

PIV-MESSUNGEN ZUR UNTERSUCHUNG IN BRENNSTOFFZELLEN

PIV-MEASUREMENTS FOR INVESTIGATION IN FUEL CELLS

N. van der Schoot^{1,2}, R. Lindken¹, K. V. Sharp³, S. Peil², J. Wartmann², J. Westerweel¹

Laboratory for Aero- & Hydrodynamics (1)
Delft University of Technology
Leeghwaterstraat 21
2628 CA Delft
Niederlande

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik gGmbH (2)
Carl-Benz Straße 201
47057 Duisburg

The Pennsylvania State University (3)
157D Hammond Building
University Park, PA 16802
United States

Particle Image Velocimetry (PIV), Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC), Stofftransport
Particle Image Velocimetry (PIV), Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), Mass transport

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, die Strömung in einer betriebenen Direktmethanolbrennstoffzelle zu messen, die Abläufe im Innern der Zelle zu beobachten und einen eventuell entstehenden Unterschied der Volumenströme in der betriebenen Zelle im Vergleich zum Leerlaufzustand zu erfassen.

Um die in einer Brennstoffzelle ablaufenden Vorgänge analysieren zu können, ist es notwendig, eine geeignete Messmethode zu finden und den dafür benötigten Zugang in die Brennstoffzellen zu schaffen. Voraussetzung ist, dass die Vorgänge beobachtet werden können ohne die Funktion der Brennstoffzelle zu beeinflussen. Zur Untersuchung der instationären Geschwindigkeitsverteilung in einer Brennstoffzelle erscheint die Particle Image Velocimetry (PIV) als bildgebendes Messverfahren geeignet. Nach unserem Wissen ist bisher jedoch noch keine PIV-Messung in einer operativen Brennstoffzelle ausgeführt worden. In diesem Beitrag möchten wir Ansätze für entsprechende PIV-Untersuchungen diskutieren und erste Messergebnisse vorstellen.

Einleitung

Im Innern einer Brennstoffzelle laufen verschiedene komplexe chemische Vorgänge zeitgleich ab. Die teilnehmenden Reaktionspartner werden über Gasverteilungs Kanäle, die sich in den sog. Bipolarplatten befinden, und einer darüberliegenden Gasdiffusionsschicht auf die Oberfläche der Brennstoffzellen-Membran geleitet. Die Membran trennt die anoden- und kathodenseitigen Gasströmungen zwischen zwei Bipolarhalbplatten voneinander. Auf den katalytisch beschichteten Membranoberflächen laufen elektrochemische Reaktionen ab und es findet ein Stofftransport durch die Membran statt.

In einer Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC), der anodenseitig ein Methanol-Wasser-Gemisch zugeführt wird, entsteht durch CO_2 -Bildung eine Zweiphasenströmung. Kathodenseitig wird (Luft-)Sauerstoff zugeführt. Da an der Kathode als Reaktionsprodukt Wasser entsteht, kann bei einer Arbeitstemperatur unterhalb des Taupunktes Wasser kondensieren. Die Strömungssituation wird weiterhin dadurch komplex, dass die Reaktanden und Reaktionsprodukte einerseits der Kanalführung folgen, andererseits die Stege der Kanäle über die GDL überströmen.

Die Strömung in den Kanälen einer Bipolarplattenhälfte kann relativ einfach in einem Modell mit Wasser als Strömungsmedium durch PIV sichtbar gemacht werden, siehe Feser, J. P. et al 2007 oder Martin, J. et al 2005. Außerdem gibt es wenige Gruppen und Forschungsinstitute, die Gasphase-PIV-Messungen an Glasmodellen in Millimeter-Kanälen realisiert haben, siehe Yoon, S. Y. et al 2006, Sugii, Y. et al 2006 oder Grega, L. et al 2007. Zur Markierung der Gasströmung wurden fluoreszierende Öl-Partikel (0,5-2 μm) bzw. Smoke-Partikel (<1 μm) verwendet.

Der reale Fall einer sich im Betrieb befindenden Brennstoffzelle stellt uns messtechnisch vor verschiedene Probleme. Die optische Zugänglichkeit muss gewährleistet sein und es müssen Partikel zur Strömungsmarkierung in die zu untersuchende Strömung eingebracht werden, ohne die Abläufe in der Zelle zu stören.

In einem ersten experimentellen Ansatz wurde eine optisch zugängliche Einkanal-Direktmethanolbrennstoffzelle angefertigt und untersucht. Erste Versuche zeigen, dass das in der DMFC entstehende Kohlendioxid die PIV-Messungen erschwert. Eines der größten Probleme der DMFC ist die ungleichmäßige Leistungsabgabe. Es wird angenommen, dass in der DMFC entstandenes Kohlendioxid ein stark instationäres Verhalten der Strömung verursacht, das wiederum für die fluktuierende Leistungsabgabe verantwortlich gemacht wird. Die in der Methanolphase entstehenden Kohlendioxid-Blasen blockieren teilweise vorübergehend den Kanal, so dass zeitaufgelöste Messungen über längere Zeiträume notwendig sind.

Es gibt bereits einige Studien über die Beobachtung der Zweiphasenströmung im Innern einer betriebenen Direktmethanolbrennstoffzelle. Hauptsächlich wird die Größe und Anzahl der Kohlendioxidblasen in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie Temperatur, Methanolkonzentration, Strömungsgeschwindigkeit, Druckdifferenz (Anode/Kathode) und Stromdichte der Zelle beobachtet, siehe Nordlund, J. et al 2004, Yang, H. et al 2004 und Liao, Q. et al 2007. Diese Abhängigkeiten wurden ebenso in Mikro-DMFCs, siehe Liang, J. et al 2006 und für verschiedene Membranen mit „carbon cloth“- bzw. „carbon paper“-GDL untersucht.

Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC): Aufbau und Funktion

Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode, und dem dazwischen liegenden Elektrolyten (Ionenleiter), der Membran, die beidseitig katalytisch beschichtet ist und zusammen mit der sog. Gas-Diffusions-Lage (GDL) die Membran-Elektroden-Einheit (MEA, membrane electrode assembly) bildet. Im Falle einer DMFC werden die Kanäle des anodenseitigen Zellrahmens (Bipolarhalbplatte) von einem Methanol-Wassergemisch ($\text{CH}_3\text{OH}+\text{H}_2\text{O}$) durchströmt. An der Anode findet folgende katalytisch be-

schleunigte Teilreaktion statt: Die $\text{CH}_3\text{OH}+\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle werden in Elektronen, Protonen und Kohlendioxid (CO_2) aufgespalten. Die entstehenden Protonen wandern durch die Membran zur Kathode, während die entstehenden Elektronen über einen externen Verbraucher zur Kathode fließen. Das gasförmige CO_2 wird mit der Methanol-Wasser-Strömung aus dem Kanal getragen.

An der Kathodenseite wird der Reaktionspartner Luftsauerstoff (O_2) zugeführt. Dieser wird durch die über den äußeren Stromkreis kommenden Elektronen reduziert und reagiert mit den durch die Membran kommenden Protonen zu Wasser. Die Teilreaktionen laufen ab, solange ausreichend Reaktionspartner vorhanden sind, sich also kein thermodynamisches Gleichgewicht eingestellt hat. Außerdem muss die Protonenleitung über den Elektrolyten und die Elektronenleitung über den äußeren Stromkreis gewährleistet sein.

In der Brennstoffzelle wird so chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt. Der Umweg über die Erzeugung von Wärmeenergie, wie er bei konventionellen Verbrennungsprozessen genommen wird, entfällt und damit ebenso die Begrenzung der Energieumwandlung über den Carnot-Wirkungsgrad, siehe Heinzl et al 2006.

Da die Leistung einer Brennstoffzelle maßgeblich von der konstanten, kontinuierlichen Zufuhr der Reaktanden und einer homogenen Verteilung dieser über die gesamte Membranfläche abhängt, müssen zur Verbesserung von Brennstoffzellen geeignete Methoden entwickelt werden, um die Strömungsvorgänge im Innern der Brennstoffzelle untersuchen und analysieren zu können. Dazu muss ein optischer Zugang der Brennstoffzelle entwickelt und außerdem ein geeignetes Messverfahren sowie geeignete Tracer gefunden werden. Diese sollten möglichst genau der Strömung folgen und die Abläufe im Innern der Brennstoffzelle nicht beeinflussen. In dem hier vorliegenden Beitrag werden die Konstruktion einer optisch zugänglichen Einkanal-Direktmethanolbrennstoffzelle und erste daran gewonnene Ergebnisse vorgestellt.

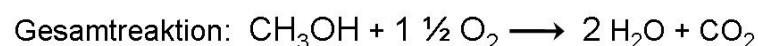
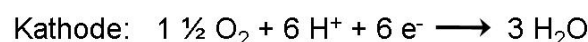
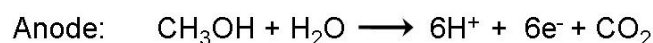
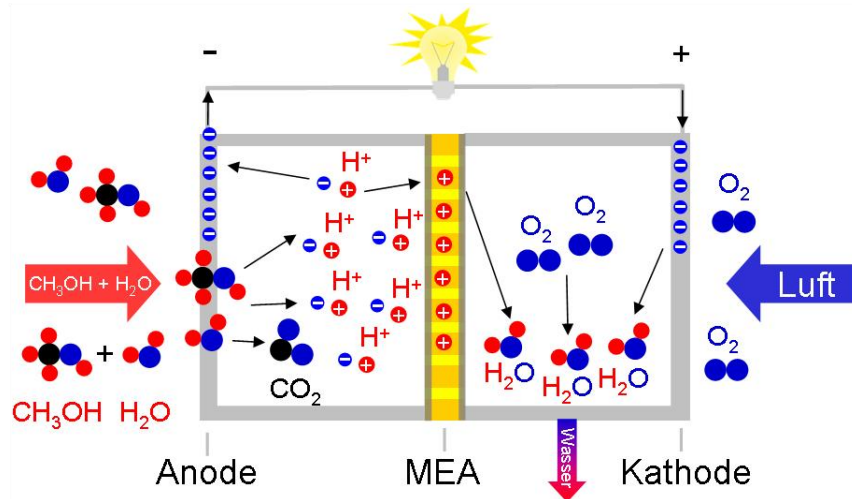


Abb. 1: Funktionsprinzip und Reaktionsgleichung der Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC). Anodenreaktion: Das Methanol-Wassergemisch ($\text{CH}_3\text{OH}+\text{H}_2\text{O}$) wird aufgespalten in Protonen, Elektronen und Kohlendioxid (CO_2). Die Elektronen werden über den äußeren Stromkreislauf zur Kathode transportiert und den Protonen ist es möglich die Membran zu passieren. Kathodenreaktion: An der Kathode reagiert Luftsauerstoff (O_2) mit den Elektronen und Protonen zu Wasser. Die Teilreaktionen werden durch einen Katalysator, mit dem die Membran beschichtet ist, beschleunigt.

