

## NEUE ENERGIEN 2020

### Publizierbarer Endbericht – INDEX

**Programmsteuerung:** Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:** Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung

- Entwicklung optimierter Betriebsstrategien zur Lebensdauererlängerung von Brennstoffzellen
- Verbesserte empirische Beschreibung der Mechanismen von Degradation zur Erstellung und Optimierung von entsprechenden Rechenmodellen und Simulationssoftware
- Entwicklung einer „gradientenfreien Zelle“ als Referenzobjekt zur standardisierten Bewertung von Komponentenuntersuchungen
- Integration der Ergebnisse in ein Softwaremodul zur Simulation

### 1.2 Schwerpunkte des Projektes

- Entwicklung fortgeschrittener Betriebsstrategien, Untersuchung von Start-/Stopp-Zyklen
- Weiterführende Untersuchungen zur Membranschädigung und Materialoptimierung
- Entwicklung einer „gradientenfreien Zelle“ als Standard-Referenz
- Untersuchung des Wasserhaushalts in der Brennstoffzelle
- Modellbildung und Simulation der Flüssigphase in einer Brennstoffzelle.

### 1.3 Einordnung in das Programm

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Industrielle Forschung

Fortgeschrittene Speicher- und Umwandlungstechnologien

### 1.4 Verwendete Methoden

- **Gradientenfreie Zelle / Referenzzelle**

Mit Hilfe von Simulationen und Berechnungen wurde eine Brennstoffzelle konstruiert, die nur kleine Gradienten in der Strömungsgeschwindigkeit, Gasverteilung, Wasserverteilung, Wärmeverteilung und Druckverteilungen aufweist. Diese „gradientenfreie Zelle“ wurde gefertigt und mit den Standardmethoden zur Charakterisierung, wie Elektrochemische Impedanzspektroskopie und Strom-Spannungskennlinien, charakterisiert.

- **Betriebsstrategien / Abschaltstrategien**

Zur Entwicklung von Betriebsstrategien, welche Schädigungen verringern können, wurden Grundlagenuntersuchungen in Form von Start-Stopp-Versuchen durchgeführt und die gewonnenen Erkenntnisse durch Modellierung auf andere Zelldesigns übertragen.

Um die Auswirkungen der Start–Stopp Untersuchungen zu bestimmen wurden Brennstoffzellen vor und nach Start-Stopp Prozeduren charakterisiert. Dazu wurden Polarisationskurven, Impedanz-spektrern aufgenommen, Zyklische Voltametrie durchgeführt und die Abgase analysiert.

- **Untersuchung/Minimierung der Membrandegradation**

Für die Membranschädigungsversuche wurden die zu untersuchenden Membran-Elektroden-Einheiten über 1000 Stunden in mehreren Standard-Brennstoffzellen parallel betrieben. Zusätzlich erfolgte die Untersuchung der Membranschädigung in der gradientenfreien Zelle zur Standardisierung der Messergebnisse und zur Materialcharakterisierung. Folgende Parameter wurden variiert: Materialien der Membran-Elektroden-Einheit, Stromdichte bzw. Zellspannung, Befeuchtung der Reaktionsgase, Überdruck der Reaktionsgase, Zelltemperatur. Die Untersuchungen der Membran-Elektroden-Einheit erfolgten durch: Erfassung der Zellspannung, Erfassung der Stromdichte-Spannungskennlinien bzw. Leistungskennlinien, Bestimmung der Wasserstoffdiffusions-Stromdichte zur Erfassung von Löchern (Pinholes) in der Membran, Elektrochemische Impedanzspektroskopie zur Bestimmung der Widerstände von Membran und Elektroden, Quantitative Fluoridionen-Analyse der Elektrodenkondensate zur Erfassung der Fluoridionen-Freisetzungsrates, Raster-Elektronen-Mikroskopie zur Erfassung von Membran- und Katalysatorschäden und zur Bestimmung der Membrandicke.

- **Wassermanagement**

Zur Validierung der Simulationsergebnissen sind in-situ Untersuchungen unter realen Bedingungen während des Betriebs der Brennstoffzelle notwendig. Mehrere Forschungsgruppen haben dazu Brennstoffzellen mit optisch transparenten Materialien verwendet. Durch den Ersatz von Standardmaterialien kommt es aber zu einer deutlichen Änderung der physikalischen Eigenschaften und damit zur Beeinflussung der Testergebnisse. In diesem Projekt wurde für die Untersuchung der Brennstoffzelle unter realen Bedingungen mit Standardmaterialien als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode die Neutronenradiographie ausgewählt. Diese Untersuchungen wurden am Atominstytut der österreichischen Universitäten in Wien mit einem transportablen Brennstoffzellenteststand vorgenommen.

- **Modellierung / Simulation**

Für eine 3D-CFD Simulation, bei der der Fokus auf Wasserbildung und –transport gesetzt wird, werden die folgenden Methoden gewählt: Euler-Euler Methode und Volume-of-Fluid (VOF) Methode. Eine dreidimensionale Modellierung der Brennstoffzellen unter Berücksichtigung der Zweiphasenströmung mit freien Oberflächen in den Gaskanälen wurde im Programm FIRE erstellt.

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Die Identifizierung der Schädigungsmechanismen im Brennstoffzellenbetrieb diente als Grundlage für eine Modellbildung. Die aus den Schädigungsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse und Daten wurden in Modelle und in eine Brennstoffzellen-Simulationssoftware integriert, welche zur Optimierung der Betriebsstrategie und zur Lebensdauervorhersage der Membran-Elektroden-Einheit angewendet wird. Mit der Durchführung von Testserien mit Brennstoffzellen mit 25 cm<sup>2</sup> aktiver Fläche und mäanderförmigen Gaskanälen unter realen Betriebsbedingungen wurde der Einfluss der

Betriebsparameter auf die Lebensdauer und den optimalen Betriebsbereich der Brennstoffzelle untersucht. Die Konstruktion der Testzellen ermöglichte unter der Verwendung geeigneter Software den Erhalt von skalierbaren Ergebnissen. Weiters wurde zur Materialcharakterisierung eine gradientenfreie Testzelle entwickelt und betrieben.

