäle des Flowfields hineingequetscht. Wie beschrieben haben Temperaturänderungen den größten Einfluss auf die Ausdehnung des Stacks und somit auf sich ändernde mechanische Spannungen im Stack. Dementsprechend bewirken Temperaturänderungen ein unterschiedliches Quetschen der GDL/GDE in die Flowfieldkanäle. Die GDL wird, je nach Lage im Flowfield zwischen 0,01 mm und 0,05 mm in die Kanäle gequetscht. Dieser Einfluss ist in einer skalierten Darstellung der Simulationsergebnisse in Abbildung 2.30 gegeben.

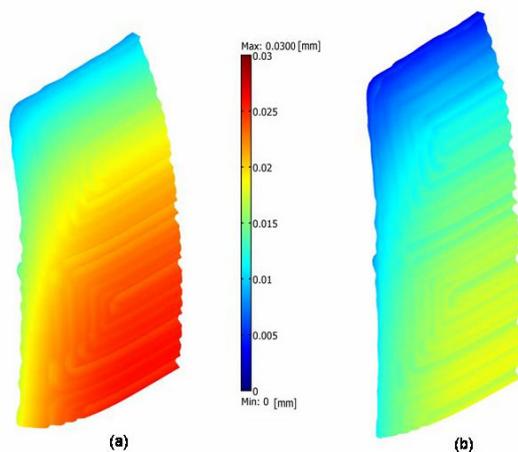


Abb. 2.30 Dehnung „through-plane“ auf GDL (Quetschen in FlowField-Kanäle) (a) strukturmechanische (b) thermomechanische Analyse

2.3.2 Stacktests

Die simulierte Druckverteilung in einem Stack wurde mit Hilfe von digitalen Druckmessfolien (TekScan) verifiziert. Für die Erfassung der Druckverteilung über eine gesamte Bipolarplatte mussten zwei Folien nebeneinander in das Stack eingebaut werden. Dadurch wurde dieses in einen „oberen“ und einen „unteren“ Bereich unterteilt. Die gemessene strukturmechanische Druckverteilung ist in Abbildung 2.31 dargestellt. Dabei zeigt sich eine ungleichmäßige Druckverteilung innerhalb des Stacks über der Membran. Weitere Messungen hierzu sind in [2] angegeben.

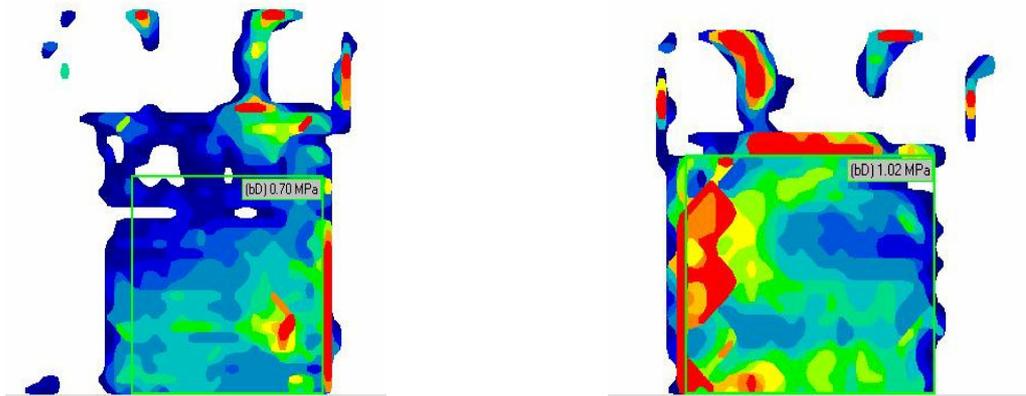


Abbildung 2.31 Messergebnisse mit „TekScan“ Druckmessfolien (oberer und unterer Bereich des BZ-Stacks)

Die thermische Ausdehnung des oben beschriebenen, aus 5 Einzelzellen bestehenden Stacks wurde messtechnisch erfasst. Der entsprechende Versuchsaufbau unter Verwendung einer Messuhr ist in Abbildung 2.32 dargestellt. Für diese Messungen wurde angenommen, dass sich die (ausenliegenden) Halterungen des Stacks nicht ausdehnen. Um Einflüsse der Medienversorgungen auszuschließen, wurden bei diesem Versuch alle Medien von der Unterseite des Stacks zugeführt. Dieses Stack diente als Grundlage für das verwendete Simulationsmodell, so dass hierdurch die Simulationsmodelle verifiziert werden konnten. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.30 dargestellt. Mittels der thermischen Simulationen wurden Temperaturgradienten innerhalb des Stacks vorhergesagt. Diese Gradienten konnten messtechnisch verifiziert werden, indem an mehreren Stellen des Stacks Temperaturmessfühler eingebracht wurden.



Abbildung 2.32 Messaufbau für die thermische Ausdehnung

Der Stack wurde mit unten gegebenen Testbedingungen in Betrieb genommen. Dabei wurde laufend zwischen einer Betriebstemperatur von 20°C und 70°C gewechselt.

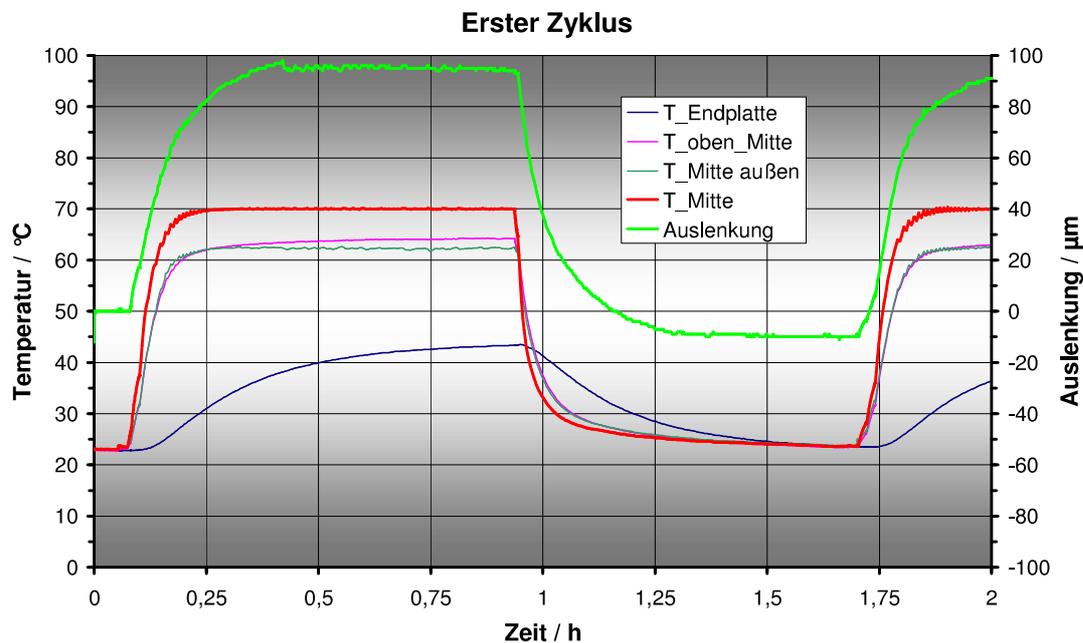


Abb. 2.33 erster thermomechanische Zyklus; Wechsel zwischen ausgeschaltet und Betrieb bei 20 A; 70°C; Kathode: $\lambda = 2$; Anode $\varphi = 70\%$; $\lambda = 3$

Die Ergebnisse des ersten Zyklus wurden in Abbildung 2.33 dargestellt. Die Temperaturen der einzelnen Zellen innerhalb des Stacks sind nahezu gleich. Ein starker Temperaturabfall tritt über die Isolierplatten zu den Endplatten hin auf. Diese thermische Verteilung und die gemessene Temperaturwerte von den Messstellen stimmen mit den Simulationsergebnissen überein.

Die gemessene Auslenkung des Brennstoffzellenstacks stimmt mit den Simulationsergebnissen überein. Bei der Evaluierung der Simulationsergebnisse müssen die Symmetrieelemente betrachtet werden, welche ins Simulationsmodell eingebracht werden und wie erwähnt zur Reduzierung des Rechenaufwandes dienen. Die gemessene Ausdehnung des Stacks innerhalb des ersten Zyklus hat einen Wert von etwa 100[μm], durch das verwendete Simulationsmodell wurde eine Ausdehnung von circa 95[μm] vorhergesagt.

In Abbildung 2.34 wurden die Betriebsparameter in Verbindung mit der Auslenkung des ersten Zyklus dargestellt. Dabei zeigte sich, dass sich die Änderung der Temperatur unmittelbar in einer Auslenkung bemerkbar macht. Die Einflüsse der weiteren Betriebsparameter wie Strom und Spannung auf die Auslenkung des Stacks können im Vergleich dazu vernachlässigt werden.

In Abbildung 2.35 wurde der Einfluss der Stromdichte auf die Auslenkung des BZ-Stacks bei konstanter Temperatur näher untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Stromdichte keinen messbaren Einfluss auf dessen Auslenkung hat. Die Wasserproduktion der MEAs und des damit verbundene Quellen der Membran wirkt sich nicht signifikant auf die Dicke des Stacks aus.

