

Optische Strömungsmessung im realen Manifold eines Brennstoffzellenstapels mit Hilfe eines Multimode-Laser-Doppler-Anemometers

Optical flow measurement in the real manifold of a fuel cell stack using a multimode laser Doppler anemometer

F. Schmieder¹, S. Burgmann², M. E. Kinaci², L. Büttner¹, J. Czarske¹

¹Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

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

wandnahe Messung, Fluoreszenz, Strömungssimulation in Brennstoffzellen-Stapeln
near wall measurements, fluorescence, computational fluid mechanics in fuel cell stacks

Zusammenfassung

Brennstoffzellen besitzen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten von der Raumfahrt über die Automobilbranche bis hin zu autarker Energieversorgung. Um die notwendigen Spannungen bereitstellen zu können, werden Brennstoffzellen zu Stapeln elektrisch in Reihe geschlossen und durch ein gemeinsames Rohrverzweigungssystem, das sogenannte Manifold, mit Wasserstoff bzw. Luft versorgt. Die Leistung eines solchen Brennstoffzellenstapels ist dabei stark von einer Gleichverteilung der Reaktanden zwischen den einzelnen Zellen abhängig, welche wiederum von den Strömungsverhältnissen im Manifold beeinflusst wird. Computersimulationen werden durchgeführt, um eine optimale Durchströmungsgeometrie des Manifolds zu ermitteln. Gemessene Strömungsprofile als Referenzwerte sind für diese Simulationen unabdingbar. Allerdings behindert der sehr kompakte Aufbau eines Brennstoffzellenstapels den Einsatz etablierter Messtechniken wie Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) oder Particle Image Velocimetry (PIV), welche entweder nicht die notwendige Ortsauflösung aufweisen, einen zu großen optischen Zugang benötigen oder keinen ausreichenden Arbeitsabstand gewährleisten können. Bisher beschränkten sich Messungen von Strömungsprofilen daher auf vereinfachte Modelle von Brennstoffzellenstapeln. Um die Probleme des optischen Zugangs und der Ortsauflösung zu umgehen, wird ein LDA genutzt, welches durch die Nutzung von multimodigem Licht mit geringer örtlicher Kohärenz eine Ortsauflösung im Mikrometerbereich ermöglicht. Gleichzeitig weist dieser Sensor eine geringe relative Geschwindigkeitsunsicherheit von $7 \cdot 10^{-4}$ auf. Durch die Nutzung fluoreszierender Streupartikel ist zudem eine Messung in Rückwärtsrichtung durch einen einzigen kleinen optischen Zugang möglich. Der Sensor eignet sich daher hervorragend für Strömungsmessungen an Verzweigungssystemen mit Durchmessern im Millimeterbereich wie zum Beispiel dem Manifold eines Brennstoffzellenstapels. Erstmals werden in diesem Beitrag Messungen von Strömungsprofilen im realen Manifold eines Brennstoffzellenstapels mit hoher Ortsauflösung vorgestellt. Diese wurden für verschiedene Arbeitspunkte des Stapels mit entsprechend unterschiedlichen Reynoldszahlen durchgeführt. Die Messergebnisse werden mit am ZBT durchgeführten Strömungssimulationen verglichen. Auf Basis dieser Ergebnisse können geometrische Maßnahmen identifiziert werden, um einer Strömungsungleichverteilung zu begegnen. 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, Notstromversorgung oder Elektromobilität. Besonders verbreitet sind dabei Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC). Eine Brennstoffzelle besteht dabei üblicherweise aus zwei Bipolarplatten, in welchen durch Mikrokanäle, das sogenannte flow field, die Reaktionsgase fließen. Eine Feinverteilung über der gesamten aktiven Fläche erfolgt über die so genannte Gas-Diffusionslage (GDL), die aus einem Kohlestoffvlies besteht und darüber hinaus die Ableitung des elektrischen Stromes verbessert. Diese Bipolarplatten bilden die Anode und die Kathode und sind durch die membrane electrolyte assembly (MEA) voneinander getrennt. Die MEA besteht aus einer ionenleitenden Membran als Elektrolyten, auf welche auf jeder Seite von innen nach außen eine Katalysatorschicht und die GDL aufgebracht sind. Um die benötigten Spannungen und Leistungen erzielen zu können, werden Brennstoffzellen zu Stapeln zusammengeschlossen. Der Aufbau eines Brennstoffzellenstapels ist in Abbildung 1 in Explosionsdarstellung abgebildet.