## 2 Inhaltliche Darstellung

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes war die Erarbeitung innovativer Betriebsstrategien für Brennstoffzellen, um lebensdauerverkürzende Betriebszustände soweit als möglich zu eliminieren, sowie die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Dazu mussten die Mechanismen, die zur Schädigung und Funktionsstörung der Brennstoffzelle führen können, möglichst genau identifiziert werden. Die Erkenntnisse wurden in Modelle umgesetzt und in eine Brennstoffzellensimulationssoftware integriert. Dadurch war es möglich, die Betriebsstrategie auf das jeweilige Einsatzgebiet zu optimieren. Diese systemische, auf optimierte Steuerung des Gesamtsystems Brennstoffzelle abzielende Herangehensweise stellte gegenüber der laufenden Optimierung von Komponenten einen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zur Verbesserung der Gesamteffizienz und der Lebensdauer dar.

Um die Mechanismen der Degradation zu bestimmen, war es notwendig, umfangreiche Testserien durchzuführen, im Besonderen Langzeittests und Start/Stop-Zyklen und Membranschädigungsversuche durch den Dauerbetrieb von Brennstoffzellen. Aus den Ergebnissen dieser Versuche wurden anschließend geeignete (Rechen-)Modelle erstellt, die schließlich in eine Brennstoffzellen-Simulationssoftware integriert wurden. Die damit geschaffene Möglichkeit einer möglichst realitätsgetreuen Simulation von Vorgängen in der Brennstoffzelle stellt im Hinblick auf das Design von neuen Brennstoffzellen nicht nur eine äußerst nützliche Innovation dar, sondern erlaubt aller Voraussicht nach wesentlich schnellere Entwicklungszyklen und damit kürzere Markteinführungszeiten.

Zusätzlich zu den Versuchen mit Standardzellen, an denen der reale Betrieb von Brennstoffzellen simuliert wird, wurde die sogenannte „gradientenfreie Zelle“ entwickelt, die durch homogene und reproduzierbare Betriebseigenschaften (annähernd gleichmäßige Verteilung der Gasströme und chemischen Reaktionen über das „Flow Field“) eine gezielte und nicht von lokalen Effekten beeinflusste Untersuchung einzelnen Komponenten ermöglicht. Durch diese Referenzzelle soll und wird die Entwicklung und Optimierung von Brennstoffzellenkomponenten um eine wertvolle Möglichkeit bereichert, da ein Vergleich von verschiedenen Komponenten erst dadurch ohne verfälschende Einflüsse möglich wird, und so Fehlinterpretationen und falsche Schlussfolgerungen weitgehend vermieden werden können.

## 3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### 3.1 Gradientenfreie Zelle

Beim Design dieser Zelle wurde auf mäanderförmige Strömungskanäle, wie sie in Standardzellen Verwendung finden, verzichtet. Dadurch kann der Druckabfall innerhalb der Kanäle vermindert werden.

# Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zur Beruhigung der strömenden Gase wurde der An- und Abströmbereich der geraden Kanäle inaktiv gestaltet (siehe Abbildung 1). Die aktive Fläche in der Mitte des Flow-Fields beträgt  $7\text{ cm}^2$ . Der geringe Gradient der Gaskonzentration entlang des Strömungskanals wird durch stark erhöhte Durchflüsse von  $\text{H}_2$  auf der Anodenseite und Luft auf der Kathodenseite erreicht. Durch die Wahl von größeren Kanalquerschnitten wurde erreicht, dass die resultierenden Reynoldszahlen im Bereich derer von Standardzellen liegen. Es wurden zwei Konzepte mit unterschiedlichen Kanalformen verfolgt und evaluiert.