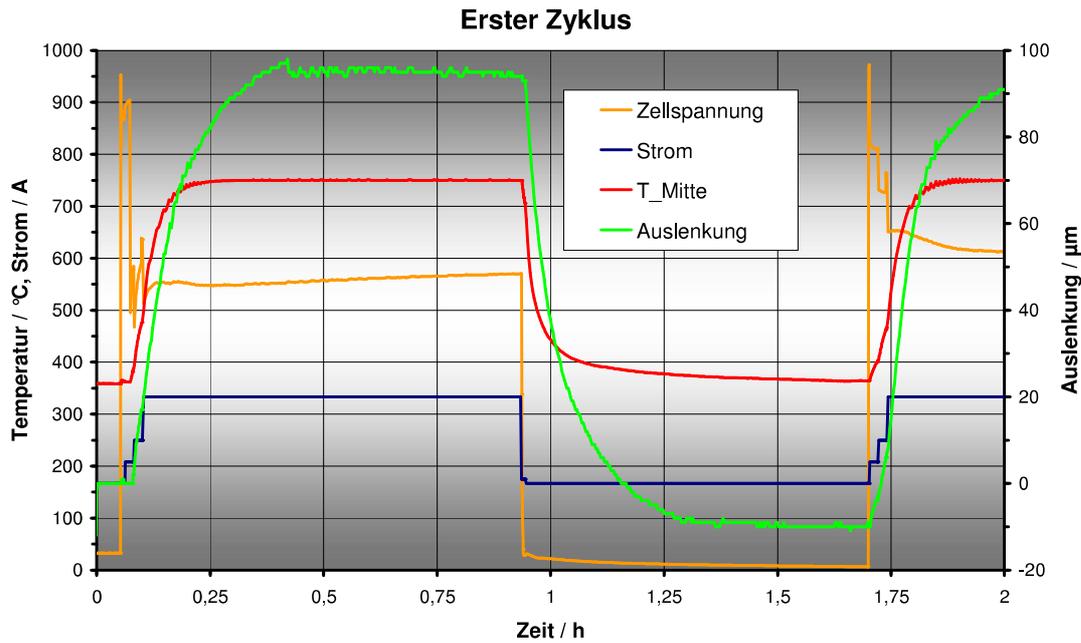


Abb. 2.34. Die Betriebsparameter des ersten Zyklus der thermischen Ausdehnung

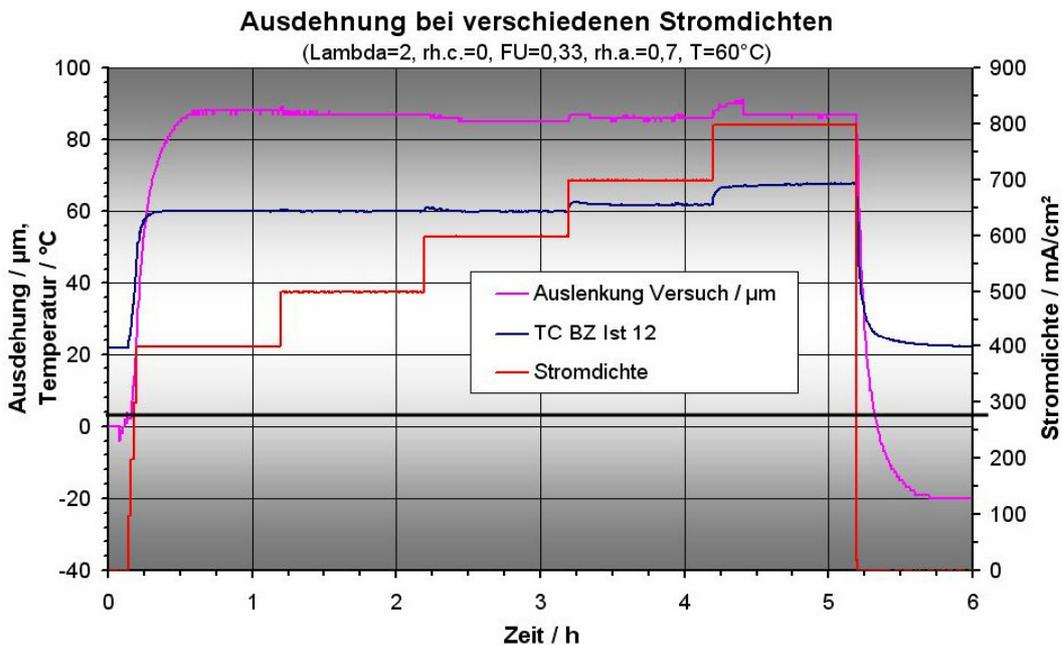


Abb. 2.35 Ausdehnung bei verschiedenen Stromdichten

In Abbildung 2.36 ist eine detailliertere Untersuchung der Stackauslenkung in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Dabei zeigte sich ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Auslenkung. Bei einer Erhöhung der Temperatur von 70 °C auf 80 °C ist eine kleine Abweichung von dieser Korrelation zu erkennen, die Auslenkung des Stacks verringert sich etwas mit der Zeit. Die Ursache hierfür kann unter Berücksichtigung der in Abbildung 2.37 dargestellten Zusammenhänge ermittelt werden.

In Abbildung 2.37 und 2.38 ist die Zellspannung des BZ-Stacks in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Dabei steigt unter konstantem Strom die Zellspannung mit zunehmender Temperatur zunächst an. Dieser Anstieg ist auf Grund der mit zunehmender Temperatur schneller ablaufenden elektrochemischen Reaktion zu erwarten. Im Laufe der Zeit tritt jedoch innerhalb der einzelnen Temperaturstufen bei steigender Temperatur ein leichter, kleiner Abfall der Zellspannung, bei abnehmender Temperatur ein leichter Anstieg der Zellspannung auf. Diese Änderungen können auf einen sich ändernden Feuchtegehalt der Membran zurückgeführt werden. Die sich ändernde Feuchte führt zu einem Quellen bzw. Schrumpfen der Membran, welches mit dem beschriebenen Messaufbau erfasst werden kann. Diese Änderungen sind aber, im Vergleich zu den thermischen Ausdehnungen so gering, dass sie für die weiteren Simulationen vernachlässigt werden können.

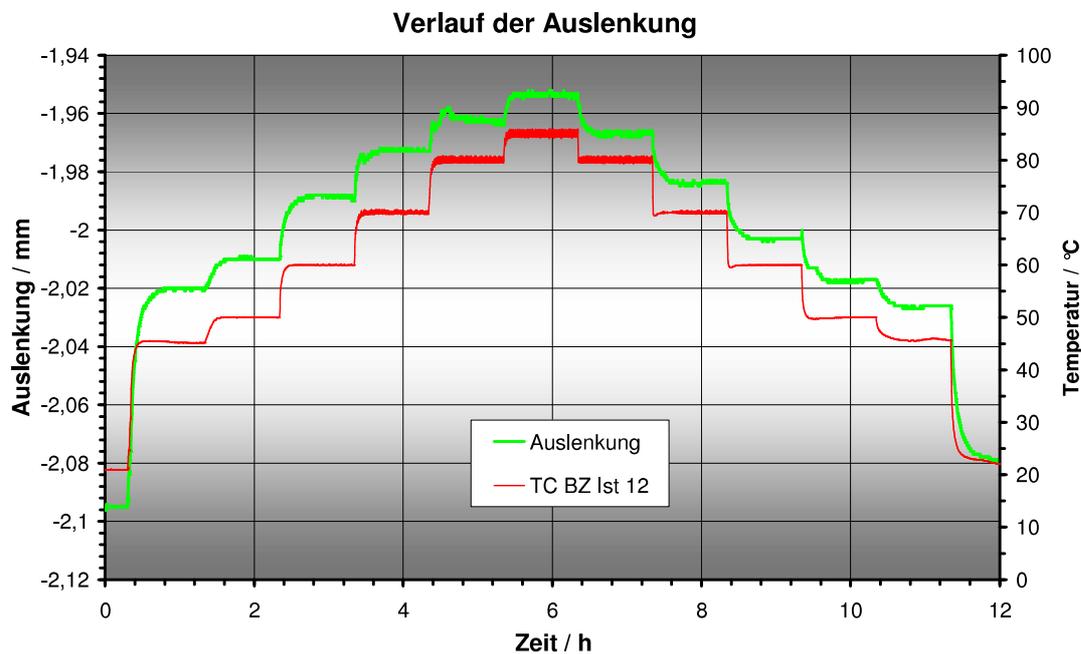


Abb. 2.36 Verlauf der Auslenkung bei Temperaturrampe

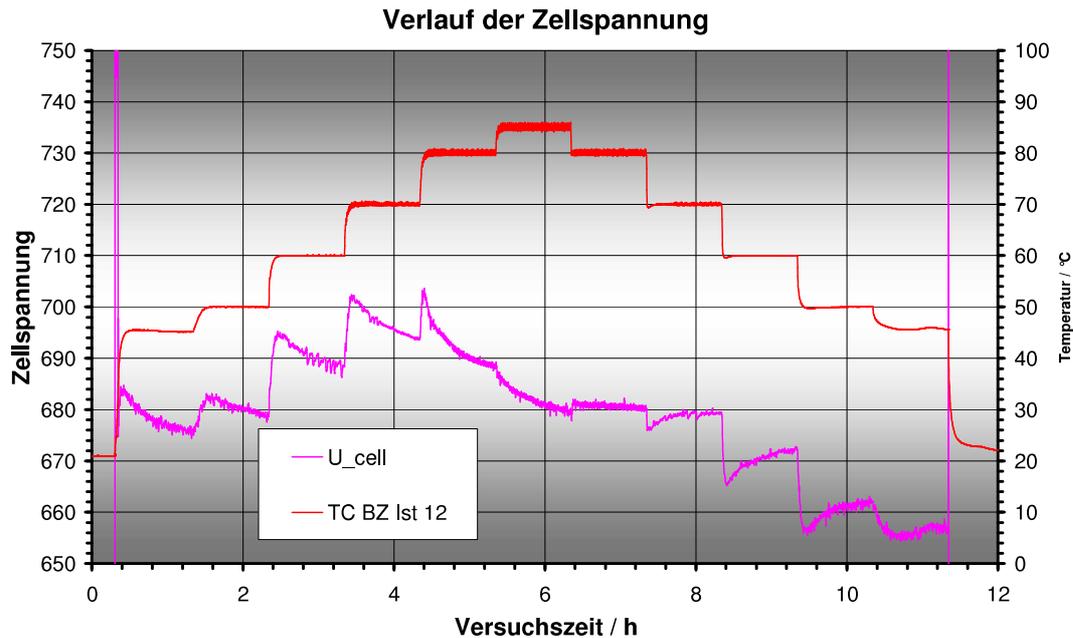


Abb. 2.37 Verlauf der Zellspannung in Abhängigkeit von der Temperatur

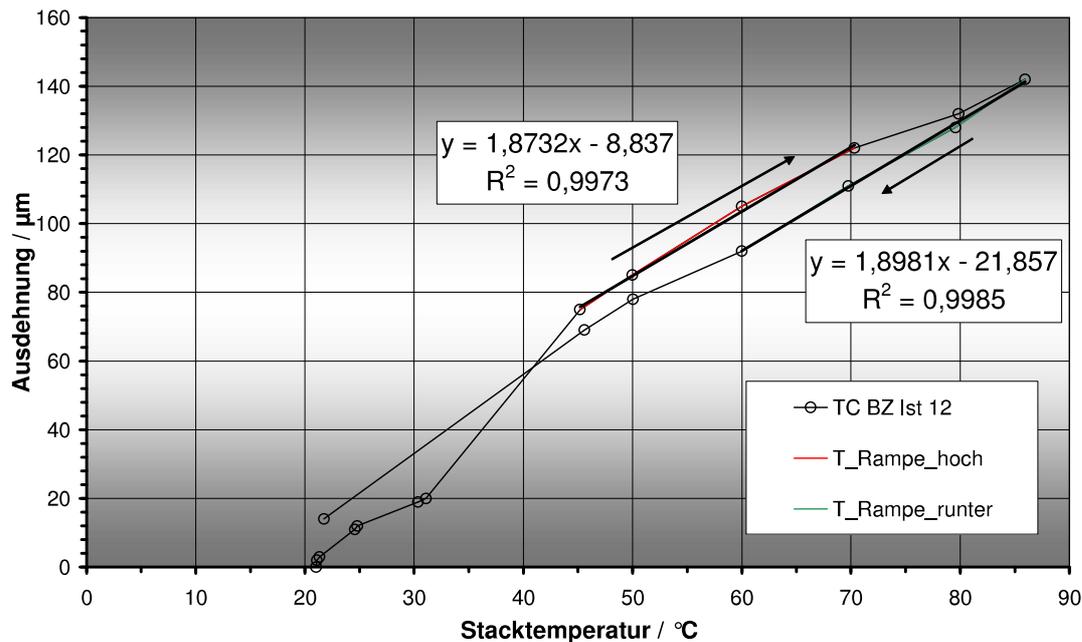


Abb. 2.38 Ausdehnungsgradient bei feuchter und trockener Membran

Für eine detailliertere Untersuchung dieses Verhaltens wurde die durch Temperaturänderungen verursachte Auslenkung des Stacks über mehrere Start-Stopp Zyklen hinweg erfasst. Innerhalb dieser Zyklen erwärmte sich der Stack von Raumtemperatur auf 70 °C und kühlte sich anschließend erneut auf Raumtemperatur ab. Dabei zeigte sich (Abbildung 2.39), dass der Stack über insgesamt mehr als 150 Zyklen hinweg schrumpfte. Dieses ist an der blauen Kurve zu erkennen, die die Auslenkung des kalten Stacks, bezogen auf die Länge des ursprünglichen kalten Stacks beschreibt. Durch die rote Kurve wird die Auslenkung des, auf 70 °C erhitzten

Stacks beschrieben. Als Bezugspunkt dient hierbei ebenfalls der ursprüngliche kalte Stack. Wird die gesamte thermische Auslenkung des Stacks innerhalb eines einzelnen Zyklus betrachtet, so zeigt sich, dass diese mit etwa 100 μm nahezu konstant bleibt. In Folge von plastischen Verformungen, hauptsächlich der Verformung der GDL/GDS Materialien ändert sich jedoch die Länge des kalten Stacks. Dieser Vorgang ist innerhalb der ersten 80 Zyklen abgeschlossen. Dieses Schrumpfen des Stacks wurde zwar beobachtet, jedoch noch nicht mit in das Simulationsmodell eingefügt.