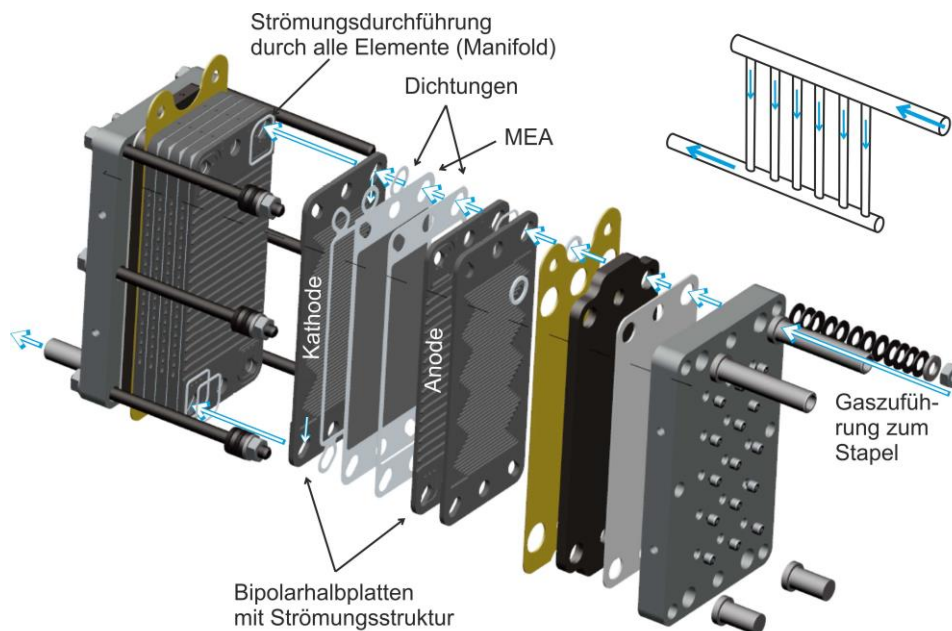


Abb.1: Explosionsdarstellung eines Brennstoffzellenstapels. Rechts oben: Vereinfachtes Modell eines Brennstoffzellenstapels zur Veranschaulichung der Strömungsführung

Da der Ladungstransport durch alle Brennstoffzellen eines Stapels hindurch erfolgt, ist es wichtig, dass alle Brennstoffzellen zu gleichen Teilen mit den notwendigen Reaktionsedukten versorgt werden, da eine Ungleichverteilung zu einem lokalen Spannungsabfall und damit einer niedrigeren Gesamtleistung führt (siehe Chang et al. 2006). Die Gasverteilung ist dabei unter anderem von der Struktur von Gasdiffusionslage und flow field, der Verpressung des Stapels sowie der Strömung in der gemeinsamen Versorgungs- bzw. Ableitung aller Zellen, dem sogenannten Manifold (Abb. 1), abhängig. Eine a-priori-Abschätzung der richtigen Manifold-Geometrie zum Erreichen einer Gleichverteilung anhand von Simulationen ist aufgrund mangelnder Referenzwerte zum Beispiel in Form von Strömungsprofilen schwierig. Ziel ist es daher, durch die lokale in-situ-Messung der Strömungsverteilung im Manifold eines Brennstoffzellenstapels eine entsprechende Datenbasis aufzubauen. Aufgrund der Verpressung des Brennstoffzellenstapels und der kleinen Geometrien eignen sich dazu ausschließlich nichtinvasive Strömungsmessverfahren. Da in einem Brennstoffzellenstapel nur sehr kleine

optische Zugänge realisierbar sind, scheint die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) ein geeignetes Verfahren zu sein. Diese weist jedoch üblicherweise eine Ortsauflösung im Millimeterbereich auf, was für hochauflösende Strömungsmessungen in kleinen Rohren wie dem Manifold eines Brennstoffzellenstapels nicht ausreicht. Die in diesem Beitrag vorgestellten Messungen wurden daher mit einem Multimode-LDA durchgeführt, welches durch die Verwendung von transversal multimodigem Licht eine erheblich verbesserte Ortsauflösung von 65 μm an Luft erreicht (siehe Burgmann, Schwarzer et al. 2013).

MM-LDA-Sensor

Der in diesem Projekt entwickelte und verwendete Sensor ist eine Abwandlung des bekannten LDA-Prinzips, bei welchem das mit der Dopplerfrequenz modulierte Streulicht von einem Partikel ausgewertet wird, welcher das Interferenzgebiet zweier sich schneidender Laserstrahlen passiert, die durch einen Strahlteiler aus einer Lichtquelle erzeugt wurden. Üblicherweise nimmt das Interferenzgebiet dabei den gesamten Kreuzungsbereich der sich schneidenden Laserstrahlen ein. Da nicht zwischen verschiedenen Orten unterschieden werden kann, an denen streuende Partikel das Interferenzgebiet passieren, wird die Ortsauflösung durch die Länge des Kreuzungsbereiches bestimmt. Eine Verringerung der örtlichen Kohärenz des verwendeten Lichtes führt nun zu einem verringerten Interferenzkontrast über weite Teile des Interferenzgebietes der sich kreuzenden Teilstrahlen (siehe Büttner, Czarske 2004). Mit der Dopplerfrequenz modulierte Signale sind dann nur noch aus einem schmalen Bereich in der Mitte des Kreuzungsbereiches empfangbar. So wird bei fast gleichbleibender Länge des Kreuzungsbereiches die Ortsauflösung stark erhöht. Um die örtliche Kohärenz des verwendeten Lichtes möglichst gering zu halten, kommen bei unserem Sensor eine Breitstreifendiode mit einer zentralen Wellenlänge von 635 nm sowie eine Multimode-Glasfaser mit einem Kerndurchmesser von 50 μm zum Einsatz. Damit wird bei einem Arbeitsabstand von 50 mm eine Ortsauflösung von 65 μm an Luft und 92 μm in Wasser erreicht. Der bei Laser-Doppler-Anemometern üblicherweise auftretende „Badewanneneffekt“, die Variation des Streifenabstandes im Messvolumen, wird durch die Verwendung von Multimodestrahlung ebenfalls erheblich vermindert (siehe Büttner, Czarske 2001 sowie Büttner, Czarske 2002), so dass Strömungsgeschwindigkeiten mit einer relativen Unsicherheit von $7 \cdot 10^{-4}$ gemessen werden können. Zudem wurden mit diesem Sensor bereits Turbulenzgrade unter 0,6 % gemessen (siehe Büttner, Czarske 2004), bei entsprechender Optimierung soll-

