

## Optische Strömungsmessung im Manifold eines betriebenen Brennstoffzellenstapels

### Optical flow measurement in the manifold of an operated fuel cell stack

**F. Schmieder<sup>1</sup>, S. Burgmann<sup>2</sup>, M. E. Kinaci<sup>2</sup>, M. Szesny<sup>2</sup>, B. Fregin<sup>1</sup>, J. Wartmann<sup>2</sup>,  
A. Heinzl<sup>2</sup>, L. Büttner<sup>1</sup>, J. Czarske<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

<sup>2</sup>Zentrum für Brennstoffzellen Technik GmbH (ZBT), Carl-Benz-Straße 201, 47057 Duisburg

wandnahe Messung, Fluoreszenz, Strömungssimulation für Brennstoffzellen-Stapel  
near wall measurements, fluorescence, computational fluid mechanics for fuel cell stacks

#### Zusammenfassung

Die Strömungsverhältnisse im Rohrverzweigungssystem (Manifold) eines Brennstoffzellenstapels beeinflussen die Stoffverteilung zwischen den einzelnen Zellen. Eine Ungleichverteilung wirkt sich dabei negativ auf die Effizienz des gesamten Stapels aus. Um eine Gleichverteilung der Reaktanden zu erreichen, kann mit Hilfe von numerischen Simulationen eine optimale Durchströmungsgeometrie des Manifolds ermittelt werden. Gemessene Strömungsprofile als Referenzwerte sind für diese Simulationen zur Validierung und Kalibrierung allerdings unabdingbar. Ungünstigerweise behindert der kompakte Aufbau eines Brennstoffzellenstapels den Einsatz etablierter Messtechniken wie Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) oder Particle Image Velocimetry (PIV). Für möglichst realistische Ergebnisse sollten Strömungsmessungen zudem in einem betriebenen Brennstoffzellenstapel durchgeführt werden, um Auswirkungen der chemischen Reaktionen (Stoffumsätze und lokale Massenstromänderungen) zu berücksichtigen.

Es wurden goldbeschichtete Adapterplatten aus Kupfer konstruiert, welche durch eingebrachte parallele Fenster einen Zugang zum Brennstoffzellenmanifold über eine freie Apertur von etwa  $(7 \times 4) \text{ mm}^2$  ermöglichen. Als Seeding wurde nach ausführlichen Voruntersuchungen Ethylenglykol ausgewählt, welches mit einem Laskin-Seeder zu Partikeln mit einer mittleren Größe von  $1 \text{ }\mu\text{m}$  zerstäubt wird. Die Messungen werden mit einem Multimode-LDA durchgeführt, welches für die Anwendung in kleinen Rohren optimiert wurde und eine axiale Ortsauflösung von weniger als  $100 \text{ }\mu\text{m}$  aufweist, d.h. über eine Größenordnung höher als bei einem konventionellen LDA. Es werden erstmals Strömungsmessungen vorgestellt, welche an einem 10-zeiligen Test-Brennstoffzellenstapel gewonnen wurden. Es wurden realistische Betriebsbedingungen eingestellt (Stöchiometrie der Kathode  $\lambda = 3.8$ , keine Befeuchtung,  $0.55 \text{ V}$  bei  $22 \text{ A}$ ). Die Messergebnisse dienen als Benchmark für zukünftige Strömungssimulationen, um auf Basis dieser Ergebnisse geometrische Maßnahmen zu identifizieren, die einer Strömungsungleichverteilung begegnen können. Damit wird ein Beitrag zur Steigerung der Effizienz von Brennstoffzellenstapeln geleistet.

## Einleitung

Brennstoffzellen eignen sich als Energiewandler für viele Einsatzbereiche wie die Versorgung dezentraler Stromnetze, der Notstromversorgung oder der Elektromobilität. Besonders verbreitet sind dabei Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC). Eine Brennstoffzelle besteht dabei üblicherweise aus zwei Bipolarplatten, welche die Anode und Kathode einer Zelle darstellen. In die Platten eingebracht ist eine Struktur von Mikrokanälen, das sogenannte flow field, durch welche die Reaktionsgase fließen (vgl. Abb. 1). Die Reaktionsgase werden dann durch ein poröses Gewebe oder Geflecht, die so genannte Gasdiffusionslage (GDL), fein über die gesamte aktive Zelloberfläche verteilt. Bipolarplatten und zugehörige GDL werden durch eine mit Katalysator beschichtete ionenleitende Membran getrennt, welche gleichzeitig als Elektrolyt dient.

Für viele Anwendungen ist die Leistung einer einzelnen Brennstoffzelle nicht ausreichend. Daher werden mehrere Zellen zu einem Stapel zusammengeschlossen. Die Versorgung der Zellen mit Reaktionsgasen erfolgt dabei durch jeweils ein gemeinsames Rohrverzweigungssystem für die Zu- und Ableitung der Reaktionsgase. Diese sogenannten Manifolds sind in der Explosionsdarstellung des Aufbaus eines Brennstoffzellenstapels in Abbildung 1 gemeinsam mit einem fluidmechanischen Modell des Brennstoffzellensystems zu sehen.