Der Schrumpf des BZ-Stacks wird durch entsprechend ausgelegte Verspannelemente ausgeglichen und muss unbedingt bei der Konstruktion des Stacks mit berücksichtigt werden. Trotz der hohen Bedeutung des Schrumpfs kann dieser nicht mit den numerischen Simulationen beschrieben werden.

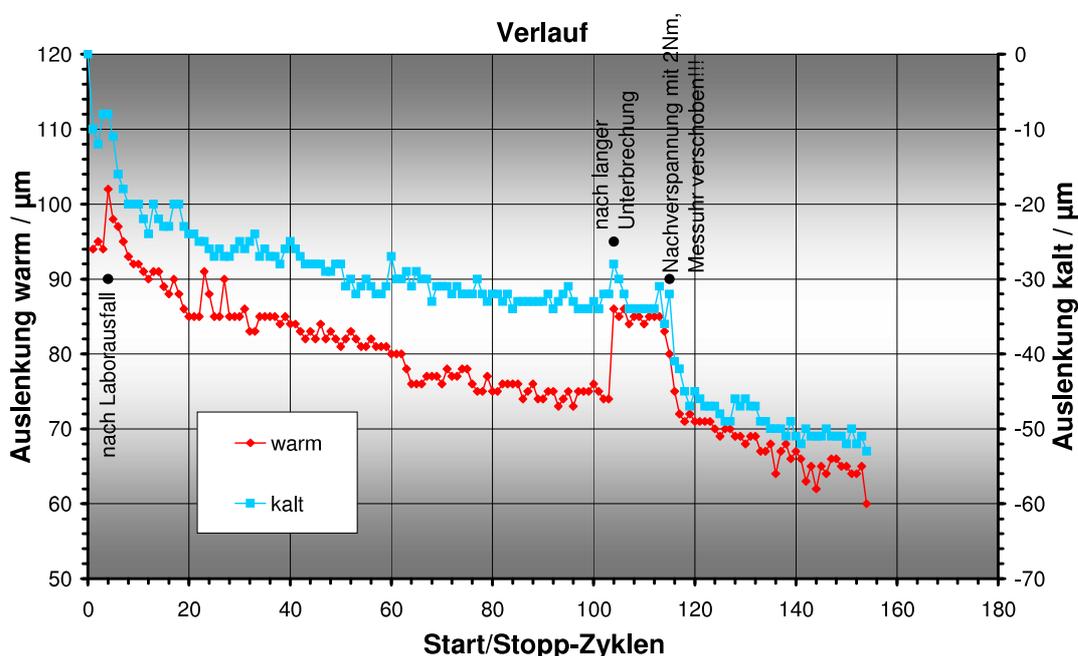


Abb. 2.39 Die Stacklänge bei der Warm- und Kaltphase innerhalb Zyklentest

Mit den durchgeführten mechanischen Messungen konnte die Plausibilität des erstellten Simulationsmodells bewiesen werden. Durch diese Messungen, ergänzt durch weitere durch entsprechende Simulationen gewonnene Informationen, konnten weitere Erkenntnisse über das thermomechanische Verhalten eines Brennstoffzellenstacks gewonnen werden.

2.3.3 Simulation der Stackleistung in Abhängigkeit vom Anpressdruck

Aus bisherigen Erfahrungen ist bekannt, dass die Anpresskraft einen großen Einfluss auf die elektrische Leistung eines Stacks hat. Um diese Auswirkungen mit Hilfe einer numerischen Simulation erfassen zu können, wurde ein zweites, bereits in der Einleitung dieses Kapitel erwähntes Modell erstellt.

Dieses zweite Modell basiert auf dem Broka-Modell, welches für die Simulation von PEMFC entwickelt wurde [3, 4]. Um die in diesem Projekt gestellte Aufgabe der

Optimierung der Anpresskräfte mit Hilfe von Simulationen bearbeiten zu können, wurde dieses Modell um die Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten erweitert. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass diese Eigenschaften wie z.B. Permeabilität oder elektrischer Widerstand von den Anpresskräften abhängig sind.

Das Broka-Modell basiert auf der Kombination unterschiedlicher physikalischer Gleichungssysteme. Jedes einzelne Gleichungssystem besteht dabei aus einer Differentialgleichung, mit der jeweils ein anderer physikalischer Vorgang beschrieben wird. Für dieses Modell wurden folgende Gleichungssysteme eingesetzt:

- Navier-Stokes-Gleichung für die Strömungssimulation (Gl. 8 - 9)
- Darcy-Gleichung für Strömungssimulation in porösen Medien (Gl. 10 - 11)
- Maxwell-Steffan-Gleichung für die Diffusion der Gase (Gl. 12 – 17)
- Ohm'sche-Gleichung für die elektrische und ionische Leitfähigkeit (Gl. 18 – 20)

$\rho(\underline{u} \cdot \nabla)\underline{u} = \nabla \cdot [-p\underline{I} + \mu(\nabla\underline{u} + (\nabla\underline{u})^T)] + \underline{F}$	Eq.(8)
$\rho \nabla \cdot \underline{u} = 0$	Eq.(9)
$\nabla \cdot (\rho\underline{u}) = Q_m$	Eq.(10)
$\underline{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p$	Eq.(11)

$\nabla \cdot \underline{J}_i + \rho(\underline{u} \cdot \nabla)\omega_i = R_i$	Eq.(12)
$\underline{N}_i = \underline{J}_i + \rho\underline{u}\omega_i$	Eq.(13)
$\underline{J}_i = -\left(\rho\omega_i \sum_k D_{ik} \underline{d}_k + D_i^T \frac{\nabla T}{T}\right)$	Eq.(14)
$\underline{d}_k = \nabla x_k + \frac{1}{p_A} [(x_k - \omega_k) \nabla p_A]$	Eq.(15)
$x_k = \frac{\omega_k}{M_k} M_n$	Eq.(16)
$M_n = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i}\right)^{-1}$	Eq.(17)

$\nabla \cdot \underline{J} = Q_j$	Eq.(18)
$\underline{J} = \sigma \underline{E} + \underline{J}_e$	Eq.(19)
$\underline{E} = -\nabla V$	Eq.(20)

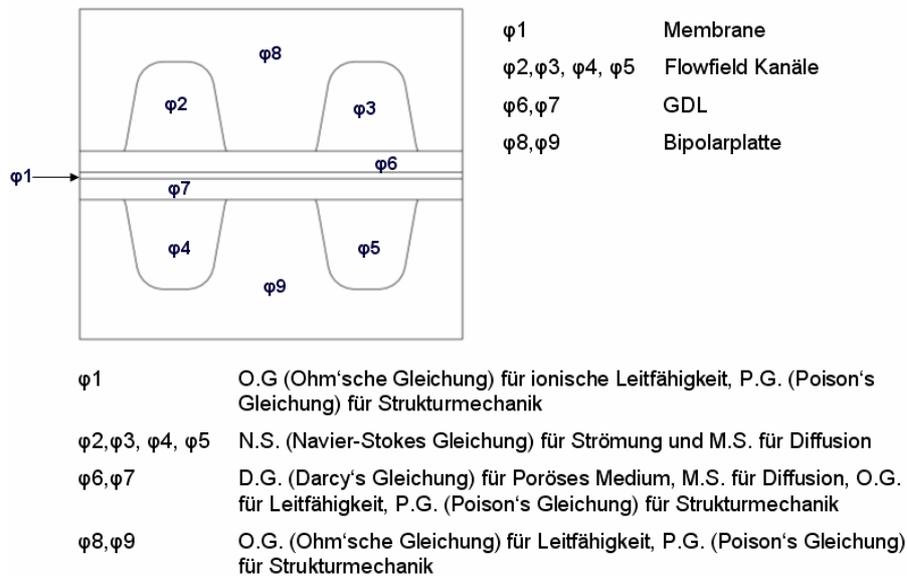


Abb. 2.40 Mathematische Modellierung der Simulationsdomäne

Der Einsatz dieser Gleichungen in den jeweiligen Domänen ist in Abbildung 2.40 dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung des gesamten Simulationsmodells erfolgt im Abschnitt 2.3.4. Für dieses Modell wurden isotherme Bedingungen angenommen.

2.3.4 Modellbau, Randbedingungen und Materialkennwerte

Das verwendete, aber erweiterte Broka-Modell weist eine sehr hohe Komplexität auf. Die Simulation eines kompletten Brennstoffzellenstacks würde enorme Rechenkapazitäten in Anspruch nehmen, die sich mit den innerhalb dieses Projektes zur Verfügung stehenden technischen Mitteln nicht bereitstellen ließen. Um mit den vorhandenen Rechnern die Aufgabenstellung bearbeiten zu können, wurde ein 3D-Schnittmodell aufgebaut, welches einen kleinen Ausschnitt des Stackes beschreibt.