Optisch zugängliche Einkanal-DMFC

Die Herausforderung bei der Konstruktion einer optisch zugänglichen DMFC besteht darin, ein optisches Fenster zu konstruieren ohne die Funktion der Brennstoffzelle zu behindern. Um dies zu realisieren, wurde die Anoden-Bipolarplattenhälfte, d.h. die „Methanol-Seite“ aus Graphit (BMA5, Firma Eisenhuth) gefräst und über dem Kanal (B: 1mm, H: 1mm, L: 67mm) eine Aussparung für ein Deckglas angefertigt. Die im Brennstoffzellenbetrieb entstehenden Elektronen werden über die Graphit-Seitenstege abgeleitet. Der Ein- und Auslass des Kanals sind zwei 0,5mm Bohrungen mit eingeklebten Edelstahl-Kapillaren, an die Schläuche für die Brennstoffversorgung angeschlossen werden. Das Glasfenster (Dicke: 1mm) wurde mit einer Isolierfolie (Dicke: 500µm, Surlyn 1702, Firma Dupont) bei 100°C (45min) auf das Bipolarplattenmaterial aufgeschmolzen. Die Folie war zuvor mit einem Skalpell so zugeschnitten worden, dass sie einen exakten Abschluss zwischen Kanalwand und Glas darstellt. Die Membran (70mm x 34mm, ES12D-W-5L, Firma BASF Fuel Cell) wurde ebenfalls von Hand zugeschnitten und an den Rändern von beiden Seite die GDL und der Katalysator entfernt, um Kurzschlüsse innerhalb der Zelle zu vermeiden. Die Ränder der Membran wurden dann parallel zum Glasfenster auf der anderen Seite der Anoden-Bipolarplatte mit dieser verklebt.

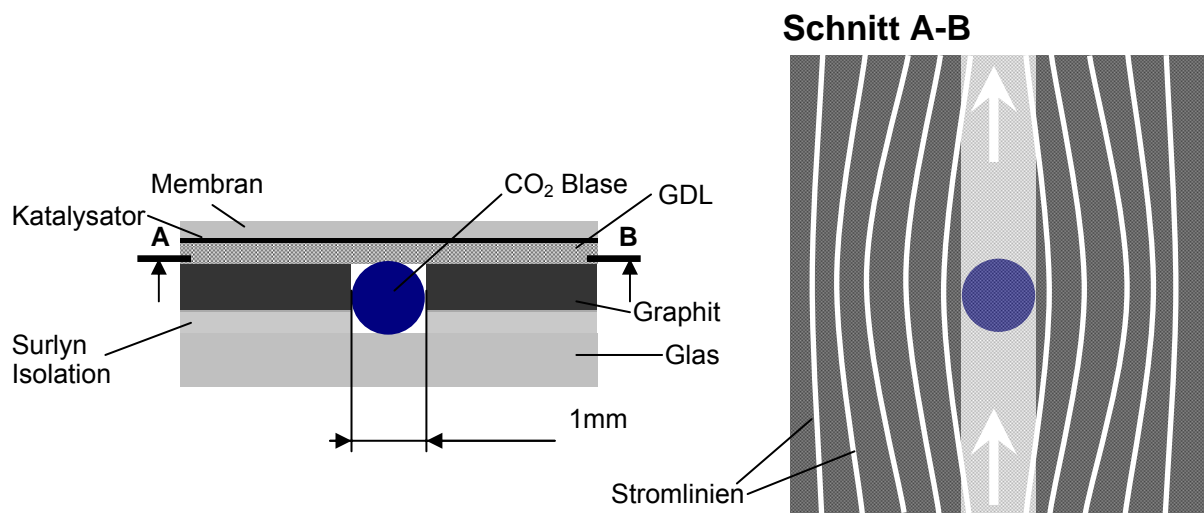


Abb. 2: Schematische Darstellung des Anodenkanals: Schnitt durch den Kanal (links). Schnitt A-B veranschaulicht die Strömungsverhältnisse im Kanal (rechts). Der Strömung ist es möglich den Kanal durch die poröse GDL zu überströmen.

Alle Klebungen der Probe wurden mit lösungsmittelbeständigem Zweikomponenten-Epoxy (5 Minuten-Epoxy, Firma R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH) realisiert, der sich für eine für die Messungen nur kurzfristige Nutzung in der betriebenen Brennstoffzelle als geeignet erwies.

Die ebenfalls aus Graphit gefräste Kathoden-Bipolarhalbplatte wurde als letztes so auf die andere Seite der Membran positioniert, dass die Kanäle der beiden Bipolarhalbplatten genau übereinander lagen. Die Position der Bipolarplattenhälften zueinander wurde mit einem PMMA-Rahmen fixiert und aneinander gepresst.

Die elektrischen Kontakte beider Bipolarhalbplatten wurden mit elektrisch leitfähigem Epoxyd (H20S, Firma Polytec PT) aufgeklebt und bei 150°C (10min) ausgeheizt.