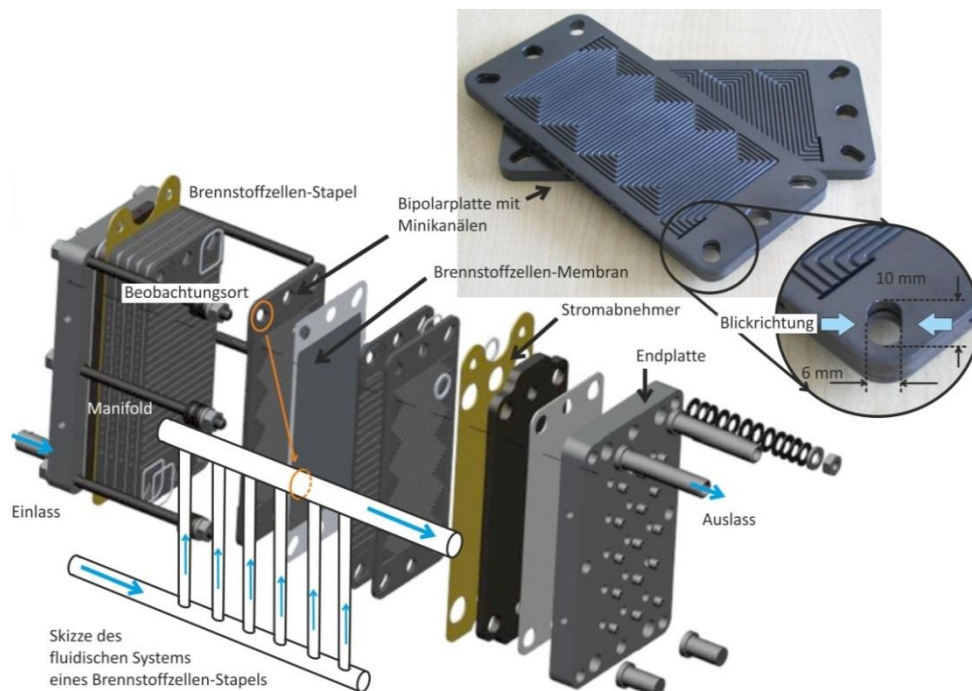


Abb.1: Explosionsdarstellung eines Brennstoffzellenstapels. Rechts oben: Detailansicht einer Bipolarplatte mit Durchtrittsöffnung des Manifolds mit eingezeichneter Blickrichtung des MM-LDAs

Da der Ladungstransport durch den gesamten Brennstoffzellenstapel hindurch erfolgt, ist eine Gleichverteilung der Reaktionsgase auf alle Brennstoffzellen essenziell, da eine Ungleichverteilung zu lokalen Spannungsabfällen und damit zu einer niedrigeren Gesamtleistung (siehe Chang et al. 2006) sowie einer geringeren Lebensdauer der Brennstoffzellen führt. Die Gasverteilung ist dabei unter anderem von der Struktur von GDL und des flow fields, der Verpressung der Zellen sowie der Wechselwirkung der Zellen mit den gemeinsamen Manifolds abhängig. Um eine Gleichverteilung der Reaktanden zu gewährleisten, kann die Geometrie Manifolds dahingehend anhand von Computational Fluid Dynamics (CFD)–Simulationen optimiert werden. Aufgrund mangelnder Referenzwerte gestaltet sich dieses a-priori-Vorgehen jedoch sehr schwierig (Grega et al. 2007, Lebaek et al. 2010). Um in den

optisch schwer zugänglichen Manifolds Strömungsgeschwindigkeitsmessungen durchführen zu können, wurde daher bereits in früheren Arbeiten ein Laser-Doppler-Anemometer (LDA) entwickelt und eingesetzt, welches sich besonders für die örtlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessung in kleinen Rohrleitungen eignet. Dieser Sensor beruht auf der Ausnutzung von Multimode-Strahlung statt singlemodiger Strahlung, so dass es gelingt, das Messvolumen des LDA deutlich zu reduzieren. Aufgrund der geringen Kohärenz der Multimode-Strahlung wird die Interferenz im Großteil des Überschneidungsbereichs der Teilstrahlen unterdrückt und das LDA-typische Streifensystem bildet sich nur noch in einem schmalen Bereich in der Mitte des Überschneidungsbereichs. Üblicherweise beträgt die Länge des Messvolumens im Gegensatz zum konventionellen LDA nur noch ca. (1..5) % der Länge des Überschneidungsbereichs (Büttner und Czarske, 2001 & 2004). Es wurde ein speziell angepasstes Multimode-LDA (MM-LDA) in vorangegangenen Arbeiten entwickelt und anhand von Vergleichsmessungen mittels Particle Image Velocimetry (PIV) validiert und für erste Strömungsmessungen im fluidmechanischen Modell eines Brennstoffzellenstapels eingesetzt (Burgmann et al 2013, Schmieder et al. 2014). In dieser Arbeit werden nun die notwendigen Schritte zur Durchführung von Strömungsmessungen im Manifold eines betriebenen Brennstoffzellenstapels aufgezeigt und durchgeführt. Abschließend werden erstmalig Messungen im Manifold eines betriebenen Brennstoffzellenstapels vorgestellt.

### Aufbau eines Brennstoffzellenstapels mit optischem Zugang

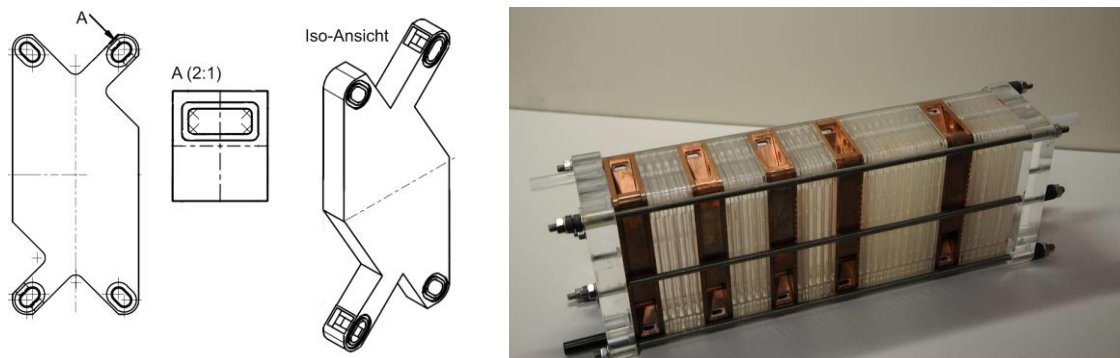


Abb.2.: Links: Skizze der ausgeführten Zwischenplatten mit Sichtfenster. Rechts: Aufbau eines Versuchsstacks mit insgesamt 5 Zwischenelementen mit optischem Zugang.