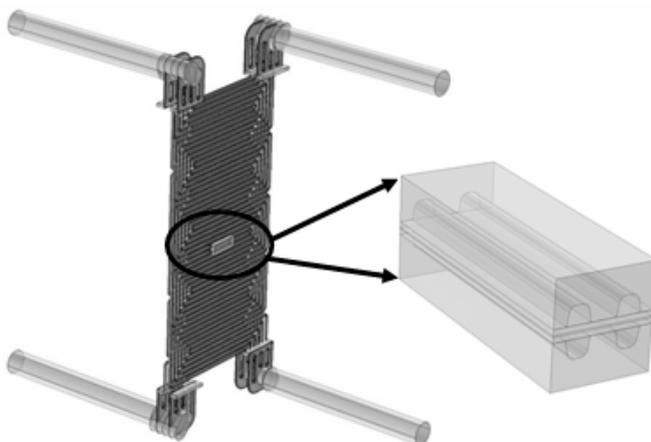


Abb. 2.41 Definition und die Geometrie des Modells

Um dieses 3D-Modell einsetzen zu können, müssen die Randbedingungen definiert werden. Dazu wurden die Strömungsprofile in den Flowfieldkanälen einer gesamten einzelnen Zelle des Stacks berechnet. Die für die Strömungssimulation benötigten Randbedingungen sind auf Grund umfangreicher Messwerte an den Standard-Brennstoffzellenstacks bekannt.

Das auf dem erweiterten Broka Modell basierende 3D-Modell wurde gemäß Abbildung 2.41 in einen kleinen Bereich der simulierten Strömungsverhältnisse eingesetzt. Das 3D-Modell umfasst zwei, im Gegenstrom betriebene parallele Kanäle, deren genaue Strömungsverhältnisse in Abbildung 2.43 dargestellt sind. Diese wurden ausgewählt, um auch die Gasdiffusion durch das GDL-Material zwischen den Kanälen analysieren zu können. Die Ergebnisse der strömungstechnischen Simulation für das ganze Flowfield können in den Abbildungen 2.42 und 2.43 angesehen werden.

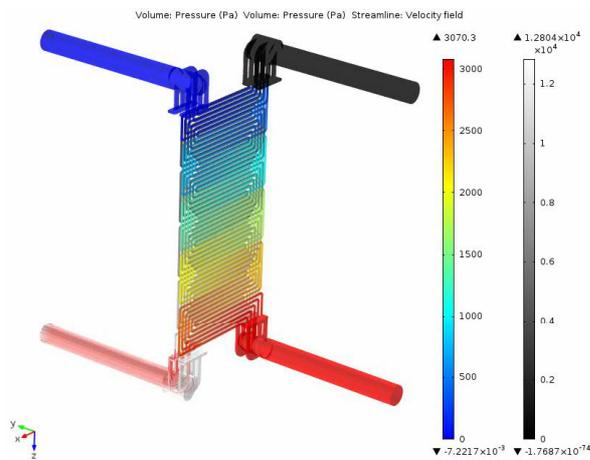


Abb. 2.42 Strömungssimulationen für Anode und Kathode

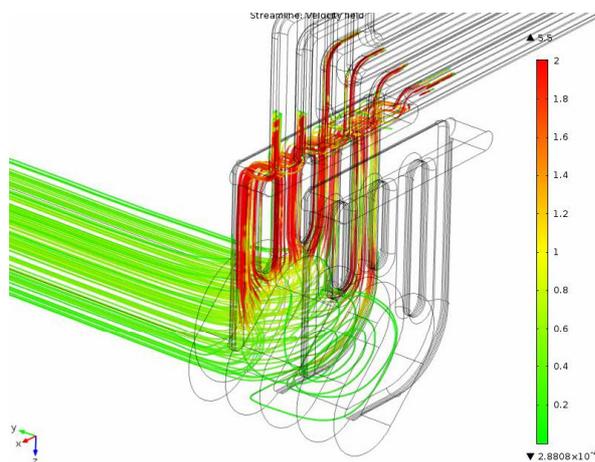


Abb. 2.43 Gaseintrittskanäle in Flowfield

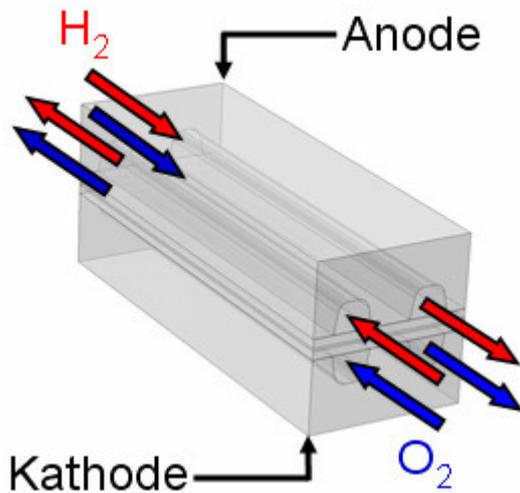


Abb. 2.44 Schnittmodell für elektrochemische Simulationen

Um mit Hilfe dieses Modells aussagekräftige Simulationen durchführen zu können, waren umfangreiche detaillierte Angaben zu Materialeigenschaften erforderlich. Diese wurden teilweise der Literatur entnommen [1, 3 - 10], zum großen Teil aber durch umfangreiche, am ZBT und ITA durchgeführte Messreihen ermittelt.

Die Konzentrationen der Betriebsmedien Wasserstoff und der in der Luft vorhandene Sauerstoff wurde auf Grund der üblicherweise in Brennstoffzellensystemen eingesetzten Stöchiometrien und unter Berücksichtigung des vorhandenen elektrochemischen Umsatzes abgeschätzt. Diese Konzentrationen wurden als Randbedingungen in das Modell eingesetzt.

Auf dem Butler-Volmer-Gesetz basierte die nach dem Broka-Modell erstellte elektrochemische Berechnung und die dazu gehörenden Gleichungen können unten angesehen werden.

Aus der Strömungssimulation des gesamten Flowfields können die erforderlichen Randbedingungen für die elektrochemische Simulation des in Abb. 2.44 dargestellten 3D-Modells ermittelt werden. Diese Randbedingungen können mit Hilfe der folgenden Gleichungen berechnet werden.

$$J_{agg,e} = -6n_e F \left(\frac{D_{agg}}{R_{agg}^2} \right) (1 - \lambda_e \coth_e) \beta_e$$

$$i_e = L_{<ct} (1 - \varepsilon_{mac}) J_{agg,e}$$

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{i_{0a} S R_{agg}^2}{2 F c_{H_2,ref} D_{agg}}}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{i_{0c} S R_{agg}^2}{4 F c_{O_2,ref} D_{agg}} \exp\left(-\frac{F}{2RT} \eta_c\right)}$$

$$\beta_a = \left[c_{H_2,ref} - c_{H_2,ref} \exp\left(\frac{-2F}{RT} \eta_a\right) \right]$$

$$\beta_c = c_{O_2,agg}$$

$$\eta_a = \phi_s - \phi_m - E_{eq,a}$$

$$\eta_c = \phi_s - \phi_m - E_{eq,c}$$

$$c_{agg,H_2} = \frac{P_{H_2} x_{H_2}}{K_{H_2}}$$

$$c_{agg,O_2} = \frac{P_{O_2} x_{O_2}}{K_{O_2}}$$

Zur Vereinfachung der elektrochemischen Simulation wurde angenommen, dass sich auf der Anode ein elektrochemisches Potential von 0V (bezogen auf Normal Wasserstoffelektrode) einstellt. Auf Grund der sehr hohen Reaktionsgeschwindigkeiten des Wasserstoffs an der Anode tritt bei einer ausreichenden Gasversorgung eine Polarisations- bzw. eine Diffusionsüberspannung nur im Bereich von wenigen mV auf. Das elektrochemische Potential auf der Kathode wurde für diese Simulationen vorgegeben. Anhand dieser Vorgabe kann, unter Berücksichtigung von Polarisations- und Diffusionsüberspannungen die Stromdichteverteilung in dem besagten 3D-Modell berechnet werden. Durch die Vorgabe unterschiedlicher Potentiale und somit Zellspannungen konnten die U-i-Kennlinien berechnet werden.

Um mit dem 3D-Modell den Einfluss der Anpresskraft analysieren zu können, wurden die erforderlichen Materialkennwerte abhängig von der Anpresskraft definiert. Die Abhängigkeit dieser Parameter von der Anpresskraft wurde durch die, in diesem Projekt am ITA bzw. ZBT vorgesehenen Messungen ermittelt und durch Literaturdaten ergänzt.

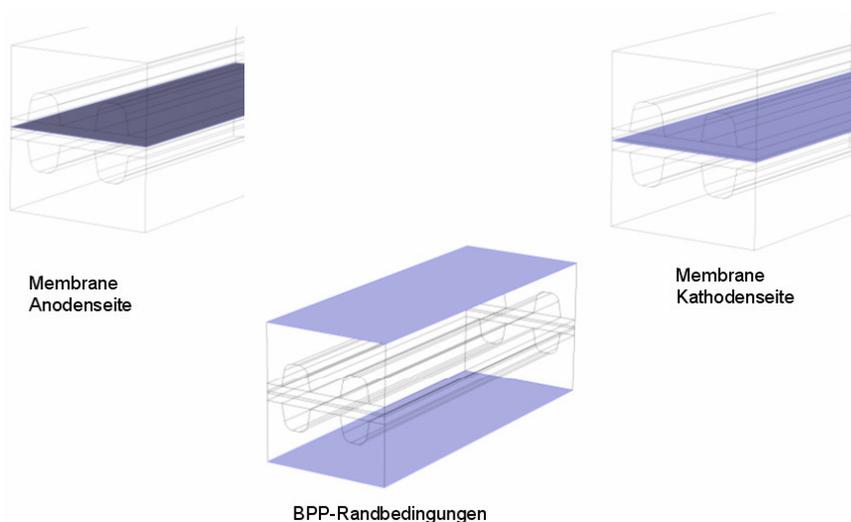


Abb. 2.45 Randbedingungen für die elektrochemische Modellierung

Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Abbildungen 2.46 – 2.51 dargestellt. Das ionische Potential der auf der Membran wird gemäß den Abbildungen in einem hohen Maße von den Stegen und Kanälen des Flowfields bestimmt (Abbildung 2.46). Prinzipiell ist die ionische Spannung auf der Membran im Bereich der Stege höher als im Bereich der Kanäle.

Durch die Druckunterschiede zwischen den benachbarten Kanälen des Flowfields wird eine Diffusion der Luft durch die GDL erzwungen. Durch diesen Stofftransport tritt eine Druckverteilung innerhalb der GDL auf. Die resultierende simulierte Druckverteilung innerhalb des 3D-Modells ist in Abbildung 2.47 dargestellt.