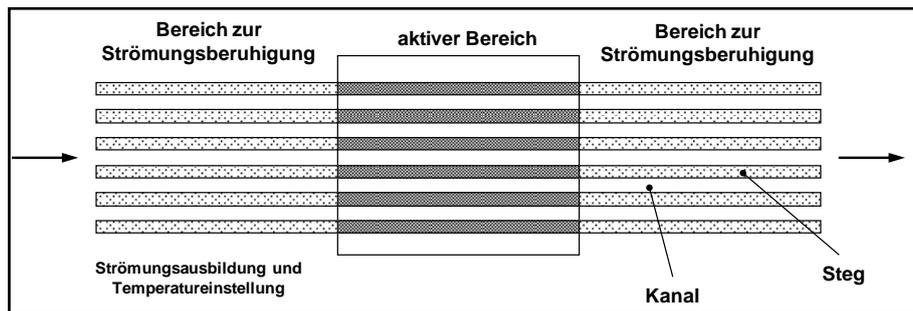


Abbildung 1: Konzept des Flow-Fields der gradientenfreien Zelle

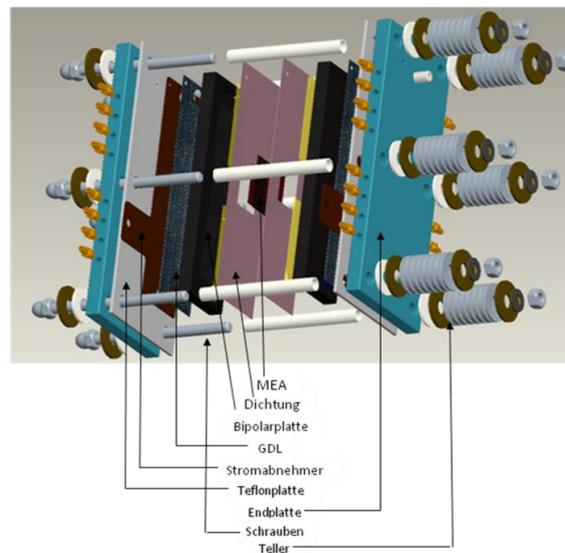


Abbildung 2: Entwickelte Testzelle

Eine Herausforderung stellte die Abdichtung der inaktiven Bereiche der Zelle dar, da die Dichtung in die Kanäle gedrückt wurde. Die MEA erstreckte sich über den gesamten Bereich des Flow-Fields um einen konstanten Anpressdruck zu gewährleisten während die Gasdiffusionsschicht sich nur im aktiven Bereich der Zelle befand (Abbildung 2).

Für die Charakterisierung der beiden Testzellen wurden Referenzbedingungen definiert, und davon ausgehend jeweils ein Betriebsparameter variiert. Folgende Betriebsparameter (Referenz ist fett markiert) wurden dabei für die beiden unterschiedlichen Zeldesigns variiert:

Versorgungsgase	<b>Wasserstoff, Luft (Gegenstrombetrieb)</b>
Zelltemperatur	25°C, 70°C, 90°C
Anpressdruck $p_{Anpress}$	(8,5, 10, 11,5, 13) bar
relative Feuchtigkeit $r.H_{A,K}$	<b>90%</b> , 70%, 50%, 30%
Luftstöchiometrie $\lambda_{Luft}$	1.0, 1.5, 2.0, <b>2.2</b> , 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
Wasserstoffstöchiometrie $\lambda_{H_2}$	0.5, 1.0, <b>1.5</b> , 2.0, 2.5
Druck am Auslass $p_{A,K}$	<b>(0, 0.3, 0.6)</b> bar(ü)

Nach jeder Variation eines Betriebsparameters wurde die Brennstoffzelle mittels einer EIS-Messung (für Lastströme: 50mA, 100mA, 200mA) und einer Polarisationskurve charakterisiert.

**Abbildung 3** zeigt Messergebnisse für das Zelldesign „Version 1“ und die Variation der Befeuchtung.

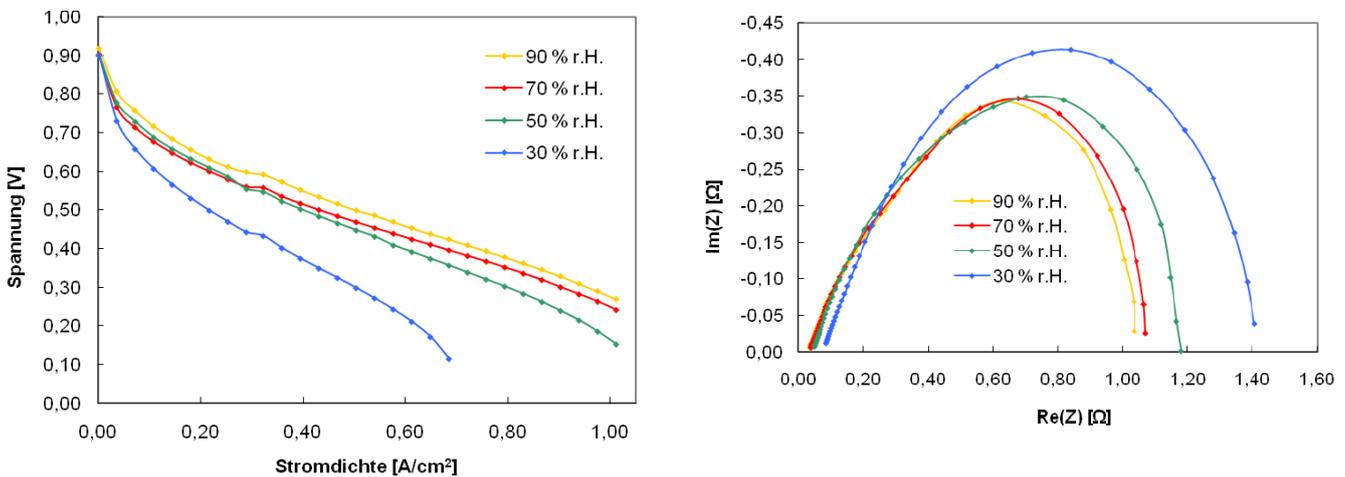


Abbildung 3: Vergleich unterschiedlicher relativer Feuchtigkeit; Links: Polarisationskurven; Rechts: Nyquistdiagramme

## 3.2 Abschaltstrategien

Um das Schädigungspotential von Start-Stopp-Zyklen zu untersuchen, wurden in diesem Teil Messserien (aktive Fläche 25 cm², segmentiert) durchgeführt (Abbildung 4), die Start-Stopp Zyklen simulieren, während gleichzeitig das Abgas (CO, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>) analysiert wurde (Abbildung 5). Nach 3 und 6 Start-Stopp-Zyklen wurden jeweils elektrochemische Charakterisierungen (UI-Kennlinie, Zyklischer Voltammetrie, Diffusionsstrommessung) durchgeführt.

# Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

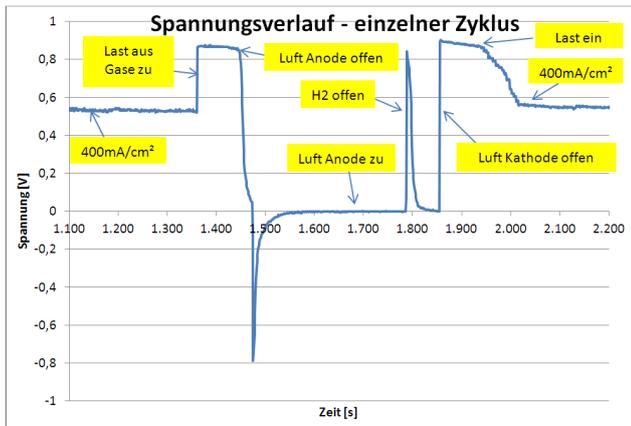


Abbildung 4: Spannungsverlauf eines Stopp-Start-Zyklus

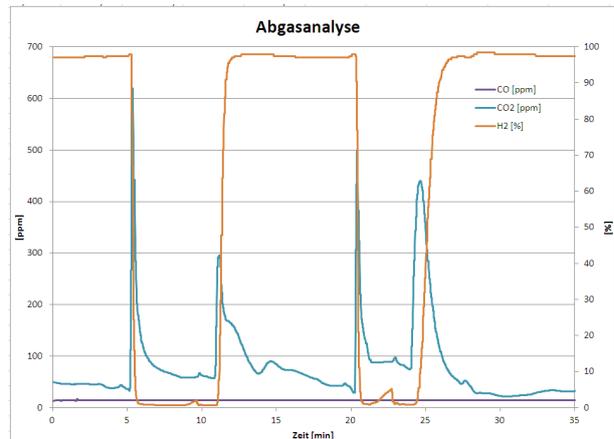


Abbildung 5: Abgasanalyse während eines Stopp-Start-Zyklus

Während die UI-Kennlinie nur eine relativ geringe Änderung der Spannung bei einem festgelegten Strom für verschiedene Zyklen bewirkte, sind bei der Diffusionsstrommessung bereits deutliche Unterschiede zu erkennen, die auf ein Pinhole bzw. einer Durchlässigkeit der Membran um das Segment Nr. 27 der segmentierten Zelle schließen lassen (Abbildung 6).

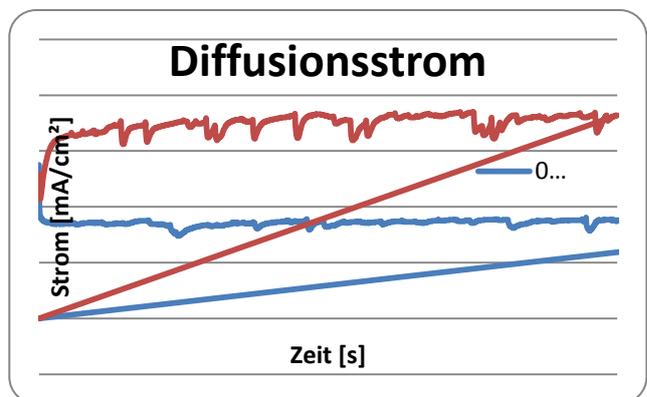
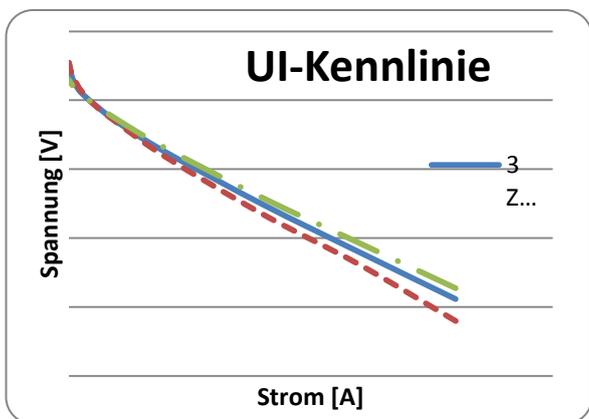


Abbildung 6: Links: UI-Kennlinien; Rechts: Diffusionsstrommessung

Die Schädigung der Membran-Elektroden-Einheit ist bereits nach wenigen Start-Stopp-Zyklen deutlich zu erkennen und kann nur durch eine Verhinderung der Anwesenheit von Sauerstoff (überwiegend schädlich auf der Anodenseite – siehe auch 3.3) hintangehalten werden.

### 3.3 Membrandegradation

Der chemische Abbau des Ionomers erfolgt durch Wasserstoffperoxid-Radikale. Hohe Zellspannungen bieten günstige Bedingung für die Peroxidbildung, da hierbei an der Anode sehr niedrige Potentiale herrschen, bei denen das Wasserstoffperoxid nicht zu Wasser reduziert wird. Es konnten Betriebsbedingungen (Temperatur, Gasüberdruck und Gasbefeuchtung) mit deutlich schädigendem Einfluss auf die Membran eruiert werden.

Für die Membranschädigungsversuche wurden die untersuchenden Membran-Elektroden-Einheiten bis über 1000 Stunden in mehreren Standard-Brennstoffzellen in Serie geschaltet, gleichzeitig betrieben.

# Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Alle 4 Messreihen wurden mit vier Zellen mit einer aktiven Fläche von jeweils 25 cm<sup>2</sup> durchgeführt. Die Zellen waren mit einer kommerziell erhältlichen Membran-Elektroden-Einheit bestückt. Es handelte sich dabei um Perfluorcarbonmembranen mit funktionellen Sulfonsäuregruppen, PTFE-verstärkt und einer Membrandicke von 35 µm (Pt-Beladung an Anode 0,4 mg cm<sup>-2</sup>; Pt-Beladung an der Kathode 0,6 mg cm<sup>-2</sup>; Katalysatorträger war graphitisierter Ruß)

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Charakterisierungsmethoden wurde im Abstand von sieben Tagen der laufende Membranschädigungsversuch unterbrochen, um die Zellen im Teststand zu charakterisieren. Dabei wurden stets das gleiche Messschema und die gleichen Messbedingungen eingehalten. Es wurden folgende Messmethoden angewandt:

- Zellspannung
- Stromdichte-Spannungskennlinie
- Fluoridionenselektive Analyse des Elektrodenkondensats
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie
- Wasserstoffdiffusionsstrom-Messung
- Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Für die Messungen wurden die Parameter laut Tabelle 1 variiert und die Auswirkungen dieser Bedingungen auf die Membranlebensdauer ermittelt.