Nachdem in früheren Messungen an einem Manifold-Modell im Vergleich mit Particle-Image-Velocimetry (PIV) gezeigt werden konnte, dass sich das MM-LDA für Strömungsgeschwindigkeitsmessungen in kleinen Rohren eignet und valide Geschwindigkeitsdaten liefert (Burgmann et al. 2013), sollten als nächster Schritt Strömungsprofile im Manifold eines realen Brennstoffzellenstapels aufgenommen werden. Die genannten Messungen im Manifold-Modell wurden in Wasser durchgeführt. D.h. es gilt nun, Strömungsmessungen mit dem MM-LDA in einer geseedeten Gasströmung zu realisieren. Dafür wurden zunächst aus Plexiglas Dummy-Brennstoffzellen gefertigt, deren flow field, Manifold-Geometrie und Größe denen realer Brennstoffzellen entsprechen und einzig den elektrochemischen Betrieb nicht ermöglichen. Dieser Versuchsstapel ermöglicht Strömungsmessungen in unterschiedlichen Medien unter Berücksichtigung der entsprechenden Reynoldszahl sowie einen Test des Seeding einer Gasströmung ohne Gefährdung der Brennstoffzellenmembranen durch das Seeding selbst. Da Brennstoffzellenstapel durch das gasdichte Verpressen einzelner Brennstoffzellen hergestellt werden, ist ein Zugang für laseroptische Strömungsmessungen üblicherweise nicht gegeben. Um diesen zu ermöglichen, mussten in diesen Versuchsstapel optische Zugänge eingefügt werden. Diese werden durch Fenster mit einer freien Apertur von etwa

7 x 4 mm<sup>2</sup> in elektrisch leitfähigen Zwischenplatten realisiert, welche als Skizze in Abbildung 2 links dargestellt sind. Die Fenster sind im Detail A zu erkennen.

Diese aus Kupfer gefertigten Platten ermöglichen die Erfassung von Strömungsprofilen entlang der kurzen Achse des Manifoldquerschnittes, welche eine Breite von 6 mm aufweist. Die so gewährleisteten optischen Zugänge zu den Manifolds wurden an fünf verschiedenen Stellen in den Versuchsstapel eingefügt, sodass Geschwindigkeitsmessungen vom Einlass aus gesehen vor den Zellen 1, 5, 10, 15 und 25 ermöglicht wurden. Der zusammengebaute Versuchsstapel, bestehend aus insgesamt 32 Zellen und 5 Zwischenplatten mit integrierten Fenstern, ist in Abbildung 2 rechts dargestellt.

Der für die Messungen verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 links dargestellt. Rechts in Abbildung 3 ist eine Detailaufnahme eines optischen Zuganges mit für eine Messung ausgerichtetem MM-LDA zu sehen. Da die Manifolds und damit auch die optischen Zugänge gegenüber der Vertikalen um etwa 45° geneigt sind, wurde der Modell-Stapel für die durchgeführten Messungen um diesen Winkel verdreht. Mit diesem Versuchsaufbau ist es möglich, Messungen in dem Versuchsstapel mit dem MM-LDA sowohl in Wasser, als auch in Luft durchzuführen.

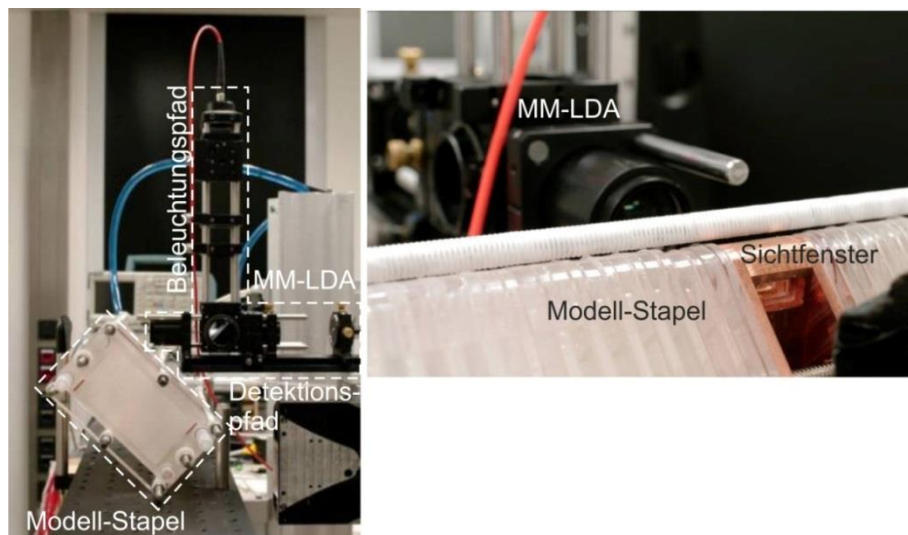


Abb.3: Links: Aufbau des Modell-Zellstapels zur Messung mit dem MM-LDA. Rechts: Detailansicht des Modell-Stapels mit Sichtfenster und ausgerichtetem MM-LDA.

### CFD-Simulation der Durchströmung eines Brennstoffzellen-Stapels

Da die durchgeführten Messungen der Validierung und Kalibrierung von Strömungssimulationen dienen sollen, wurden solche mit dem CFD-Paket AVL Fire durchgeführt. Dazu wurde ein CAD-Modell des Brennstoffzellenstapels in ein Rechengitter aus  $10,4 \cdot 10^6$  hexagonalen Zellen übersetzt. Das flow field der einzelnen Brennstoffzellen wurde dabei bereits durch eine poröse Schüttung ersetzt, um Speicherbedarf und Rechenzeit einzusparen. Das Vorgehen hierfür ist in Abbildung 4 dargestellt. Es werden die Druckverluste von Schüttungen unterschiedlicher Schüttdichten bei verschiedenen Volumenströmen simuliert und daraufhin über die Carman-Kozeny-Gleichung (Carman, 1937) an den Druckabfall des flow fields angepasst. Anschließend werden die flow fields aller Brennstoffzellen durch eine entsprechende poröse Schüttung ersetzt.