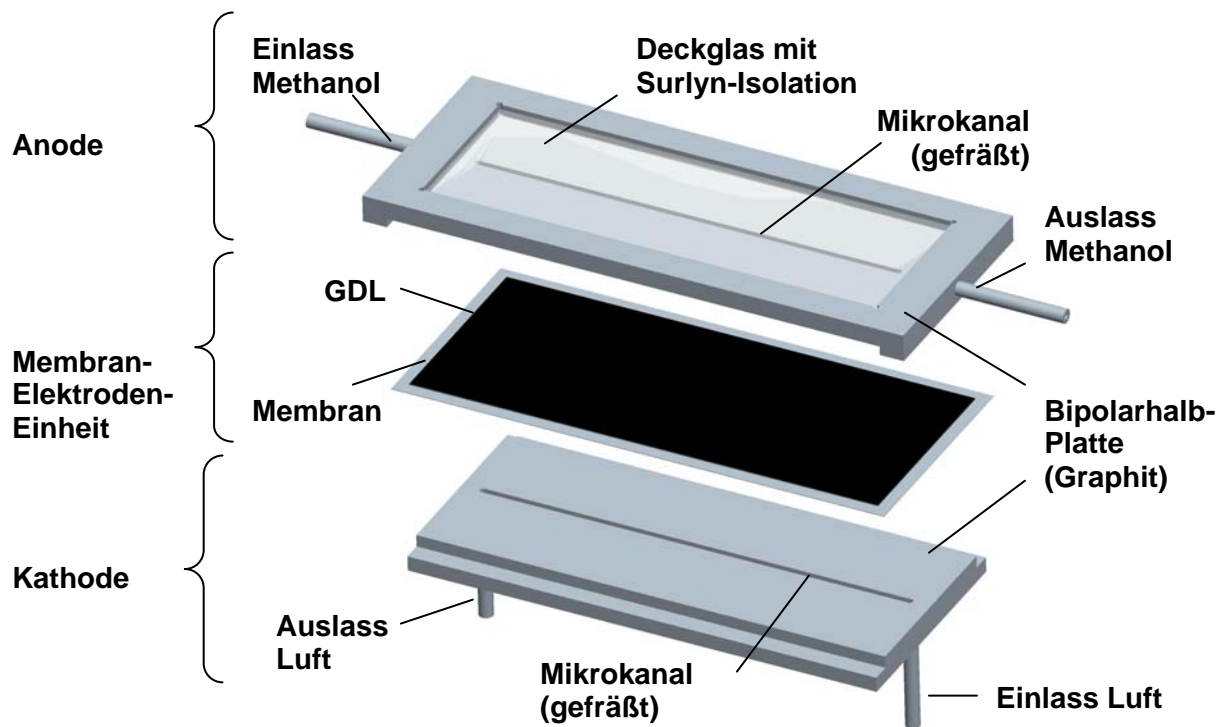


Abb. 3: Komponenten der optisch zugänglichen Einkanal-DMFC

Versuchsaufbau

Die Versorgung der Brennstoffzelle mit den Reaktanden wurde zum einen durch einen pulsationsfreien Druckluftanschluss an die Kathodenseite und zum anderen durch eine Methanol-Wasser-Gemischzufuhr über eine Spritzenpumpe (neMESYS, Firma Cetoni) gewährleistet. Mit der verwendeten 10ml Glasspritze liefert diese Spritzenpumpe pulsationsarme Volumenströme bis minimal $12\mu\text{l}/\text{min}$. Dadurch, dass eine flexible Membran die DMFC-Kanalwand bildet, ist es besonders wichtig, dass die Strömung pulsationsfrei ist, damit die Abmessungen des Kanals konstant bleiben. Die Spritzenpumpe und der DMFC-Einlass wurden mit einer Edelstahlkapillare (AD: 2mm, ID: 1mm, L: 1m) verbunden, um die ein Heizdraht (HS42-450°C, 2,3m, 210W, Firma Horst) gewickelt war. Mit diesem 1 m langen System war es möglich, das Methanol-Wasser-Gemisch vor dem Eintritt in den Brennstoffzellenkanal aufzuheizen.

Der äußere Stromkreislauf zwischen Anode und Kathode wurde durch einen austauschbaren, angeschlossenen Lastwiderstand ($0,1\Omega$, 1Ω , 5Ω , $1\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$) realisiert. Die Messungen im Leerlauf wurden mit offenen Klemmen durchgeführt. Um die Druckverhältnisse in der Brennstoffzelle nicht zu verändern und die Vergleichbarkeit der Messungen im Betrieb und im Leerlauf zu gewährleisten, wurde für alle Betriebsbedingungen eine konstante Zufuhr der Reaktanden an Anode und Kathode gewählt.

Die DMFC wurde mit dem Glasfenster nach unten auf dem optischen Tisch des inversen Mikroskops platziert. Das invertierte Mikroskop ist Bestandteil des PIV-Systems der Firma LaVision, mit dem in Ort und Zeit hochaufgelöste Strömungsuntersuchungen möglich sind.