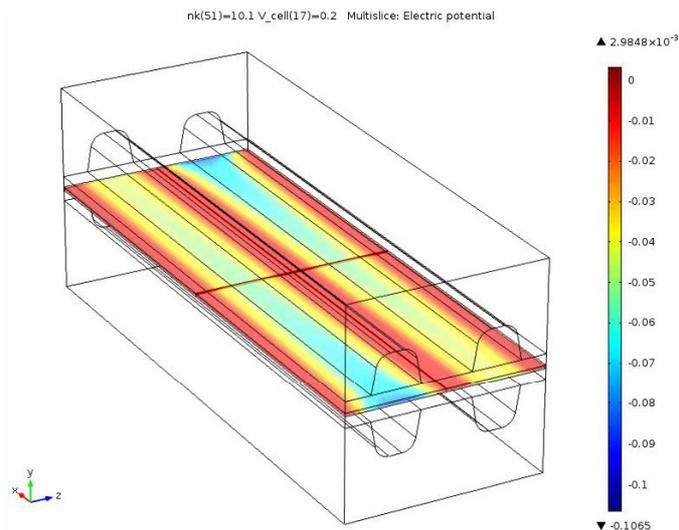


Abb. 2.46 Ionisches Potential in der Membrane, Blick auf die Kathode

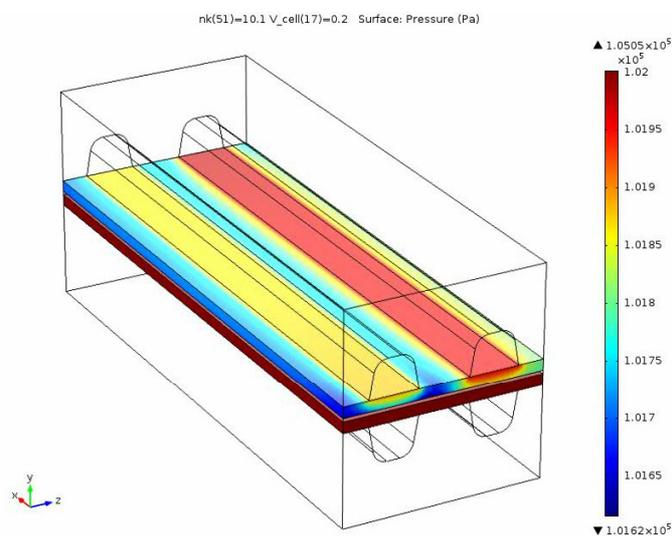


Abb. 2.47 Druckverteilung auf der GDL

Anhand der Druckverteilung in den GDLs der Anoden und Kathoden können auch die resultierenden Geschwindigkeiten der entsprechenden Medien durch die GDLs berechnet werden (Abbildung 2.48).

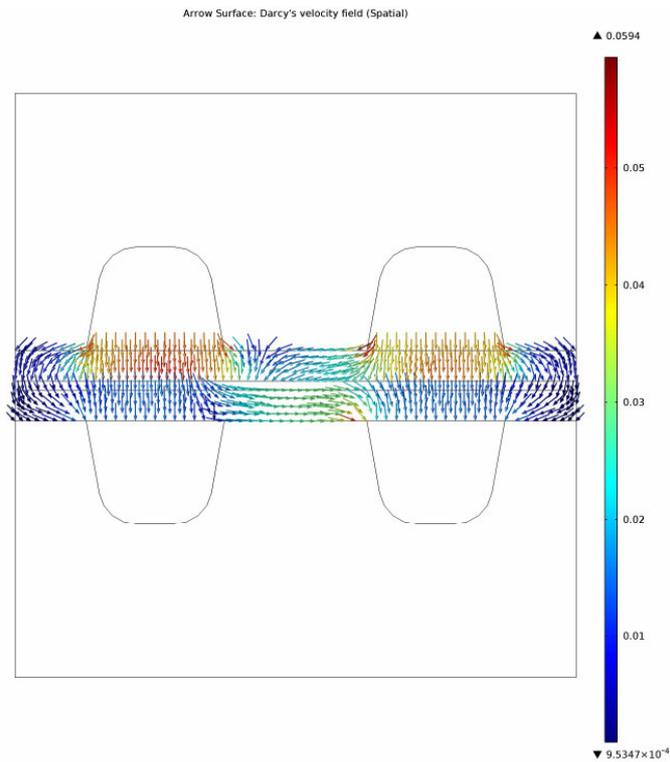


Abb. 2.48 Geschwindigkeiten der Gase (Pfeile/Vektoren) in den GDL aus der Anode bzw. der Kathode

Aus der simulierten Stromdichteverteilung und somit dem elektrochemischen Umsatz von H_2 und O_2 , zusammen mit dem simulierten Stofftransport können die Massenanteile von H_2 und O_2 auf der Anode bzw. der Kathode ermittelt werden. Diese Verteilungen der Massenanteile sind in den Abbildungen 2.49 und 2.50 für die Kathode bzw. für die Anode dargestellt.

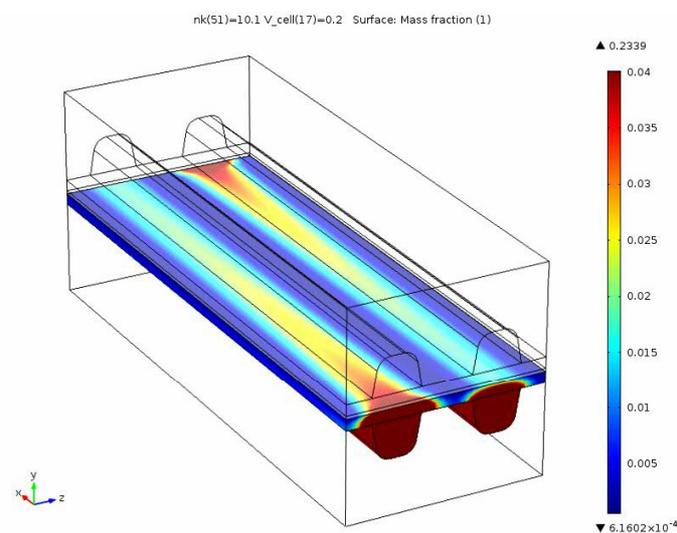


Abb. 2.49 Massenanteil des Sauerstoffs auf der Kathode

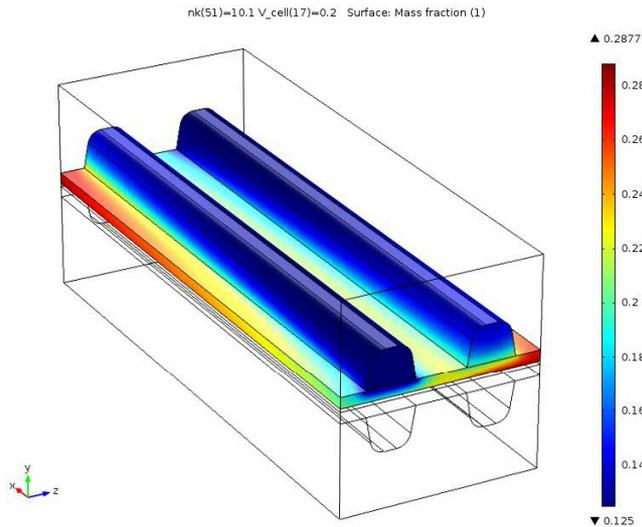


Abb. 2.50 Massenanteil des Wasserstoff auf der Anode

Die simulierten U-i-Kennlinien sind in Abbildung 2.51 dargestellt. Durch die Variation der Zellspannung bzw. dem Potential der Kathode konnten die Kennlinien berechnet werden. Durch einen Vergleich der simulierten, mit einer gemessenen Kennlinie (Abbildung 2.51) konnte die Plausibilität des Simulationsmodells aufgezeigt werden. Die Kennlinie wurde an einer Brennstoffzelle gemessen, für die die gleichen Betriebsparameter eingestellt wurden, die auch für die dargestellten, simulierten Kennlinien vorgegeben wurden.

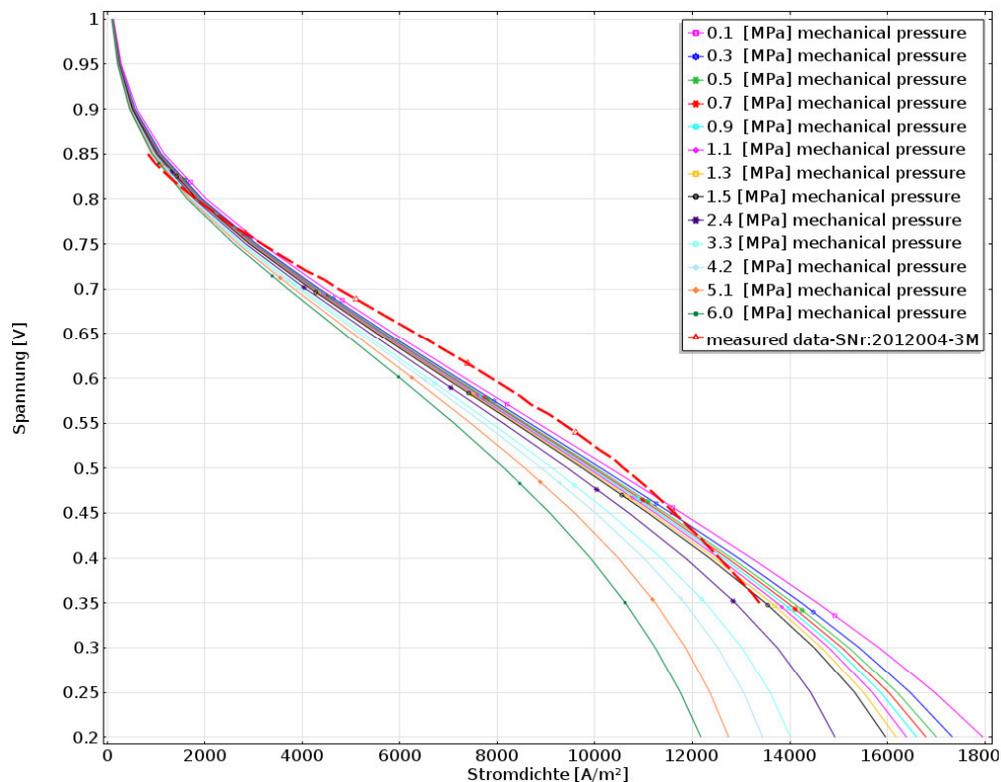


Abb. 2.51 Simulierte U-i-Kennlinie für eine einzelne PEM Brennstoffzelle bei unterschiedlichen Anpressdrücken im Vergleich mit einer gemessenen Kennlinie

2.4 (AP 9) Erstellung eines Leitfadens zur Ermittlung der optimalen Anpresskräfte

Basierend auf den bisher erstellten Simulationsmodellen konnte ein Leitfaden, d.h. eine Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Anpresskräfte in einem Brennstoffzellenstack erstellt werden. Der Leitfaden besteht aus mehreren Simulationsmodellen und Prüfschritten, die gemäß des folgenden Schemas (Abb. 2.52) abgearbeitet werden. Die entsprechenden Modelle stehen am ZBT für die Software „Comsol Multiphysics“ zur Verfügung. Diese Modelle und das Schema können an die Stackmodelle der Kunden angepasst werden. Die Berechnungen können dann als Dienstleistung am ZBT durchgeführt, oder die angepassten Modelle den Kunden überlassen werden.