Die Strömung wird mit Hilfe eines Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Ansatzes berechnet. Es wird das nicht-lineare 4-Gleichungs-Wirbelviskositätsmodell nach Hanjalic et al. (2004) genutzt, welches k- $\zeta$ -f-Modell genannt wird. Dabei ist  $\zeta$  das Geschwindigkeitsverhältnis  $\zeta = \bar{u}/k$  und k die turbulente kinetische Energie. Das k- $\zeta$ -f-Modell nutzt statt einer Dämpf-

funktionsfunktion in Wandnähe (wie z.B. das  $k-\epsilon$ -Modell) ein sogenanntes Hybrid Wall Treatment, indem die zusätzliche Gleichung für  $\zeta$  eingeführt wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht einen allmählichen Wechsel von der Beschreibung der viskosen Unterschicht zur Wandfunktion. Es konnte gezeigt werden, dass das  $k-\zeta$ -f-Modell gegenüber z.B. dem  $k-\epsilon$ -Modell größere Gitterstrukturen erlaubt, was vorteilhaft für die Vernetzung und den Speicherbedarf ist.

Ein Simulationsergebnis für die turbulente Durchströmung eines Brennstoffzellenstapels ist beispielhaft in Abbildung 4 unten dargestellt. Aus diesen Daten können anschließend Strömungsprofile für den Vergleich mit den Messdaten extrahiert werden.

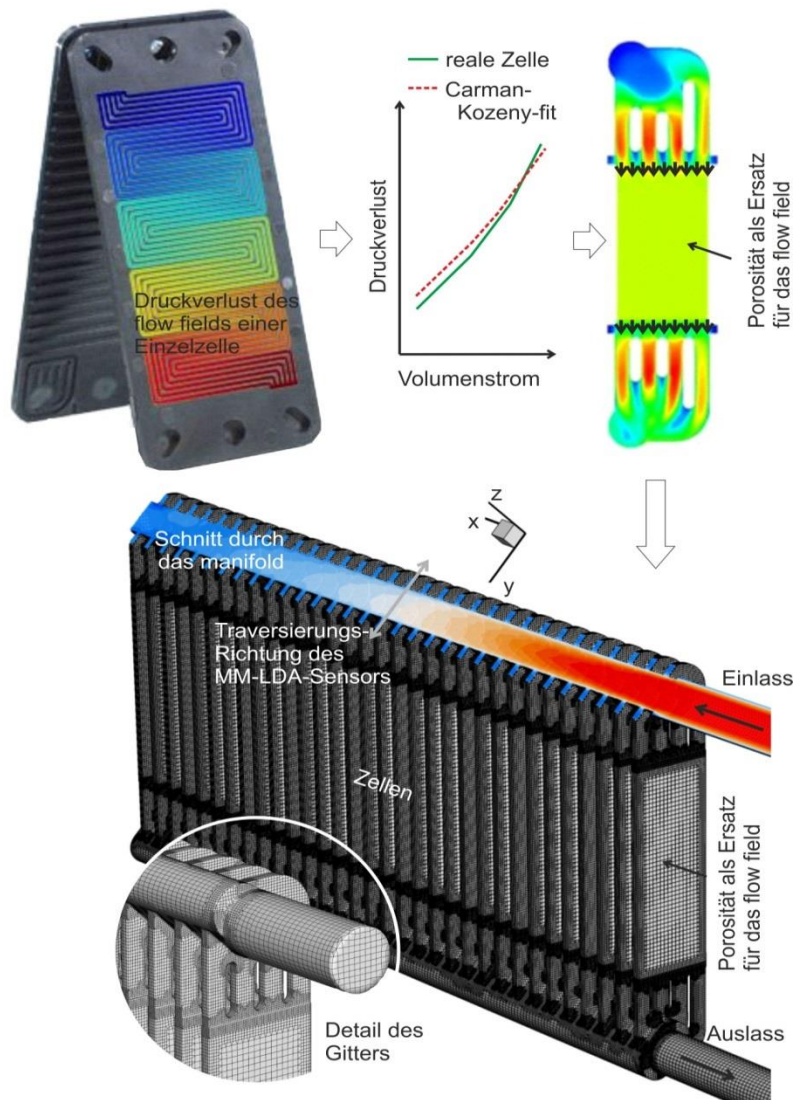


Abb.4: Strategie für die Simulation der Durchströmung eines Brennstoffzellen-Stapels

### Aerosolerzeugung für laser-optische Messungen in einem betriebenen Brennstoffzellen-Stapel

Da auch Messungen an einem betriebenen Brennstoffzellenstapel durchgeführt werden sollten, lag ein Haupt-Augenmerk darauf, sicherzustellen, dass die zugeführten Streupartikel sowohl dem Strömungsfeld folgen können und die Strömungsstrukturen innerhalb der Bipolarplatten durch Ablagerungen nicht verändern als auch den Elektrochemischen Betrieb nicht stören. Diese Bedingungen wurden von anderen Gruppen (Yoon et al. 2006 und Sugii & Okamoto 2006) mit Wassertröpfchen bzw. Olivenölseeding bezüglich des Folgeverhaltens