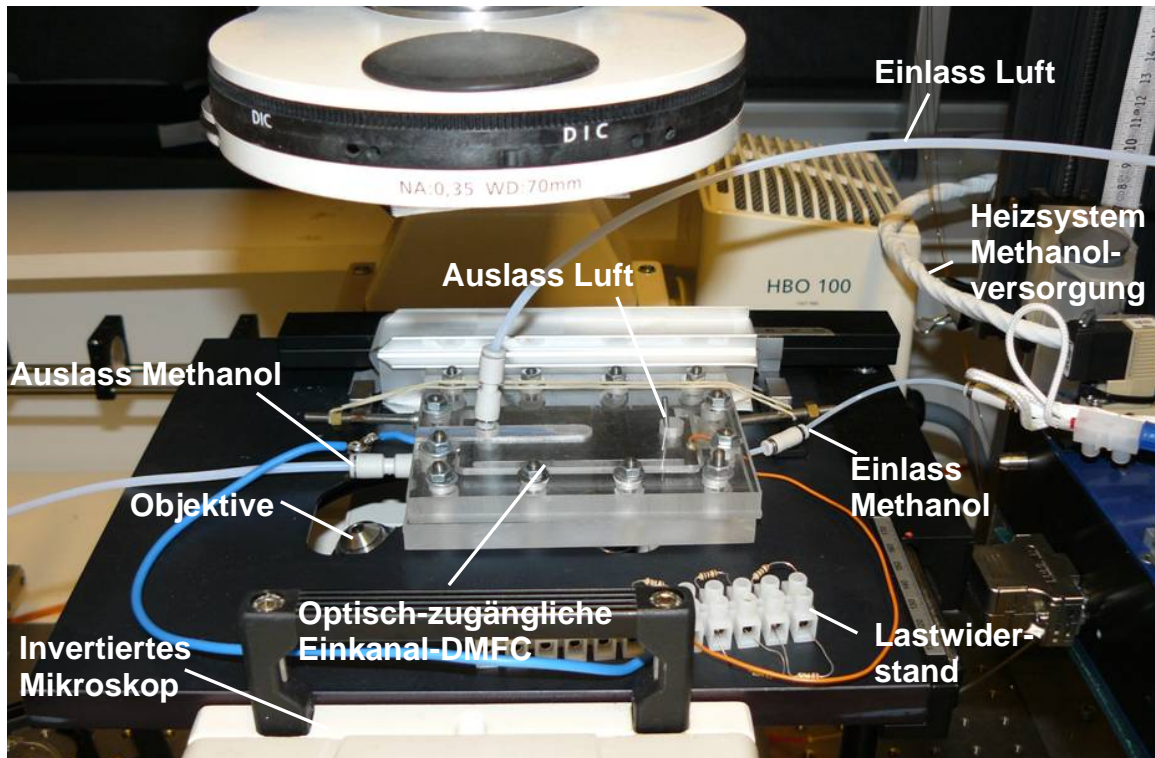


Abb. 4: Versuchsaufbau

Ergebnisse und Diskussion

In den vorliegenden Untersuchungen wurden zwei Ziele verfolgt. Zum einen wurden die Abläufe im Innern der Zelle beobachtet und die Instationarität der Strömung auf Grund von CO_2 -Blasenbildung untersucht. Außerdem wurde der Versuch verfolgt einen eventuell entstehenden Unterschied der Volumenströme in der betriebenen Direktmethanolbrennstoffzelle im Vergleich zum Leerlaufzustand zu erfassen.

Nach ersten Abschätzungen ist zu erwarten, dass die Abnahme des Volumenstromes zwischen Kanaleingang und -ausgang durch Massetransport über die Membran in der gleichen Größenordnung liegt wie der mit der Spritzenpumpe minimal mögliche Volumenstrom von $0,2\mu\text{l/s}$.

Eine exakte theoretische Berechnung des Nettovolumens, das auf Grund der elektrochemischen Reaktion in der Zelle über die Membran auf die Kathodenseite gelangt, ist schwierig, da mehrere Abläufe gleichzeitig stattfinden, die von unterschiedlichsten Einflüssen abhängen.

Die Anzahl der durch die Methanol-Wasseraufspaltung entstehenden Protonen ist proportional dem erzeugten Strom I . Pro entstehendem Proton werden $1/6$ Molekül Wasser und $1/6$ Molekül Methanol für die Methanoloxidation benötigt.

Neben dem Protonentransfer über die Membran wird ebenfalls Wasser und Methanol durch die Membran transportiert. Dies liegt daran, dass die herkömmlichen Membranen nicht vollständig methanolundurchlässig sind und ein Wassertransport aufgrund von Diffusion, Elektroosmose und hydraulischer Permeation existiert, siehe Lu, G. Q. et al 2005. Die größte Volumenänderung wird dabei durch das Wasser verursacht, das durch den „Electro-osmotic drag“ mit den Protonen zur Kathode gelangt. Der Wasserkoeffizient einer Nafion N117 Membran in einer DMFC beträgt etwa 2,5 Moleküle Wasser pro Proton für Zimmertemperatur, siehe Ren, X. et al 2001. Dieser Volumenanteil liegt bei unserer Einkanal-DMFC bei etwa $0,21\mu\text{l/s}$ im Kurzschlussfall.

Die Anzahl der umgesetzten Elektronen bzw. Protonen wurde aus dem maximal gemessenen Kurzschlussstrom ($I_K=447\text{mA}$) und der Faraday-Konstante ($k_F=96485,31\text{As/mol}$) ermittelt. Mit einem Wasserkoeffizienten von 2,5 ergibt sich ein Wert von $1,16 \times 10^{-5}\text{mol H}_2\text{O}$ -Molekülen pro Sekunde, die durch Elektroosmose über die Membran „gezogen“ werden. Mit der Molmasse ($M_{\text{H}_2\text{O}}=18,02\text{g/mol}$) und der Dichte von Wasser bei Zimmertemperatur ($\rho_{\text{H}_2\text{O}}=1,00\text{kg/l}$) erhalten wir die Volumenänderung von $0,21\mu\text{l/s}$ im Kurzschlussfall.

Die Produktion des Kohlendioxidgases an der Anode führt allerdings zu einer Vergrößerung des Volumenstromes und überlagert die geschwindigkeitsminimierende Wirkung des Massetransfers auf die Strömung.