**Tabelle 1: Versuchsparameter für die Untersuchungen zur Membrandegradation**

	Versuchsreihe	Befeuchtung [% rH]	Temperatur [°C]	Gasüberdruck [bar]	Stromdichte [mA cm <sup>-2</sup> ]
R1	Standard	90	90	0.1	90
R2	niedrige Befeuchtung	30	90	0.1	90
R3	45 mA, 60% rH	60	90	0.1	45
R4	hoher Druck	90	90	0.5	90

Bei einer defekten Membran ist der Strom bei einer Wasserstoff-Diffusionsstrommessung nicht durch den Transport der Wasserstoffmoleküle begrenzt und steigt nahezu linear zur angelegten Spannung an. Dies lässt Rückschlüsse auf Pinholes zu. Unter hohem Druck konnten am frühesten Pinholes festgestellt (Abbildung 7) werden. Unter 45 mA cm<sup>-2</sup> und 60 % rH wurde etwas früher ein Pinhole detektiert als unter Standardbedingungen (90 mA cm<sup>-2</sup> und 90 % rH).

# Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

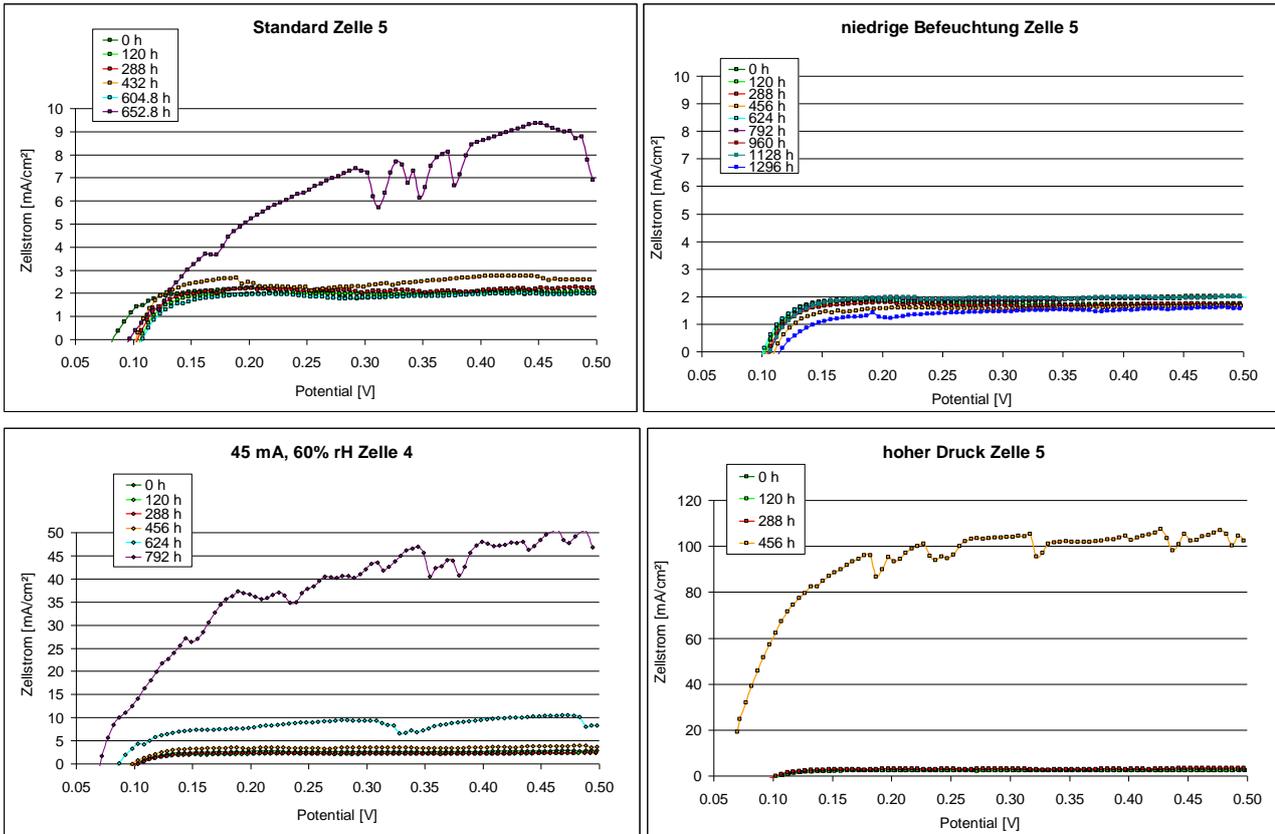


Abbildung 7: Wöchentliche Diffusionsstrommessungen der Referenzzelle aus den Reihen Standard, niedrige Befeuchtung, 45 mA, 60% rH und hoher Druck

Die berechneten Intervalle der Lebensdauer aus den Werten der Referenzzellen und den Mittelwerten aller Zellen sind zum Teil sehr unterschiedlich (Abbildung 8).