erfüllt, jedoch konnte ein Brennstoffzellenbetrieb bei unveränderter Leistung nicht gewährleistet werden. In dieser Arbeit kam daher ein Laskin-Partikelgenerator zum Einsatz, welcher Ethylenglykoltropfen mit einer Partikelgrößenverteilung erzeugt, dessen spektraler Peak bei etwa 1,1  $\mu\text{m}$  liegt. Die Partikelgrößenverteilung ist in Abbildung 6 oben dargestellt. In vorangegangenen Arbeiten wurde das Folgeverhalten solch kleiner Ethylenglykoltropfen und deren Einfluss auf den Brennstoffzellen-Betrieb in einer vereinfachten Einkanal-Brennstoffzelle bereits untersucht (Burgmann et al. 2011 & 2013). Um den Einfluss des zugeführten Seedings bei größerem Volumenstrom auf die Leistung des hier genutzten 10-zelligen-Brennstoffzellenstapels zu erfassen, wurde der zeitliche Spannungsverlauf des Brennstoffzellenstapels mit und ohne Seeding gemessen. Wie in Abbildung 5 unten dargestellt ist, ist keine auf das Seeding zurückzuführende Verringerung der Brennstoffzellenleistung festzustellen. Zudem ist zu erkennen, dass auch nach mehrmaligem Anfahren des Brennstoffzellenbetriebes bei geseedeter Kathodenluft keine Leistungsbeeinträchtigung festzustellen ist. Der leicht fallende Spannungsverlauf über der Zeit ist in diesem Falle auf ein Austrocknen der Membran zurückzuführen, da unbefeuchtete Kathodenluft mit relativ hoher Stöchiometrie ( $\lambda = 3.8$ ) zugeführt wurde. Es steht daher mit dem verwendeten Laskin-Seeder und dem verwendeten Ethylenglykol als Seeding-Material eine Möglichkeit zur Verfügung, die zu untersuchende Manifoldströmung mit Partikeln zu versetzen, welche sowohl der Strömung folgen können als auch den Brennstoffzellenbetrieb nicht merklich beeinflussen.

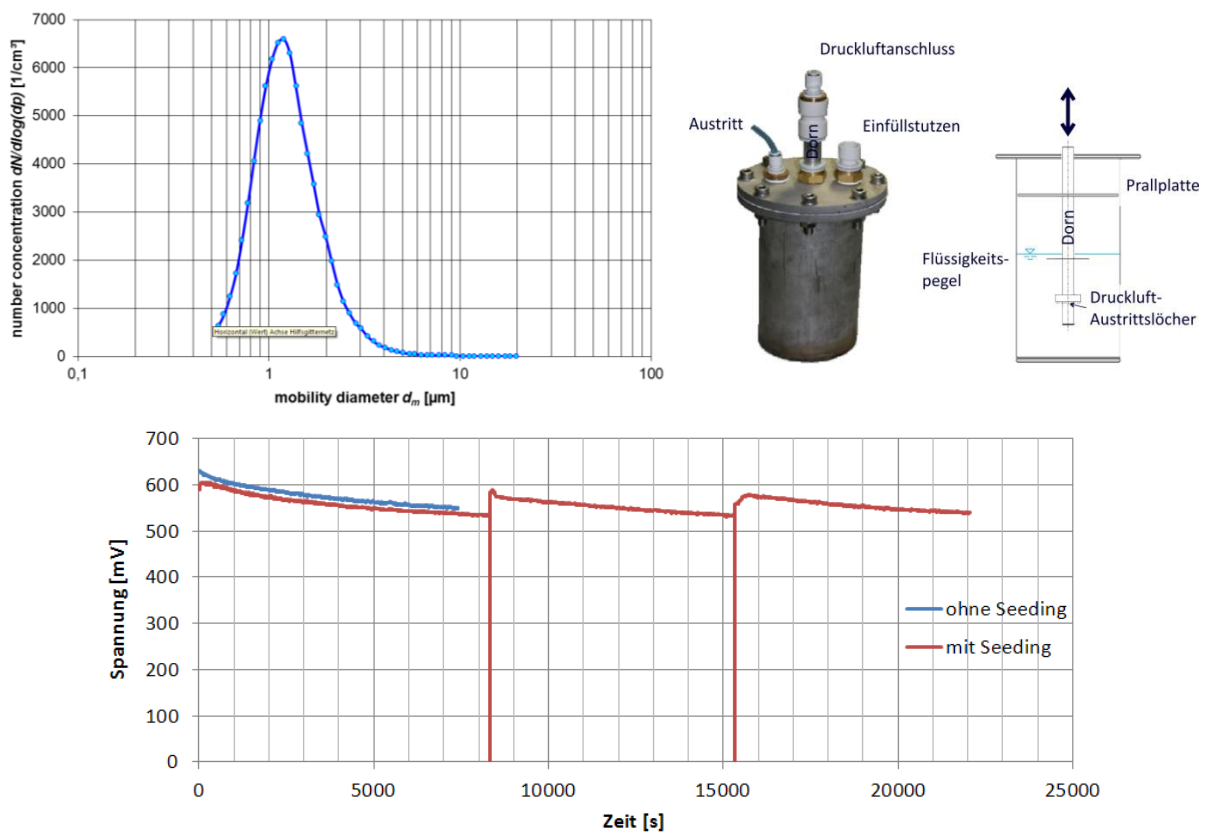


Abb.5: Oben: Erzeugung eines schmalbandigen Aerosol-Spektrums aus Ethylenglykol. Unten: Test des Seedings der Luftzuführung an einem betriebenen Brennstoffzellen-Stapel; blau: Spannungsverlauf ohne Ethylenglykol in der Luft, rot: geseedete Luft bei dreimaligem Start des Brennstoffzellen-Betriebs