Um diese Änderung des Volumenstromes in dem Kanal einer betriebenen Zelle im Vergleich zu einer Zelle im Leerlauf mit der PIV-Methode messen zu können, muss ein Kompromiss gefunden werden: Einerseits sollten für die Zelle optimale Arbeitsbedingungen gewählt werden, so dass der Stoffumsatz maximal ist, damit möglichst viele Wassermoleküle mit den Protonen die Anodenseite über die Membran verlassen. Andererseits sollten die Messbedingungen so sein, dass möglichst keine Gasblasen im Kanal entstehen, die die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal beeinflussen.

Geringere Methanolkonzentrationen, Messung bei Zimmertemperatur und ein hoher Lastwiderstand bewirken eine geringe Produktion von Kohlendioxid, aber auch eine schwächere Reaktion. Außerdem zeigt eine Entgasung des Flüssigkeitsgemisches vor dem Abfüllen in die Glasspritze eine höhere Löslichkeit des entstehenden Kohlendioxids in der Flüssigkeit, siehe Urukova, I. et al 2006. Bei höheren Durchflussgeschwindigkeiten zeigt sich zudem, dass die Gasblasen mit der Strömung aus dem Kanal getrieben werden. Dieses Verhalten ist in Abb. 5 zu sehen. Beobachtet wurde eine örtlich konstante, kontinuierliche Gasblasenproduktion, die Sekunden nach der Inbetriebnahme auftrat. Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten ($20\mu\text{l/min}$) zeigten sich eine Blockierung des Kanals und ein Anwachsen der Gasblase. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ($500\mu\text{l/min}$) bleibt die Gasblase klein und wird relativ schnell von der Strömung mitgerissen.

Das Hinzufügen geeigneter Chemikalien zur Aufnahme des Kohlendioxids ist eine weitere Möglichkeit die Kohlendioxidausgasung zu reduzieren, siehe Kohl, A. L. et al 1997. Dies kann aber wiederum negative Auswirkungen im Hinblick auf Korrosionsprozesse in der Zelle und andere unerwünschte Einflüsse auf die chemischen Abläufe in der Zelle hervorrufen, siehe Lundin, M. D. et al 2007.

In ersten Voruntersuchungen wurde die Strömungsgeschwindigkeit der Methanol-Wasser-Lösung der Einkanal-DMFC im Leerlauf und in Betrieb mit verschiedenen Methanol-Konzentrationen, Volumenstromgeschwindigkeiten der Methanol-Wasser-Zufuhr, Lastwiderständen und Arbeitstemperaturen am Kanalausgang gemessen, um abschätzen zu können, ob es einen mit PIV messbaren Abfall des Volumenstromes über die Länge des Kanals gibt, der durch den Massetransfer über die Membran zustande kommt. Bei der Durchführung dieser Versuche zeigten sich die bereits oben diskutierten Verhältnisse: Eine optimal arbeitende Zelle produziert Kohlendioxidblasen in solcher Kontinuität, dass die Messung einer konstanten Flussgeschwindigkeit im Kanal nicht möglich ist. Der umgekehrte Fall der Messung einer über die Zeit konstanten Strömungsgeschwindigkeit an einer Stelle des Kanals ist nur bei einem eingeschränkten DMFC-Betrieb mit geringen Stromdichten oder hohen Strömungsgeschwindigkeiten möglich, wobei dann kein eindeutiger Abfall des Volumenstromes gefunden wurde.