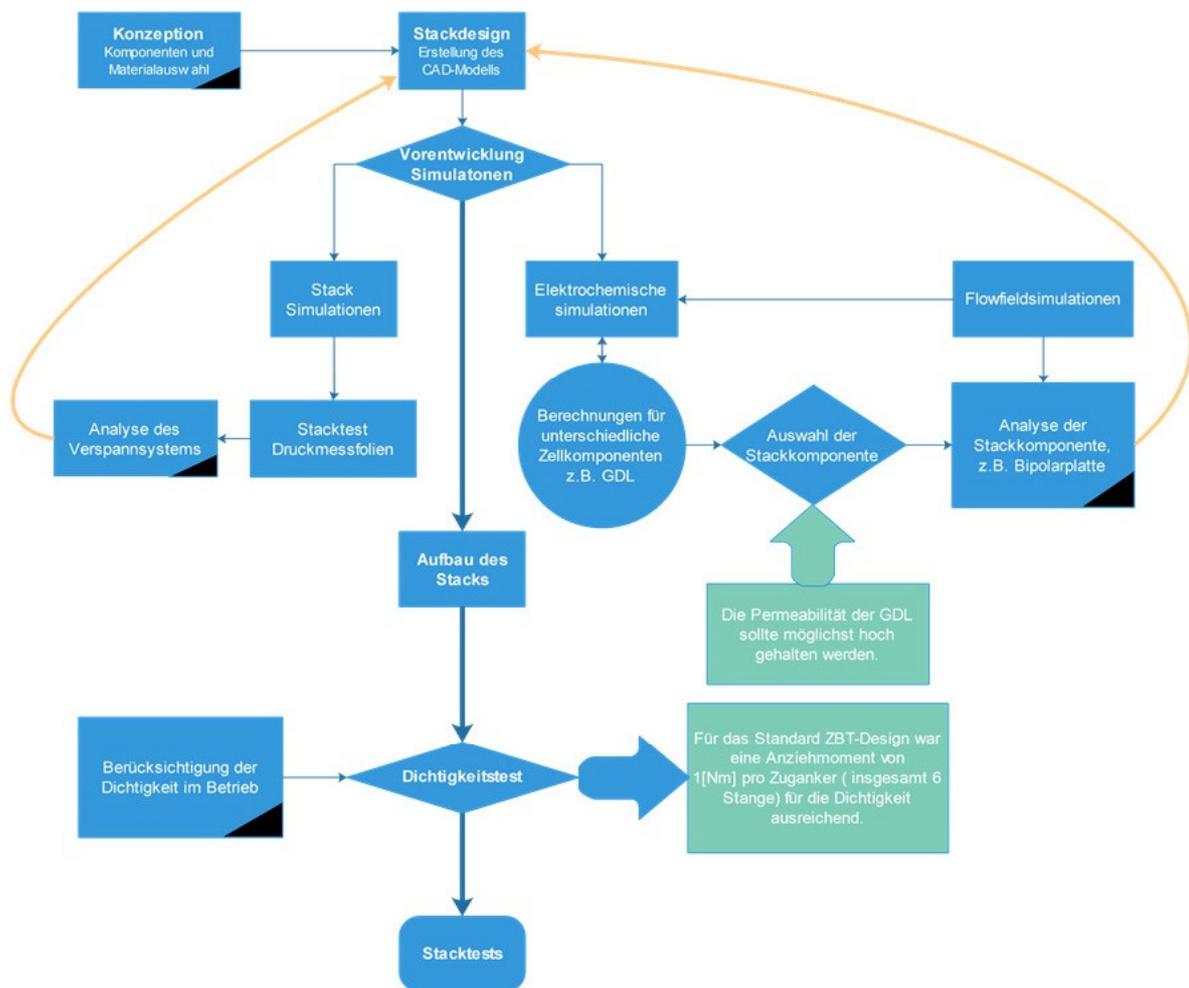


Abb. 2.52 Arbeitsschema zur Berechnung der optimalen Anpresskräfte in einem Brennstoffzellenstack gemäß des, in diesem Projekt erarbeiteten Leitfadens

Dazu wurden mehrere U-i-Kennlinien unter Vorgabe unterschiedlicher Anpresskräfte simuliert. Die Anpresskräfte haben, wie oben beschrieben, einen unmittelbaren Einfluss auf die Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten. Somit konnten die Einflüsse der einzelnen sich ändernden Parameter wie z.B. der elektrischen Leitfähigkeit, Permeabilität, ... detailliert analysiert werden.

Bei diesen Simulationen zeigte sich anhand der einzelnen U-i-Kennlinien, dass die elektrische Leistung der Brennstoffzellen mit zunehmender Anpresskraft tendenziell abnimmt. Dieser Effekt kann auf eine Verringerung der Permeabilität der GDL mit

zunehmender Verpressung zurückgeführt werden. Dabei tritt dieser Leistungsabfall bei höheren Stromdichten besonders stark zum Vorschein. Die hohe Stromstärke bedingt einen hohen elektrochemischen Umsatz, der wiederum einen hohen Stofftransport erfordert. Dieser Stofftransport wird durch die zunehmende Verpressung der GDL verlangsamt, wodurch zunehmend Diffusionsüberspannungen auftreten.

Im Gegenzug konnte durch Messungen gezeigt werden, dass insbesondere die Ohm'schen Widerstände innerhalb einer Brennstoffzelle mit zunehmenden Anpresskräften verringert werden. Die Verringerung der elektrischen Verluste fällt nur sehr gering aus und kann die stark zunehmenden, auf die Diffusionsüberspannung basierenden Verluste bei steigendem Anpressdruck bei weitem nicht kompensieren.

Mit Hilfe der Simulationsmodelle, in Verbindung mit umfangreichen Messungen konnte ein besseres Verständnis der komplexen Zusammenhänge in einem Brennstoffzellenstack erarbeitet werden. Dadurch wird eine genaue Analyse der Auswirkungen der Anpresskräfte auf die Leistungsfähigkeit des Stacks ermöglicht. Für das, als Grundlage für die in diesem Projekt durchgeführten Simulationen dienende Stack konnte für die optimale Flächenpressung eine Kraft von 3,6 kN ermittelt werden. Die optimale Kraft hängt jedoch stark vom Design des Stacks und der verwendeten Materialien ab und muss daher für jedes neue Stackdesign neu ermittelt werden.

Die Anpresskraft in einem Stack beeinflusst unmittelbar dessen Funktionalität. Zu geringe Anpresskräfte führen zu Leckagen im Stack. Wie aus den Ergebnissen des thermomechanischen Simulationsmodells abgeleitet werden kann, können diese Leckagen insbesondere bei höheren Betriebstemperaturen zum Vorschein treten.

Anhand der Simulationen und durchgeführten Messungen kann die Aussage getroffen werden, dass die optimale Anpresskraft dann erreicht wird, wenn der Stack so stark verpresst wird, bis keine Leckagen mehr auftreten. Dieses ist bei dem Modellstack dieses Projektes bei einer Kraft von 3,6 kN (Anziehungsmoment pro, als Zuganker dienende Gewindestange 1 N*m) erreicht. Für abweichende Stackdesigns muss diese Kraft anhand der Materialeigenschaften, Anzahl der Zuganker, ... neu ermittelt werden. Dieser Wert sollte nicht überschritten werden, um durch Verringerung der Permeabilität der GDLs hervorgerufene Leistungsverluste zu vermeiden.

3 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Forschungsantrages

Die Kraft, mit dem ein Brennstoffzellenstack bei der Montage zusammengepresst wird, hat einen signifikanten Einfluss auf dessen Leistungsfähigkeit. Durch eine sehr hohe Kompression wird der elektrische Kontaktwiderstand zwischen den einzelnen Komponenten, Bipolarplatten und Gasdiffusionsschichten sowie der innere Widerstand der Gasdiffusionsschichten verringert, was prinzipiell zu geringeren elektrischen Verlusten innerhalb der Zelle führt. Durch diese hohen Anpresskräfte wird jedoch auch die GDL komprimiert, dessen Porosität und somit der Gastransport durch diese Schicht nimmt ab. Durch diese Limitierung können jedoch die Katalysatorschichten der beiden GDE nicht mehr ausreichend versorgt werden und die Leistung der Brennstoffzelle wird verringert. Bei sehr geringen Anpressdrücken kehren sich die Verhältnisse um, die Gasversorgung verbessert sich, gleichzeitig nehmen jedoch die elektrischen Verluste auf Grund stark steigender Übergangswiderstände zu. Nur wenn die Stacks mit einer optimalen Kraft verspannt wurden, können diesen Stacks optimale Leistungen entnommen werden. Diese Kraft beträgt für den, dieser Arbeit als Bezugsmodell dienenden Stack etwa 3,6 kN. Für Stacks mit abweichendem Design oder anderen Materialien muss diese Kraft gemäß des, in Kap. 2.4 vorgestellten Leitfadens neu ermittelt werden.

Auf Grund komplexer Interaktionen der einzelnen Parameter wie unter anderem Spannungsverluste an Kontaktwiderständen, Gasversorgung, Elastizität der Dichtungen und unterschiedlicher thermischer Ausdehnungen der einzelnen Baugruppen konnte bisher die optimale Verspannkraft, auch bei Kenntnis der Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten, nur empirisch ermittelt werden. Um diese zeitaufwändige Optimierung bei der Entwicklung von Brennstoffzellenstacks zu verkürzen, wurde dieses Forschungsvorhaben initiiert. Das Ziel dieses Forschungsprojektes war die Erstellung eines Leitfadens, mit dessen Hilfe auf Basis der einzelnen Materialparameter die optimale Anpresskraft ein einem Stack ermittelt werden kann. Nachfolgend ist eine Gegenüberstellung der erreichten Ergebnisse mit den ursprünglichen Zielsetzungen des Forschungsantrags aufgeführt:

3.1 Zielsetzung gemäß Forschungsantrag: Modell zur Analyse der Eigenschaften textiler poröser Flächen, die außer im Brennstoffzellenbereich z.B. im Bereich der Medizintechnik oder in der Faserverbundtechnik eingesetzt werden können

Im Projekt erreichte Ergebnisse: Innerhalb dieses Projektes wurden Modelle für jede einzelne Komponente einer Brennstoffzelle erstellt. Zu diesen Komponenten zählen auch die Gasdiffusionsschichten (GDL), die poröse textile Flächen sind. Mittels dieser Modelle können die mechanischen Eigenschaften und der Gastransport durch diese Materialien auch in anderen, nicht brennstoffzellenrelevanten Anwendungen berechnet werden. Dieses Modell wurde durch praktische Messungen bezüglich des Gastransportes ergänzt.

Zielsetzung erreicht: Ja

3.2 Zielsetzung gemäß Forschungsantrag: Empfehlungen zur Auswahl der GDL nach Betriebsweise und Anwendungsgebiet der Brennstoffzelle.

Im Projekt erreichte Ergebnisse: Innerhalb dieses Projektes wurden unterschiedliche GDL-Materialien hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Ergänzend mit den Simulationsmodellen können, bei vorgegebener Betriebsweise der Brennstoffzellen die erforderlichen mechanischen Parameter der GDL Materialien ermittelt werden, indem die Materialeigenschaften der GDL als Variable in die Modelle einfließen. Durch einen Vergleich der Variablen, für die eine maximale Leistung des Stacks berechnet wird mit den Datenblättern der in Frage kommenden GDL Materialien kann das geeignete Material ermittelt werden. Das optimale Material ist dabei vom jeweiligen Stackdesign und der vorgesehenen Betriebsweise abhängig und muss individuell ermittelt werden.