## MM-LDA-Messungen am Modell-Zellstapel in Wasser und Luft

An dem oben beschriebenen Versuchsstapel mit optischen Zugängen wurden Messungen für eine turbulente Strömung im Einlaufmanifold durchgeführt. Die zugehörige Reynoldszahl betrug dabei  $Re = 3000$  bezogen auf den Durchmesser des Einlaufes. In einem ersten Schritt wurde der Versuchsstapel mit Wasser durchströmt, um Vergleichsdaten für spätere, kompliziertere Messungen in Luft zu erhalten. Dabei wurden fluoreszierende Polystyrolkugeln mit einem mittleren Durchmesser von  $2,07 \mu\text{m}$  (Farbstoff Nilblau A, ex/em 635/685 nm) zum Einsatz (Schmieder et al. 2014). In einem weiteren Schritt wurden diese Messungen mit Luft und dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Ethylenglykolseeding wiederholt. Dabei wurde in beiden Fällen eine Ortsauflösung von unter  $100 \mu\text{m}$  erreicht. Aufgrund der zu geringen detektierbaren Lichtleistung konnte allerdings in der Luftströmung kein Fluoreszenzlicht zur Strömungsmessung verwendet werden. Dennoch waren Messungen bis nahe an die Wand möglich. In Abbildung 6 sind die erhaltenen Strömungsprofile an den zugänglichen Positionen, normiert auf die mittlere Geschwindigkeit am Einlass, im Vergleich mit den aus den CFD-Simulationen extrahierten Strömungsprofilen dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung der experimentellen Werte festzustellen. Es kann festgehalten werden, dass es möglich ist, eine partikelbeladene Luftströmung im Manifold eines Brennstoffzellenstapels mit hoher Genauigkeit zu vermessen. Damit ist die Grundlage für erstmalige In-situ-Messungen in einem betriebenen Brennstoffzellenstapel geschaffen. Anhand der hier dargestellten Ergebnisse lässt sich auch feststellen, dass im Vergleich mit den MM-LDA-Daten mit zunehmendem Abstand zum Einlass die Strömungsgeschwindigkeiten durch die CFD zunehmend unterschätzt werden. Dies verdeutlicht den zwingend notwendigen Vergleich solcher für Designzwecke einzusetzenden Simulationen mit realen Messdaten, wenn quantitativ belastbare Aussagen getroffen werden sollen.

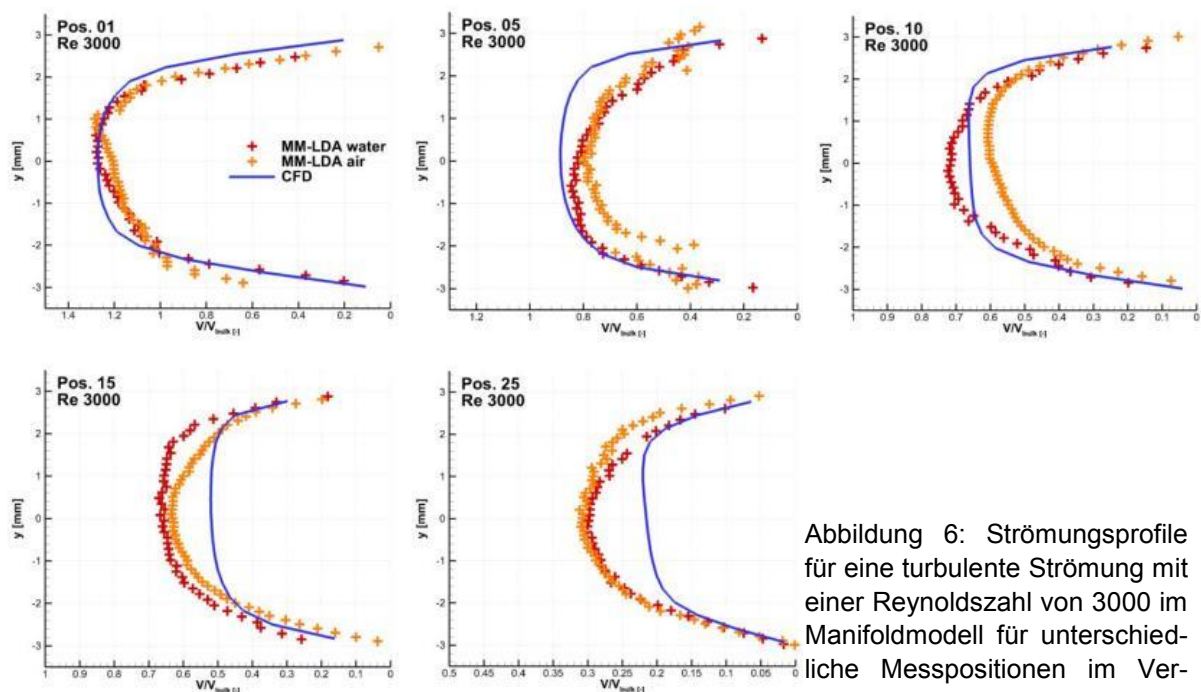


Abbildung 6: Strömungsprofile für eine turbulente Strömung mit einer Reynoldszahl von 3000 im Manifoldmodell für unterschiedliche Messpositionen im Vergleich zu CFD

## MM-LDA-Messung im Manifold eines betriebenen Brennstoffzellenstapels

Im Anschluss an diese Voruntersuchungen und Validierungsmessungen für die MM-LDA-Messtechnik bei geseedeter Luftströmung wurden weltweit erstmals Messungen in einem

betriebenen Brennstoffzellenstapel durchgeführt. Dazu musste ein funktionsfähiger Stack unter Zuhilfenahme der für die vorhergehenden Messungen gefertigten Zwischenplatten mit Sichtfenstern aufgebaut werden. Der Aufbau dieses Stapels ist in Abbildung 7 dargestellt. Zur Erhaltung der Leitfähigkeit, zum Korrosionsschutz und zum Vermeiden des Herauslösen von membranschädigenden Kupfer-Ionen mussten die Zwischenplatten zudem vergolddet werden. Der so aufgebaute funktionsfähige Stapel besteht aus 10 Zellen und bietet optischen Zugang zu den Manifolds vor den Zellen 1, 5 und 10. Vor der Durchführung von Strömungsmessungen wurde der Brennstoffzellenstapel charakterisiert. Die entsprechende Polarisationskurve ist in Abbildung 8 dargestellt. Als Betriebspunkt für die folgenden Untersuchungen wurde eine Spannung von 0,55 V bei einer Stromstärke von 22 A gewählt. Sauerstoff wurde durch unbefeuchtete Luft bei einer Stöchiometrie der Kathode von 3,8 zur Verfügung gestellt (vgl. zeitl. Spannungsverlauf in Abb. 5).