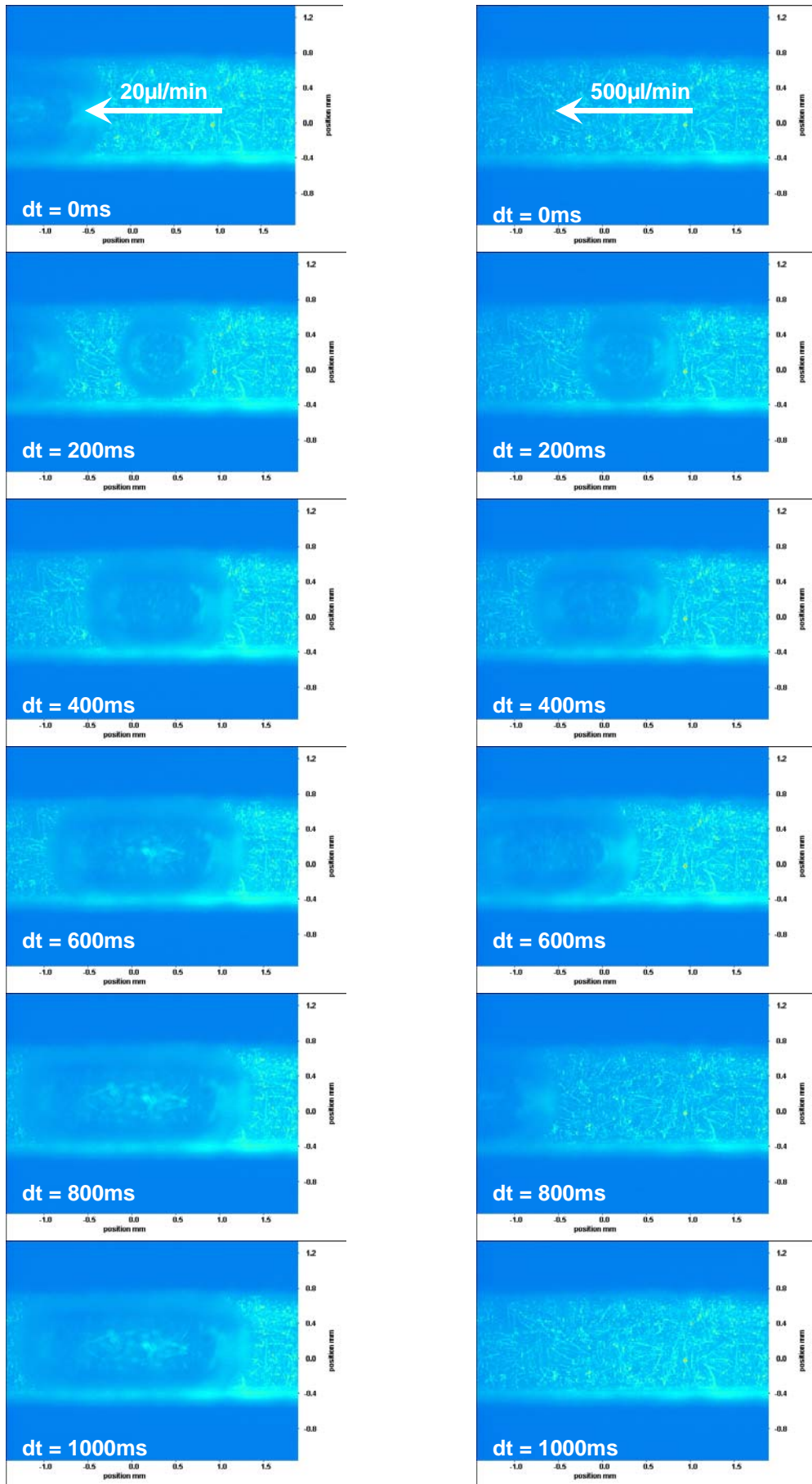


Abb. 5: Kohlendioxidblasen im Kanal (Strömungsgeschwindigkeit links: 20µl/min, rechts: 500µl/min)

Die nachstehende Grafik (Abb. 6) zeigt die Instabilität der Strömungsgeschwindigkeiten im Anodenkanal durch den Einfluss der Kohlendioxidblasen. Ein einzelner Messpunkt ist die Durchschnittsgeschwindigkeit eines PIV-Doppelbildes in der Kanalmitte an einem festen Ort im Kanal. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Doppelbildern beträgt 200ms. Die Bilder, die das Erscheinen der Gasblasen anzeigen, sind auf der x-Achse markiert. Innerhalb der Gasblasen sind keine Marker-Partikel vorhanden, so dass keine Geschwindigkeitsberechnungen möglich sind. Auffallend sind die hohen Geschwindigkeitspeaks vor dem Erscheinen der Gasblase und die Instabilität der Geschwindigkeit zwischen den Blasen. Diese Geschwindigkeits-Instabilitäten der Strömung können durch das Anwachsen einer Gasblase am Entstehungsort, bzw. das abrupte Mitreißen der Gasblase mit der Strömung erklärt werden.

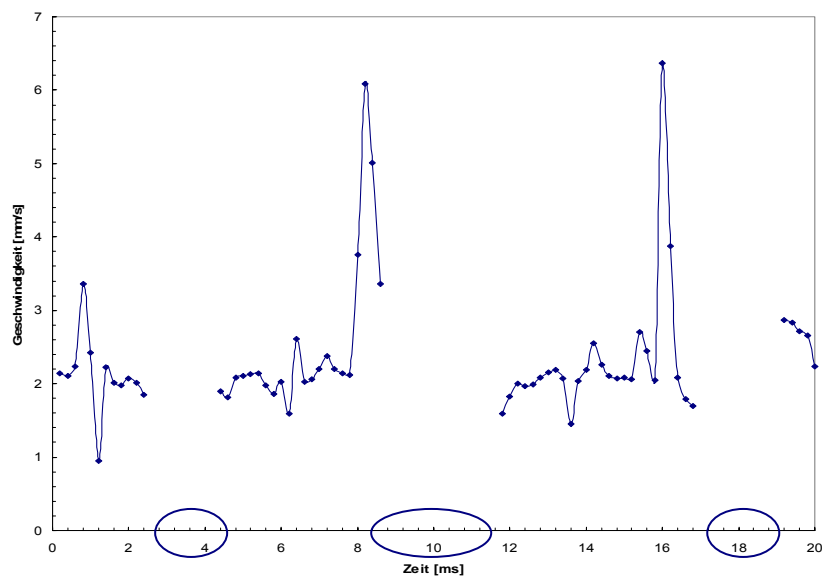


Abb. 6: Instabilität der Geschwindigkeit der Methanolwasserströmung im Kanal durch den Einfluss von CO₂-Blasen (Markierung auf der x-Achse)

Außer der Kohlendioxidentstehung und -ausgasung, die zu inhomogenen Bedingungen in der Zelle führt, gibt es einen Einfluss der Temperatur auf die Dichte der Flüssigkeit und damit auf den Volumenstrom. Auch die Voraussetzung, dass das Maß an Reaktion unter konstanten Arbeitsbedingungen und gleichmäßiger Zufuhr der Reaktanden zeitlich konstant bleibt, konnte in der Brennstoffzelle nicht sichergestellt werden. Durch die Vielzahl der Einflüsse auf die elektrochemischen Reaktionen „pendelt“ sich die Brennstoffzelle nach einer Änderung im System nur langsam auf einen neuen Zustand ein. Beobachtet wurde beispielsweise die Auswirkung des Anklemmens eines neuen Lastwiderstandes in einem kurzzeitigen Abfall der Spannung bzw. einem kurzzeitigen Anstieg der Stromstärke. Nach dieser „Störung“ im System konvergieren die beiden Werte gegen einen neuen Endwert.