Zielsetzung erreicht: Ja

3.3 Zielsetzung gemäß Forschungsantrag: Strukturmechanisches sowie thermisch gekoppeltes Modell einer Einzelzelle, welches die Kraftverteilung innerhalb von Dichtungen, GDLs, MEAs und Bipolarplatten für verschiedene Anpressdrücke abbildet. Dabei werden die Einflüsse externer Betriebsparameter (z.B. Temperatur, relativer Feuchte) auf die Kräfteverteilung bei verschiedenen Anpressdrücken berücksichtigt.

Im Projekt erreichte Ergebnisse: Es wurde ein thermomechanisches Simulationsmodell erstellt, mit dem die Kraftverteilung sowohl innerhalb einer einzelnen Brennstoffzelle als auch in einem aus 5 Einzelzellen bestehenden Brennstoffzellenstack berechnet werden kann. In diesem Modell werden die thermomechanischen Eigenschaften aller Stackkomponenten berücksichtigt. In diesem Modell kann der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen mit berücksichtigt werden. Der Einfluss der relativen Feuchte wurde bei der Implementierung der elektrochemischen Komponente des Simulationsmodells mit berücksichtigt. Bei diesem Modell wurde die sich ändernde ionische Leitfähigkeit der Membran in Abhängigkeit von der Gasfeuchte berücksichtigt.

Zielsetzung erreicht: Ja

3.4 Zielsetzung gemäß Forschungsantrag: Strukturmechanisches sowie thermisch gekoppeltes Modell eines Kurzstacks (Fünzfeller), basierend auf dem Modell für eine Einzelzelle, das die gemessene Kraftverteilung im Stack berücksichtigt.

Im Projekt erreichte Ergebnisse: Siehe Kapitel 3, Erstellen des Modells für eine Einzelzelle.

Zielsetzung erreicht: Ja

3.5 Zielsetzung gemäß Forschungsantrag: Erarbeitung eines Verfahrens zur Bestimmung optimaler Anpressdrücke.

Im Projekt erreichte Ergebnisse: Innerhalb dieses Projektes wurden Simulationsmodelle zur vollumfänglichen Berechnung von Brennstoffzellenstacks entwickelt. Mittels dieser Modelle können die elektrochemischen und thermomechanischen Eigenschaften von Brennstoffzellenstacks unter Angabe der vorgesehenen Materialien bzw. deren Materialeigenschaften und Betriebsbedingungen berechnet werden. Durch die Variation der relevanten, zu optimierenden Parameter wie z.B. Temperatur, Feuchte, ... gemäß eines Leitfadens können bei gegebenen Materialkombinationen die optimalen Betriebsparameter bzw. bei gegebenen Betriebsparametern z.B. die optimalen Anpresskräfte ermittelt werden. Dieses Verfahren ist in Kap. 2.4, Abb. 2.52 detailliert beschrieben

Zielsetzung erreicht: Ja

4 Wissenschaftlich-Technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Innerhalb dieses Projektes wurden umfangreiche Simulationsmodelle zur vollumfänglichen Simulation der elektrischen, elektrochemischen und mechanischen Eigenschaften eines Brennstoffzellenstacks erstellt. Basierend auf diesen Modellen konnte eine Anleitung erstellt werden, mit deren Hilfe anhand der leicht zu ermittelnden Materialeigenschaften der einzelnen, in einem Stack verbauten Komponenten die erforderliche Anpresskraft eines gesamten Stacks ermittelt werden kann. Umgekehrt können auch anhand dieses Modells bei einem gegebenen Stackkonzept einzelne Komponenten zielgerichteter entwickelt werden. Unmittelbar ergeben sich für die Entwickler von Brennstoffzellenstacks sowie der einzelnen Komponenten zwei wesentliche Vorteile:

- Die Zeit für die Entwicklung neuer Stacks bzw. die Überarbeitung der Stacks nach z.B. dem Austausch einzelner Komponenten kann erheblich reduziert werden. Dieses Zeitersparnis kommt dadurch zustande, dass die bisher zahlreich erforderlichen langwierigen Messreihen durch eine einfach durchzuführende Rechenvorschrift ersetzt werden können. Hierdurch können Stacks und einzelne Komponenten wesentlich schnell entwickelt und in den Markt gebracht werden.
- Durch den innerhalb dieses Projektes erstellten Leitfaden ist es möglich, den optimalen Anpressdruck eines Brennstoffzellenstacks wesentlich schneller und genauer zu bestimmen, als es die bisherige, auf Versuch und Irrtum basierende Vorgehensweise gestattet. Durch diese Optimierung kann, bei gleichen Material- und Verarbeitungskosten für den Stack sowohl eine höhere Leistungsdichte als auch eine höhere Lebensdauer der Stacks erzielt werden. Eine Steigerung der Leistungsfähigkeit der optimierten Brennstoffzellenstacks konnte experimentell bestätigt werden (Abb. 4.1). Mit diesen Verbesserungen wird es KMU ermöglicht effizientere Stacks und Komponenten für den zur Zeit stark wachsenden Markt vor allem für mobile Anwendungen konzipierter Stacks zu liefern und somit eine schnellere Marktdurchdringung dieser Systeme zu ermöglichen.

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes konnten bereits teilweise in einer zeitgleichen Entwicklung eines für die Massenproduktion von Brennstoffzellenstacks geeigneten Verspannsystems verwendet werden. Diese Entwicklung wurde bzw. wird von einem im PBA dieses Projektes vertretenen Unternehmen durchgeführt. Durch Anwendung dieser Ergebnisse konnte die Leistungsdichte der Stackes gegenüber auf herkömmlicher Weise verspannter Stackes unter Verwendung ansonsten gleicher Komponenten wie MEAs, Dichtungen und Bipolarplatten gesteigert werden. Durch diese erfolgreiche Demonstration ist von einer industriellen Anwendung auszugehen.

Für die Vermarktung des Leitfadens seitens der ITA bzw. des ZBT sind zwei Modelle vorgesehen:

- Interessierte Unternehmen können eine Lizenz für den Leitfaden erwerben und unter Verwendung der entsprechenden Modellierungssoftware selbst die optimalen Anpressdrücke bestimmen.
- Interessierte Unternehmen können die Ermittlung eines optimalen Anpressdrucks als Dienstleistung beim ZBT, auch mit messtechnischer Erfassung der erforderlichen Materialparameter in Auftrag geben.

Für beide Modelle sind marktübliche Preise vorgesehen.

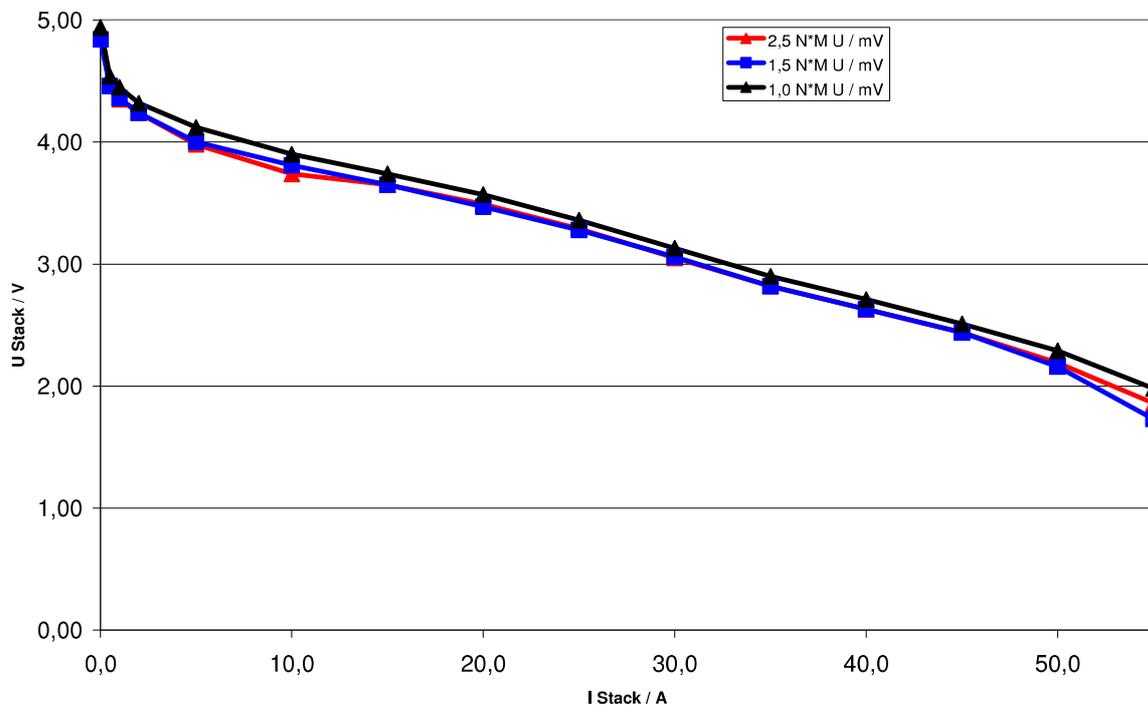


Abb. 4.1 U/I Kennlinien von 5 zelligen Stackes mit unterschiedlichen Anpresskräften. Anzugsmomente der Spannstangen von 2,5; 1,5; 1 N*m entsprechen Anpressdrücken von 0,88 MPa, 0,53 MPa, 0,35 MPa

5 Verwendung der Zuwendungen

5.1 Forschungsstelle 1 (ZBT)

Für die vom ZBT durchgeführten Arbeiten wurde Personal gemäß der folgenden Auflistung eingesetzt:

Wissenschaftliches Personal	:	25,3 Personenmonate
Technisches Personal	:	14,9 Personenmonate
Hilfskräfte	:	6 Personenmonate

Die Ausgaben für die innerhalb dieses Projektes angeschafften Geräte und Verbrauchsmaterialien beliefen sich insgesamt auf 24899€. Dieser Einsatz entspricht im vollen Umfang dem bewilligten Einzelfinanzierungsplan der Forschungsstelle und wurde in den Erläuterungen zum Einzelfinanzierungsplan begründet.

5.2 Forschungsstelle 2 (ITA)

Für die vom ITA durchgeführten Arbeiten wurde Personal gemäß der folgenden Auflistung eingesetzt:

Wissenschaftliches Personal	:	22 Personenmonate
Technisches Personal	:	8,5 Personenmonate
Hilfskräfte	:	22 Personenmonate

Seitens des ITA wurden im Rahmen dieses Projektes keine Geräte oder Materialien angeschafft.

Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter war beim ITA mit der wissenschaftlichen Betreuung des Projekts betraut. Er beschäftigte sich gemäß Bewilligungsbescheid insgesamt 22 Mannmonate mit den im Antrag dargestellten Arbeitspaketen. Sowohl wissenschaftliche Mitarbeiter als auch das übrige Fachpersonal (Laboranten 17 Monate) und die studentischen Hilfskräfte (22 Mannmonate) arbeiteten in dem in Bewilligungsbescheid festgelegten Umfang in dem Projekt. Der Personeneinsatz war angemessen und notwendig. Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

Für die zyklische Messung der elastischen und plastischen Verformung der Gasdiffusionsschichten (GDL) wurden Druckversuche bei Raumtemperatur und bei 80°C durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden in den AP 2 und AP 4 durchgeführt. Insgesamt wurde die Vorrichtung über einen Zeitraum von 20 Monaten in diesem Projekt benötigt. Eine Vorrichtung zur Durchführung der Versuche war am ITA nicht vorhanden und musste daher ausgelegt und gebaut werden. Diese Vorrichtung wurde in eine am ITA vorhandene Zugprüfmaschine integriert, erprobt und für die Prüfung der Strukturen modifiziert und eingestellt.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleisteten Arbeiten der beteiligten Forschungsstellen entsprachen denen des genehmigten Projektantrags und sind somit für die Durchführung dieses Forschungsprojektes erforderlich und angemessen.

Die zentralen Bausteine dieses Projektes stellen die Simulationsmodelle der Brennstoffzellenstacks dar. Die Entwicklung der Simulationsmodelle von sowohl der einzelnen Komponenten als auch der kompletten Systeme wurde daher zu Beginn des Projektes seitens des ZBT vorrangig bearbeitet. Die zu diesem Zeitpunkt teilweise noch ausstehenden eigenen Messwerte konnten dabei erfolgreich durch Literaturwerte ersetzt werden. Gegebenenfalls auftretende Abweichungen von den Parametern der in den für dieses Projekt verwendeten Kurzstacks führen zwar zu Abweichungen von den mit den tatsächlichen Parametern durchgeführten Simulationen, haben aber keinen Einfluss auf die Funktionalität der zu Grunde liegenden Simulationsmodelle. Die Plausibilität dieser Modelle konnte durch Vergleiche mit Literaturangaben oder mit umfangreichen Ergebnissen, die im Rahmen anderer Projekte am ZBT erarbeitet wurden, überprüft werden. Somit konnten etwaige Wartezeiten durch später als im Zeitplan angegeben durchgeführte Messungen effektiv genutzt werden.

Die im Rahmen der Charakterisierungen der einzelnen Komponenten und Kombinationen erhaltenen Messwerte wurden dazu eingesetzt, um die Aussagefähigkeit der Simulationsmodelle zu verbessern und an die verwendeten Stacks anzupassen. Die Überprüfung der Eignung dieser Simulationsmodelle um sowohl das Betriebsverhalten der Brennstoffzellenstacks wiederzugeben als auch als Grundlage für den zu erstellenden Leitfaden zu dienen, war ein Schwerpunkt der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit.

Alle Arbeiten wurden durch wissenschaftliche und technische Mitarbeiter durchgeführt, teilweise unterstützt durch studentische Hilfskräfte. Die beantragten Finanzmittel für Personalkosten wurden innerhalb dieses Projektes entsprechend der Vorgaben eingesetzt.

7 Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Zusammenstellung der Veröffentlichung

Ergebnistransfer in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitspanne
Maßnahme A: Präsentationen auf Messen und Workshop	Information von klein und mittelständigen Unternehmen über das zu entwickelnde Verfahren zur Bestimmung optimaler Anpressdrücke	A1: Poster Präsentation der Zwischenergebnisse beim Workshop „AiF Brennstoffzellen-Allianz“ A3: Präsentation des Projekts im Rahmen eines Vortrages auf der F-Cell Veröffentlichung einer kurzen Zusammenfassung dieses Projektes auf der Internetseite des ITA	03.2013 03.2014 09.2013 ab Mitte 2013
Maßnahme C: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Information der Studierenden vor Ihrem Eintritt in Berufsleben	Übernahme der Ergebnisse in die wissenschaftliche Lehre des Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik und des Institut für Textiltechnik	Ab Oktober 2012
Maßnahme D: Projektbegleitender Ausschuss	Die Forschungsergebnisse wurden im Projektbegleitenden Ausschuss ausführlich diskutiert	D1: Vorstellung des Projektes und Diskussion der vorgesehenen Arbeiten D2: Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens D3: Abschlusspräsentation und Diskussion aller erzielten Ergebnisse Einbringen der Ergebnisse in die Entwicklung eines Verspannsystems für Brennstoffzellen des PBA Mitgliedes „Scheuermann und Heilig GmbH“ (Buchen – Hainstadt)	23.10.2012 15.04.2013 11.12.2013 Ab Mitte 2013

Ergebnistransfer in die Wirtschaft nach der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitspanne
Maßnahme F: Präsentation des Leitfadens zur Bestimmung optimaler Anpressdrücke sowie der GDL Auswahlkriterien auf Messen und Workshops	Information von kleinen und mittleren Unternehmen, die Brennstoffzellen stacks herstellen oder an der Entwicklung von GDLs beteiligt sind	F1: Posterpräsentation der Ergebnisse auf dem Workshop „AiF-Brennstoffzellen-Allianz“	03.2015
		F3: Präsentation der Ergebnisse im Rahmen eines Vortrages auf der F-Cell in Stuttgart	09.2014
		F4: Präsentation des Projektes auf der ADITC	11.2014
		Präsentation der Ergebnisse dieses Projektes bei der Betriebsleitersprache der IVGT	
		F5: Präsentation dieses Projektes auf der „7th Asian Textile Conference, Coimbatore/Indien	08.2014
Maßnahme H: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Information von Studierenden vor Ihrem Eintritt ins Berufsleben	H1: Übernahme der Ergebnisse in die wissenschaftliche Lehre des Lehrstuhls für Energie- und Umwelttechnik und das Institut für Textiltechnik	Ab 05.2014
Maßnahme I: Veröffentlichung des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung optimaler Anpressdrücke	Information von, in der Brennstoffzellentechnik tätigen klein- und mittelständigen Unternehmen	I1: Erstellen einer Informationsbroschüre, die das Verfahren in Grundzügen darstellt	Ab 05.2014
		I2: Erstellung eines Leitfadens für interessierte Unternehmen	Ab 07.2014
		Unterstützung des Unternehmens „Scheuermann und Heilig GmbH“ (Buchen – Hainstadt) bei der Optimierung eines Verspannsystems für Brennstoffzellenstacks	Ab 05.2014

Insgesamt konnte bzw. werden dieses Projekt sowie die erzielten Ergebnisse einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Durch die zusätzliche Demonstration des Leitfadens durch die Optimierung eines realen Produktes kann davon ausgegangen werden, dass der Transfer der Forschungsergebnisse erfolgreich umgesetzt werden kann. Der Erwerb von Schutzrechten bzw. Patenten wurde bisher nicht durchgeführt und ist auch nicht beabsichtigt.

8 Danksagung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 434 ZN des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), Duisburg und der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. (FKT), Berlin wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Unser Dank gilt außerdem folgenden Unternehmen für die freundliche Unterstützung dieses Projektes.

- Coatema Coating Machinery GmbH
- 3M
- N₂telligent GmbH
- h-tec Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH
- Enymotion GmbH
- Proton Motor Fuel Cell GmbH
- Fuel Cell Technology
- SGL Technologies GmbH
- Ktex Knein technische Textilien
- Freudenberg FCCT GmbH
- Aixcellsys GmbH
- Scheuermann & Heilig GmbH
- Adam Opel AG

Der Abschlussbericht des Projektes 434ZN ist bei der ZBT GmbH Duisburg erhältlich.

9 Literaturverzeichnis

1. Firat, E., Beckhaus, P., Heinzl, A., Finite Element Approach for the Analysis of the Fuel Cell Internal Stress Distribution, Proceedings of Comsol Conference in Stuttgart, 2011
2. Grimm, T., Fertigungs- und funktionstechnische Optimierung von Brennstoffzellen-Endplatten auf Basis der Ermittlung mechanischer Druckverteilungen im Zellstapel unter Nutzung digitaler Folienmesstechnik, Diplomarbeit, 2009
3. Broka, K., Ekdung, P., J. Appl. Electrochem, 27, 281, (1997)
4. Comsol Batteries & Fuel Cell Module Model Library Manual, COMSOL Multiphysics® (4.3. b), (2013)
5. Wang, X., Shi, Z., Comparison of Darcy's Law, the Brinkman Equation, the Modified N-S Equation and the Pure Diffusion Equation in PEM Fuel Cell Modeling, Proceedings of Comsol Conference in Boston, 2007
6. Lum, W. K., McGuirk, J. J., Three-dimensional model of a complete polymer electrolyte membrane fuel cell-model formulation, validation and parametric studies, J. Power Sources, 143, 103-124, 2005
7. Hottinen, T., Himanen, O., Karvonen, S., Nitta, I., Inhomogenous compression of PEMFC gas diffusion layer Part II. Modeling the effect, J. Power Sources, 171, 113-121, 2007
8. Nitta, I., Hottinen, T., Himanen, O., Mikkola, M., Inhomogeneous compression of PEMFC gas diffusion layer Part I. Experimental, J. Power Sources, 171, 26-36, 2007
9. Feser, J.P., Prasad, A.K., Advani, S.G., Experimental characterization of in-plane permeability of gas diffusion layers, J. Power Sources, 162, 1226-1231, 2006
10. Goulet, M.A., Khorasany, M.H., De Torres, C., Lauritzen, M., Kjeang, E., Mechanical properties of catalyst coated membranes for fuel cells, J. Power Sources, 234, 38-47, 2013-02-19
11. Cindrella, L., Kannana A. M., Lina, J. F., Saminathana, K., Hoc, Y., Lind, C. W., Wertze, J., Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells—A review, Journal of Power Sources, (2009), 194, 146–160
12. Sehkyu Park, Jong-Won Lee, Branko N. Popov, A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs, International journal of hydrogen energy, (2012), 37 5850-5865
13. Schmittinger, W., Vahidi, A., A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells, J. Power Source (2008), 180, 1 1-14

14. Jiabin Ge, Andrew Higier, Hongtan Liu, Effect of gas diffusion layer compression on PEM fuel cell performance, *Journal of Power Sources* 159 (2006) 922–927
15. Jui-Hsiang Lin, Wei-Hung Chen, Yen-Ju Su, Tse-Hao Ko, Effect of gas diffusion layer compression on the performance in a proton exchange membrane fuel cell, *Fuel* 87 (2008) 2420–2424
16. Mao, N., Russell, S. J., & Pourdeyhimi, B., Characterisation, testing and modelling of nonwoven fabrics, *Handbook of nonwovens*, (2007), 401-514
17. Radhakrishnan, A. Thermal conductivity measurement of gas diffusion layer used in PEMFC, (2009).
18. Niebel, V. Systematische Entwicklung sensorbasierter Online Qualitätsüberwachung für Schweißverfahren von Textilien, (2013) Shaker

10 Unterschriften

Forschungsstelle 1 (ZBT)

Projektleiter FS1

Zentrum für Brennstoffzellen Technik

ZBT GmbH

Ort, Datum

Dr. Burghard Lutter
Name und Unterschrift des Projektleiters

Forschungsstelle 2 (ITA)

Projektleiterin FS2

Institut für Textiltechnik
der RWTH Aachen

Ort, Datum

M.Sc. Sangeetha Ramaswamy
Name und Unterschrift der Projektleiterin