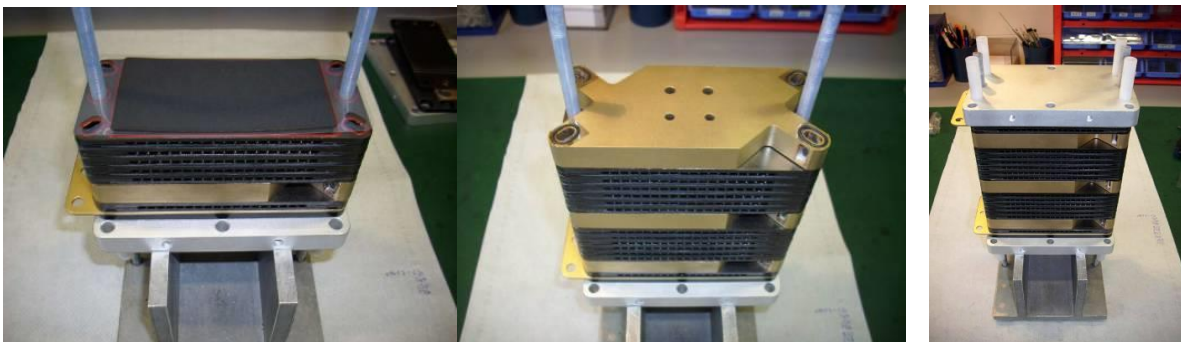


Abbildung 7: Aufbau des Brennstoffzellenstapels mit Zwischenplatten und Sichtfenstern

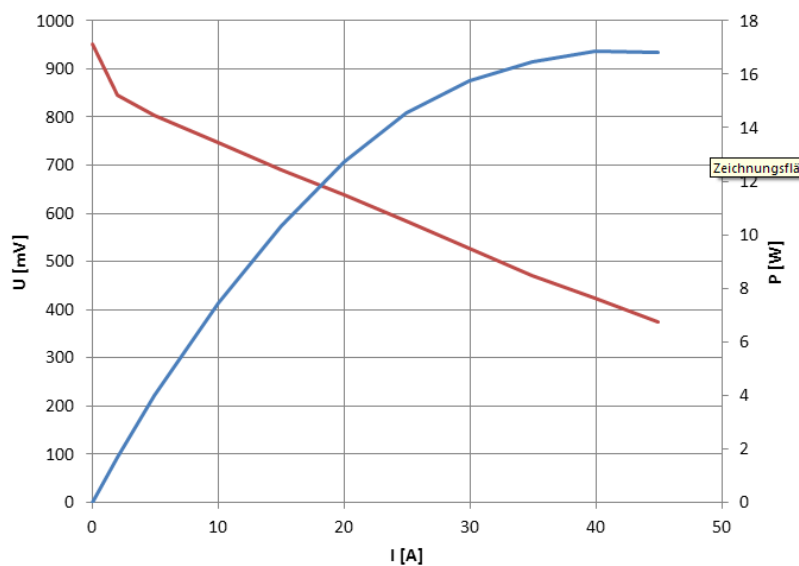


Abbildung 8: Polarisationskurve des vermessenen Brennstoffzellen-Stapels bei  $\lambda = 3,8$

Der verwendete Messaufbau ist in Abbildung 9 links dargestellt. Die Strömungsmessungen wurden abermals ausschließlich mittels des MM-LDA mit Detektion in Vorwärtsrichtung durchgeführt. Für eine Ausrichtung der Sichtfenster des Stacks senkrecht zur optischen Achse des MM-LDA musste der Stack abermals um  $45^\circ$  geneigt werden.

Die erhaltenen Strömungsprofile sind in Abbildung 9 rechts dargestellt. In rot und blau eingezeichnet sind die Profile von Position 1 und 5. Aufgrund der zu geringen Streulichtleistung konnten an Position 10 keine Geschwindigkeitsdaten gemessen werden.



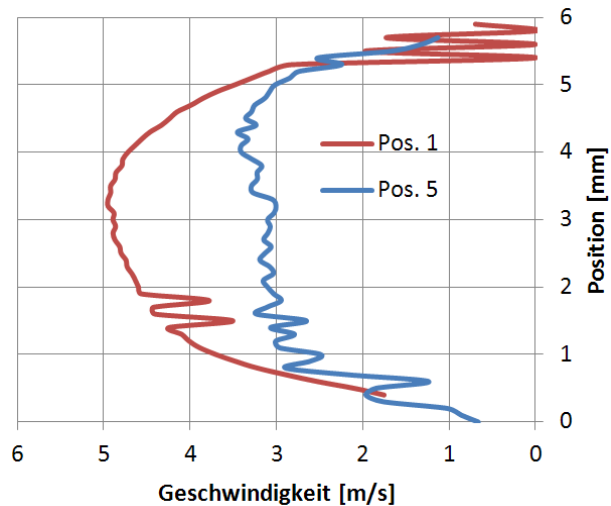
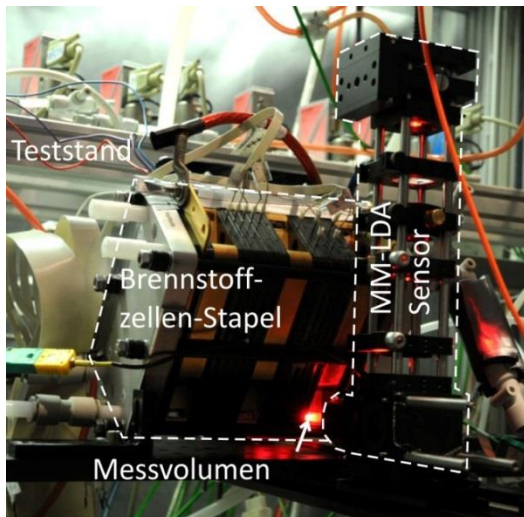