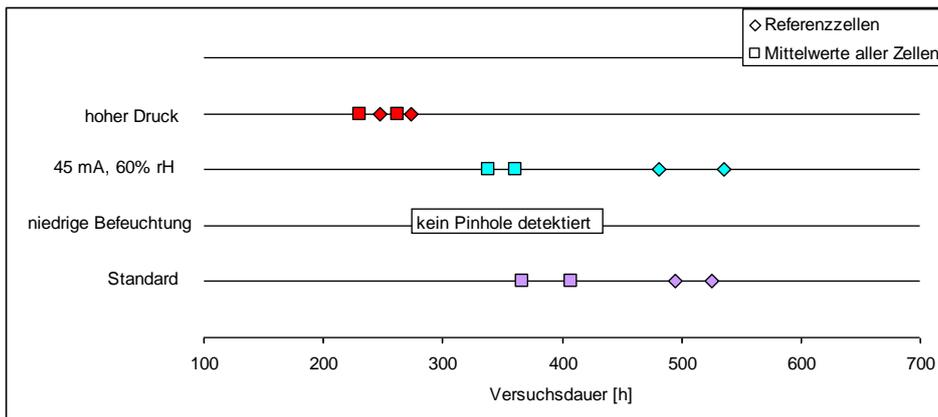


Abbildung 8: Darstellung der Lebensdauerintervalle der Membranen aller Versuchsreihen

## 3.4 Wasserhaushalt

Das Messprinzip des Neutronenradiographen für Szintillatormessungen (zeitliche Auflösung ca. 6 min, räumliche Auflösung 150 µm) ist in Abbildung 9 dargestellt. Für Aufnahmen mit einer Imaging Plate IP

# Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

(zeitliche Auflösung 40 min, räumliche Auflösung 50 µm) wird diese vor dem Szintillator positioniert und kann nach der Messung mit einem Lesegerät ausgelesen werden.

Für die Messungen am Atominstitut Wien wurde ein mobiler Teststand (Abbildung 10) gebaut, wobei für die Gaszuführungen zur Messzelle (4 m) elektrische Heizschläuche verwendet wurden.

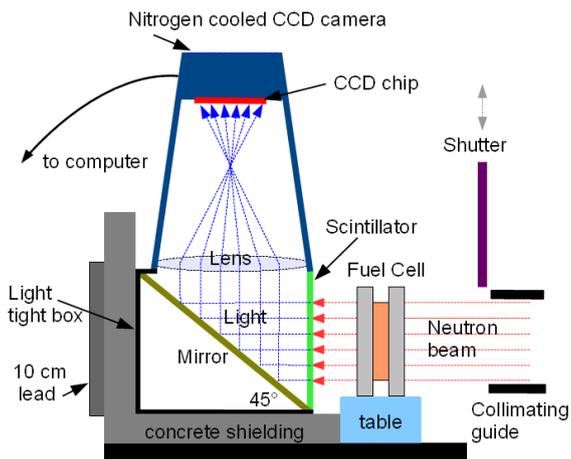


Abbildung 9: Messprinzip für Messungen mit dem Szintillator



Abbildung 10: Mobiler Brennstoffzellenteststand

Es wurden 2 Messerien mit einer Brennstoffzelle (5 cm<sup>2</sup> aktive Fläche) mit serpentin-förmigen Flowfield durchgeführt bei der jeweils die relative Befeuchtung der Versorgungsgase (synth. Luft und Wasserstoff) (30%, 90%) und der Laststrom (0A, 2A, 6A, 8.5A) variiert wurden. Es wurde jeweils eine Szintillatormessung (Belichtungszeit 500 s) und eine Imaging-Plate Messung (Belichtungszeit 40 min) durchgeführt.

In Abbildung 11 ist ein Neutronenradiographiebild mit dem Intensitätsverlauf dargestellt. Man erkennt gut die Bereiche der Kanäle und Stege in der Brennstoffzelle.

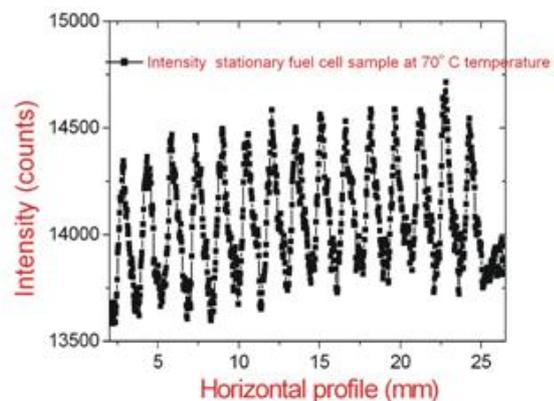
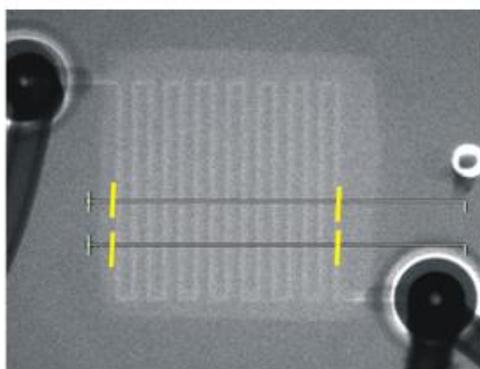


Abbildung 11: Links: Neutronenradiographiebild (IP-ND 135 µm Gd), 0A Laststrom  
Rechts: dazugehörige Intensität des Neutronenstrahls

# Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In Abbildung 12 werden die Auswirkungen von 2 verschiedenen Lastströmen miteinander verglichen. Man erkennt einen Intensitätsanstieg von der Gasauslassseite zur Gaseinlassseite der Kathode, was auf mehr flüssigem Wasser beim Auslass als beim Einlass hindeutet. In Abbildung 13 wird der absolute Wassermassenanteil für ein Probevolumen bei einem Laststrom von 6A und einer Befeuchtung von 90% dargestellt.