Ausblick

Durch den optischen Zugang in der DMFC werden mit der Particle Image Velocimetry Geschwindigkeitsmessungen der Strömung in der betriebenen Direktmethanolbrennstoffzelle ermöglicht. Dadurch ist es möglich das instationäre Verhalten der Strömung durch den Einfluss des gasförmigen Kohlendioxids zu zeigen. Die örtlich konstante, kontinuierliche CO₂-Blasen-Produktion eröffnet ein breites Feld an Untersuchungsmöglichkeiten, z.B. die lokale Beobachtung der Entstehung der Gasblasen und der Einflüsse verschiedener Parameter auf Größe und Anzahl der Blasen.

Außerdem ist damit das Messen des lokalen Stofftransports durch die Membran theoretisch möglich. Die dieser Arbeit zu Grunde liegenden experimentellen PIV-Voruntersuchungen lassen allerdings noch keinen endgültigen Schluss darüber zu, ob mit dieser Methode eine durch Wasser-Massetransfer durch die Membran induzierte Volumenstromabnahme in den Kanälen einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle auch praktisch messbar ist.

Um die bestmöglichen Bedingungen für die Messbarkeit von Volumenstromänderungen in einer DMFC mit der PIV-Messtechnik zu schaffen, sind folgende Schritte notwendig:

Zur Einschränkung der Kohlendioxidausgasung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Messbarkeit im realen Betrieb müssen die Parameter Lastwiderstand, Methanolkonzentration, Volumenstromgeschwindigkeit der Methanol-Wasser-Zufuhr und Arbeitstemperatur optimiert werden. Eine Optimierung der Kanalstruktur im Hinblick auf die Messung mit PIV ist ebenfalls möglich. Zudem ist es notwendig die Temperatur im Kanal, die Spannung und den Strom der Zelle bei jeder PIV-Messung gleichzeitig auszulesen, um möglichst zeitgleich den Zusammenhang zwischen Leistung und Volumenstrom abschätzen zu können.

Die Möglichkeit, das entstehende Kohlendioxid durch Zugabe geeigneter Reagentien (KOH, LiOH, Amine) zu der Methanol-Wasser-Lösung in Lösung zu binden, sollte getestet werden. Insbesondere ist zu untersuchen, ob sich eine entsprechende Reagentien-Zugabe auf die Funktion der Zelle auswirkt, ob Probleme durch Korrosionsprozesse entstehen, und ob das Kohlendioxid schon bei der Entstehung so vollständig gebunden werden kann.

Literatur

- Feser, J. P., Prasad, A. K., Advani, S. G., 2007: "PIV Measurements in a Model Proton Exchange Membrane Fuel Cell", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 4, August 2007, 328-335
- Grega, L., Mc Garry, M., 2007: "Flow Characterization of a Polymer Electronic Membrane Fuel Cell Manifold and Individual Cells Using Particle Image Velocimetry", Vol. 4, August 2007, 272-279
- Heinzel, A., Mahlendorf, F., Roes, J., 2006: "Brennstoffzellen Entwicklung, Technologie, Anwendung"
- Kohl, A. L., Nielsen R., 1997: „Gas Purification“, Fifth Edition
- Liang, J., Liu, C., 2006: "In situ Visual Investigation of CO₂ Bubbles Clogging Phenomena in μ DMFC Anode Micro Flow Field", *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Zhuhai, China
- Liao, Q., Zhu, X., 2007: "Visualization study on the dynamics of CO₂ bubbles in anode channels and performance of a DMFC", *Journal of Power Sources* 171 pp. 644-651
- Lundin, M. D., McCreedy, M. J., 2007: "Reduction of carbon dioxide gas formation at the anode of a direct methanol fuel cell using chemical enhanced solubility", *J. of Power Sources*, 172 pp. 553-559
- Lu, G. Q., Liu, F. Q., Wang, C. Y., 2005: "Water Transport Through Nafion 112 Membrane in DMFC", *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 8, No.9, pp. A1-A4
- Lu, G. Q., Wang, C. Y., 2004: "Electrochemical and flow characterization of a direct methanol fuel cell", *Journal of Power Sources* 134 pp. 33-40
- Martin, J., Oshkai, P., Djilali, N. 2005: "Flow Structures in a U-Shaped Fuel Cell Flow Channel: Quantitative Visualization Using PIV", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 2, 70-80
- Nordlund, J., Picard, C., 2004: "The design and usage of a visual direct methanol fuel cell", *Journal of Applied Electrochemistry* 34 pp. 763-770
- Ren, X., Gottesfeld S., 2001: "Electro-osmotic Drag of Water in Poly(perfluorosulfonic acid) Membranes", *J. Electrochemical. Soc.*, Vol. 148, No. 1, pp. A87-Ap3
- Sugii, Y., Okamoto, K., 2006: "Velocity Measurement of Gas Flow Using Micro PIV Technique in Polymer Electrolyte Fuel Cell", *Proceedings of ICNMM2006* 96216
- Urukova, I., Vorholz, J., Maurer, G., 2006: "Solubility of Carbon Dioxide in Aqueous Solution of Methanol. Predictions by Molecular Simulation and Comparison with Experimental Data", *J. Phys. Chem. B*, 110 pp. 14943-14949
- Yang, H., Zhao, T. S., Ye, Q., 2004: "In situ visualization study of CO₂ gas bubble behaviour in DMFC anode flow fields", *Journal of Power Sources* 139 pp. 79-90
- Yoon, S. Y., Ross, J. W., Mench, M. M., Sharp, K. V., 2006: "Gas-phase PIV for application to the design of fuel cell reactant flow channels", *Journal of Power Sources* 160 (2006) 1017-1025