Abbildung 9: Brennstoffzellen-Stapel im Teststand und Ergebnis der Messungen

## Zusammenfassung und Ausblick

Anhand von Messungen in einem Modell-Brennstoffzellen-Stapel konnte eine gute Übereinstimmung zwischen mit dem MM-LDA-Sensor gemessenen Strömungsprofilen unter Verwendung von Wasser und Luft als Fluid aufgezeigt werden. Dabei wurde eine Unterschätzung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten durch CFD-Simulationen deutlich, was den dringenden Bedarf an Referenzdaten für numerische Simulationen verdeutlicht. Anschließend konnten zum weltweit ersten Mal Strömungsgeschwindigkeitsmessungen an einem betriebenen Brennstoffzellenstapel durchgeführt werden. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse können die Parameter für CFD-Simulationen entsprechend angepasst werden, um anschließend a-priori geometrische Maßnahmen zur Optimierung für das Manifold eines Brennstoffzellenstapels, z.B. eine geometrische Verjüngung oder Erweiterung des Querschnitts des Zulauf- und des Ablauf-Manifolds, mittels numerischer Simulationen gefunden werden. Auf diese Weise kann es gelingen, eine Gleichverteilung der Reaktionsmedien über die einzelnen Zellen eines Brennstoffzellenstapels zu erreichen.

## Dankesworte

Das Forschungsvorhaben IGF 407 ZBG „Entwicklung eines laseroptischen Geschwindigkeitssensors mit hoher Ortsauflösung zur Untersuchung von Gas- und Flüssigkeitsströmen in Verzweigungssystemen am Beispiel eines Brennstoffzellenstapels“ (Laufzeit 01.01.2012 - 31.03.2015) wurde im Programm zur Förderung der "Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)" vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die AiF finanziert.

## Literatur

Carman, P.C., 1937: "Fluid flow through granular beds", Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, 15, 150-166

Chang, P. A. C., St-Pierre, J., Stumper, J., Wetton, B., 2006: "Flow distribution in proton exchange membrane fuel cell stacks", Journal of Power Sources, 162(1), pp. 340-355

Büttner, L., Czarske, J., 2001: "A multimode-fibre laser-Doppler anemometer for highly spatially resolved velocity measurements using low-coherence light", Meas. Sci. Technol. 12, pp. 1891-1903

Büttner, L., Czarske, J., „Multimode-Laser-Doppler-Anemometer zur Vermessung turbulenter Grenzschichten“, 10. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, pp. 8.1 - 8.6, Rostock, 10.-12. Sept. 2002

Büttner, L., Czarske, J., 2004: „Multi-mode fibre laser Doppler anemometer (LDA) with high spatial resolution for the investigation of boundary layers“, Experiments in Fluids 36, pp. 214-216

Burgmann, S.; van der Schoot, N.; Asbach, C.; Wartmann, J. & Lindken, R., 2011: “Analysis of Tracer Particle Characteristics for Micro PIV in Wall-bounded Gas Flows” La Houille Blanche – Revue internationale de l’eau (International Journal of Water), 4, 55-61

Burgmann, S.; Blank, M.; Panchenko, O. & Wartmann, J., 2013: “ $\mu$ PIV measurements of two-phase flows of an operated direct methanol fuel cell” Exp Fluids, 54:1513

Burgmann S., Kinaci M. E., Feierabend L., Schwarzer F., König J., Büttner L., Czarske J., 2013: „Laser-Doppler-Anemometer mit geringer örtlicher Kohärenz zur Strömungsmessung in kleinen Rohrleitungen am Beispiel eines Brennstoffzellen-Stapels“, Fachtagung “Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”, GALA13, München, Deutschland, 3.-5. September 2013

Grega, L., McGarry, M., Begum, M., Abruzzo, B., 2007: “Flow Characterization of a Polymer Electronic Membrane Fuel Cell Manifold and Individual Cells Using Particle Image Velocimetry”, Journal of Fuel Cell Science and Technology, 4, pp. 272-279

Hanjalic, K.; Popovac, M. & Hadziabdic, M. A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD, Int. J. Heat Fluid Flow, 2004, 25, 1047–1051

Lebaek, J., Andreasen, M. B., Andresen, H. A., Bang, M., Kaer, S. K., 2010: “Particle Image Velocimetry and Computational Fluid Dynamics Analysis of Fuel Cell Manifold”, Journal of Fuel Cell Science and Technology, 7, pp. 031001-1-031001-10

Schmieder F., Burgmann S., Kinaci E. M., Büttner L., Czarske J., 2014: „Optische Strömungsmessung im realen Manifold eines Brennstoffzellenstapels mit Hilfe eines Multimode-Laser-Doppler-Anemometers“, Fachtagung “Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”, GALA14, Karlsruhe, Deutschland, 9.-11. September 2014

Sugii, Y. & Okamoto, K., 2006: Velocity Measurement of Gas Flow Using Micro PIV Technique in Polymer Electrolyte Fuel Cell Proceedings of ICNMM2006 Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, June 19-21, 2006, Limerick, Ireland

Yoon, S.; Ross, J.; Mench, M. & Sharp, K., 2006: Gas-phase particle image velocimetry (PIV) for application to the design of fuel cell reactant flow channels Journal of Power Sources, 160, 1017–1025