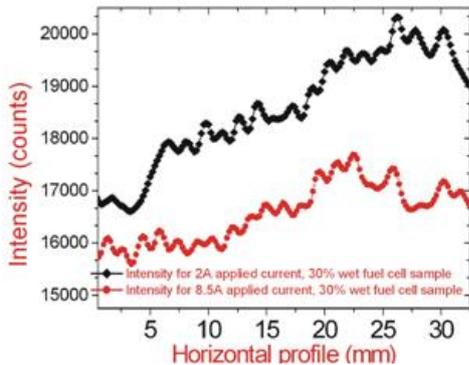


Abbildung 12: Vergleich der Neutronenstrahlintensität bei Lastströmen 2A und 6A, 30% relative Befeuchtung

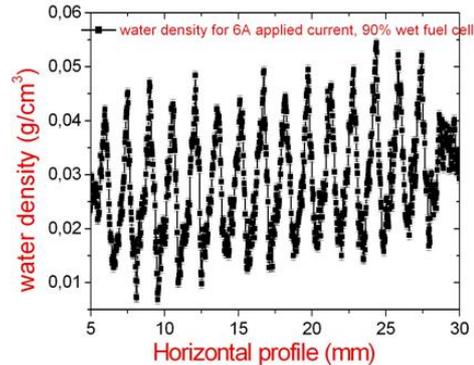


Abbildung 13: Wasseranteil für ein Probevolumen bei einem Laststrom von 6A, 90% Befeuchtung

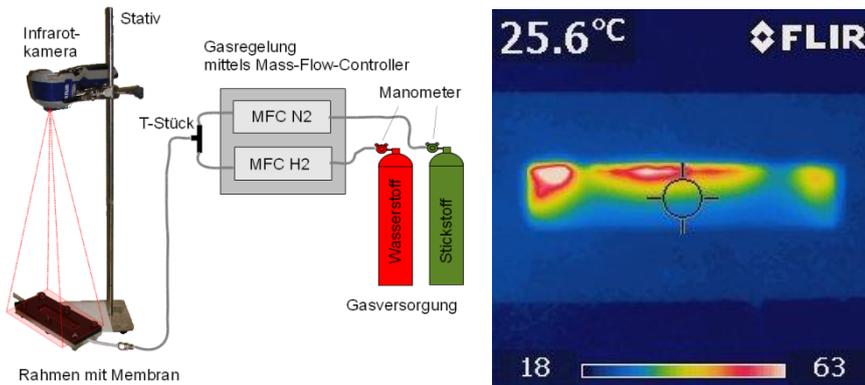


Abbildung 14: Detektion und Lokalisation von Pinholes in einer MEA mittels Infrarotkamera; Messaufbau (links) und Messergebnis: wasserstoffdurchlässige Stellen sind deutlich erkennbar (rechts)

Im Rahmen des Projekts wurde zur Lokalisierung der Pinholes bzw. der wasserstoffdurchlässigen Bereiche ein neues Verfahren entwickelt. Der Aufbau und die Messergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.

## 3.5 Modellierung und Simulation

Für eine 3D-CFD Simulation, bei welcher der Fokus auf Wasserbildung und –transport gesetzt wird, werden die folgenden Methoden gewählt:

- Euler-Euler Methode (2-Phasenströmung in der GDL)
- Volume-of-Fluid (VOF) Methode (2-Phasenströmung mit freien Oberflächen in den Kanälen – NEU!)

In einem ersten Schritt wird die simulierte Polarisationskurve an die der Messung angepasst, wobei Austauschstromdichte und Übertragungskoeffizient aus der Butler-Volmer Gleichung als Anpassungsparameter dienen. Abbildung 15 zeigt die Polarisationskurve in Simulation und Messung. Die Übereinstimmung ist ausreichend genau.

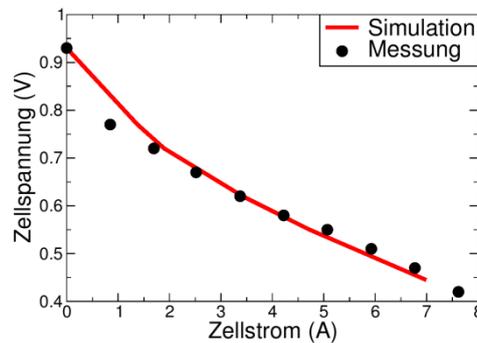


Abbildung 15: Polarisationskurve in Simulation und Messung

Um die simulierte Wasserverteilung mit der Messung aus der Neutronenradiographie zu vergleichen, wurde die Simulation für zwei Betriebspunkte durchgeführt ( $0,55 \text{ V} \approx 6 \text{ A}$ ,  $0,72 \text{ V} \approx 2 \text{ A}$ , Abbildung 16). Aus der Abbildung 17 ist ersichtlich, dass eine tendenzielle Übereinstimmung der Simulation mit der Messung gegeben ist. Im ersten Teil des Diagrammes ist die Übereinstimmung aber weniger gut. In der Simulation kommt es hier kaum zu einer Bildung von Wasserfilmen in den Kanälen, wohingegen die Wasserverteilung in der Messung für jeden Kanal ein ausgeprägtes Maximum zeigt. Zur Messung ist allerdings festzuhalten, dass das Bild einerseits eine zeitliche Mittelung (auf Grund der notwendigen „Belichtungszeit“) darstellt und es nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob die gezeigte Wasserverteilung nicht auch auf vorangegangene Betriebszustände der Zelle zurückzuführen sei.

Bei einer näheren Betrachtung der Stromdichteverteilung und des Volumenanteils der Flüssigkeit (auf Basis der transienten VOF Methode) für 4 unterschiedliche Zeitpunkte (0 s, 0,02 s, 0,04 s, 0,06 s) (für Zeitpunkt 0,02 siehe exemplarisch Abbildung 18) zeigt es sich, dass

1. zu Beginn der Gasdruck durch die Interaktion Gas / Flüssigkeit und damit die Stromdichte nahe des Kathodeneinlasses zunimmt
2. der Sauerstofftransport zur Reaktionsschicht durch lokale Wasserfilme blockiert wird, wodurch an diesen Stellen die Stromdichte sinkt und der Molanteil  $\text{O}_2$  abnimmt
3. sich danach aber wieder das Stromdichtemuster der stationären Lösung einstellt.

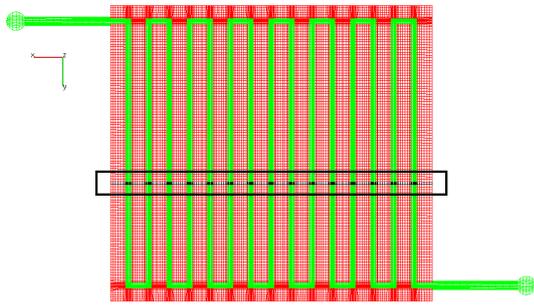


Abbildung 16: Simulationsnetz mit dem betrachteten Schnitt für den Vergleich zwischen Messung und Simulation hinsichtlich Wasserverteilung.

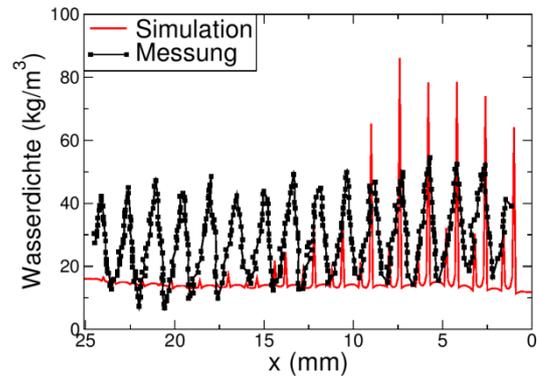


Abbildung 17: Wasserdichte Verteilung der Simulation und Messung (Differenz zwischen 6 A und 2 A)

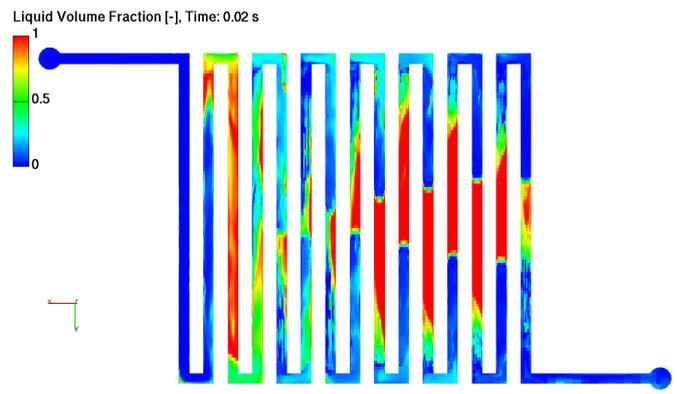
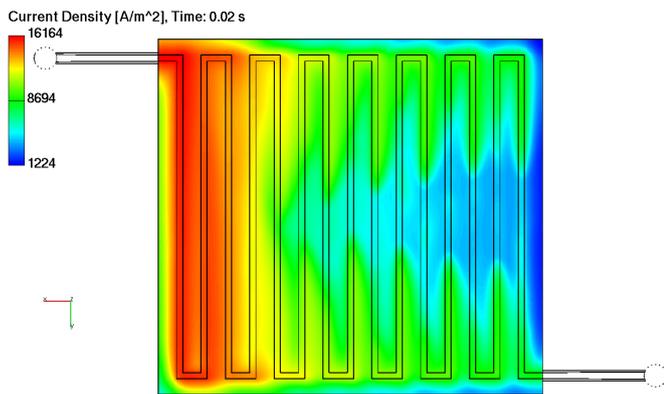


Abbildung 18: Stromdichte (links) und Volumenanteil Flüssigwasser an der Grenzfläche Kathodenkanal / GDL (rechts) zum Zeitpunkt 0.02 s

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Die Gradientenfreie Zelle hat ein großes Potential hinsichtlich Ihrer Anwendbarkeit für materialunabhängige Untersuchungen. Ein noch besseres Verständnis der Vorgänge und eine weitere Optimierung dieser Zelle ist zu empfehlen.

Die bei der Membrandegradation gefundenen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Betriebsparametern sollte noch näher untersucht werden. Bei der Beschäftigung mit der Membrandegradation wurde erstmals auch die Infrarotthermografie zur Schädigungsverifikation von Membran-Elektroden-Einheiten angewandt.

Basierend auf den Versuchen am Atominstut Wien zur Visualisierung von Flüssigwasser wird empfohlen, in Zukunft zur dynamischen Abbildung der Wasserentstehung die Versuche mit dem bestehenden Teststand an einer Neutronenquelle mit höherer Neutronenflußrate zu wiederholen.

## Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft  
FFG

Interessant wären in diesem Zusammenhang auch Untersuchungen, bei der gezielt flüssiges Wasser in die Brennstoffzelle eingebracht wird, um das Fluten der Zelle hervorzurufen und danach Strategien zu entwickeln, wie eine bereits geflutete Brennstoffzelle am besten wieder reaktiviert werden kann.

Die Erweiterung der Simulationssoftware hinsichtlich Flüssigwasser im Kanal wurde erfolgreich implementiert und mit den Transportvorgängen in der GDL gekoppelt. Zukünftige Entwicklungen sollten die Transportgleichung für die Tropfenanzahldichte und die Kopplung der VOF Simulation mit der Energiegleichung behandeln. Die erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse belegen die Richtigkeit der gewählten Vorgangsweise, und weisen den Weg für zukünftige Erweiterungen und Verfeinerungen der Simulation im Bereich der Gesamtsystembetrachtung.