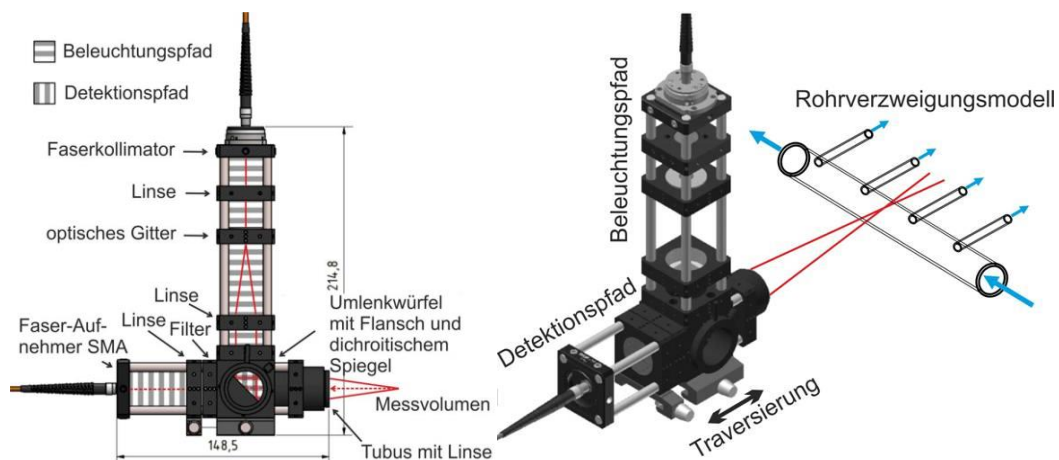


Abb.2.: Links: Aufbau des MM-LDA mit Detektion in Rückwärtsrichtung und dichroitischen Spiegel für die Nutzung von Fluoreszenzlicht in der Detektion. Rechts: Schematische Darstellung des Messaufbaus bei der Messung im Manifold eines Brennstoffzellenstapels.

ten Turbulenzgrade unter 0,01 % messbar sein. In Abbildung 2 ist der Aufbau des Sensors dargestellt. Ein bei optischen Messtechniken auftretendes Problem sind Reflexe, welche beim Durchtritt des zur Beleuchtung verwendeten Lichtes durch Grenzflächen wie zum Beispiel Rohrwände auftreten. Diese können zu einer Sättigung der verwendeten Detektoren führen, sodass keine Strömungsmessung mehr durchführbar ist. Um dieses Problem zu umgehen, können mit einem Fluoreszenzfarbstoff versehene Streupartikel verwendet werden. Zumeist tritt bei Fluoreszenz eine deutliche Rotverschiebung zwischen Absorption und Emission auf, sodass das zur Beleuchtung verwendete, vom Farbstoff absorbierte Licht durch einen Langpassfilter von dem vom Farbstoff emittierten Licht getrennt werden kann. Dies ermöglicht das Ausblenden der Wandreflexe und damit auch sehr wandnahe Messungen. Die Signalqualität von Strömungsmessungen mit fluoreszierenden Partikeln wurde an einer Mikrokanalströmung mit ebenen Grenzflächen optischer Qualität untersucht. Diese ist hauptsächlich abhängig von der Lichtleistung im Messvolumen sowie vom Verhältnis zwischen Interferenzstreifenabstand und Partikeldurchmesser. Unter Einbeziehung der Signalleistung ergeben sich für unseren Sensor bei einem Interferenzstreifenabstand von 2,5 µm optimale Partikelgrößen zwischen 2 µm und 2,75 µm. In Abbildung 3 ist ein Vergleich zwischen Streulichtsignalen und Fluoreszenzsignal dargestellt. Das Streulichtsignal weist dabei einen deutlichen Offset von 2,9 V zum Beispiel durch Wandreflexe auf, das Fluoreszenzsignal hingegen nicht. Eine Sättigung des Detektors kann somit effektiv vermieden werden. Nachteilig ist jedoch der für Fluoreszenzsignale gegenüber Streulichtsignalen um etwa 20 % geringere Modulationsgrad. D.h. bei der Verwendung von Fluoreszenz muss besonders auf eine hohe optische Qualität des optischen Zugangs geachtet werden.

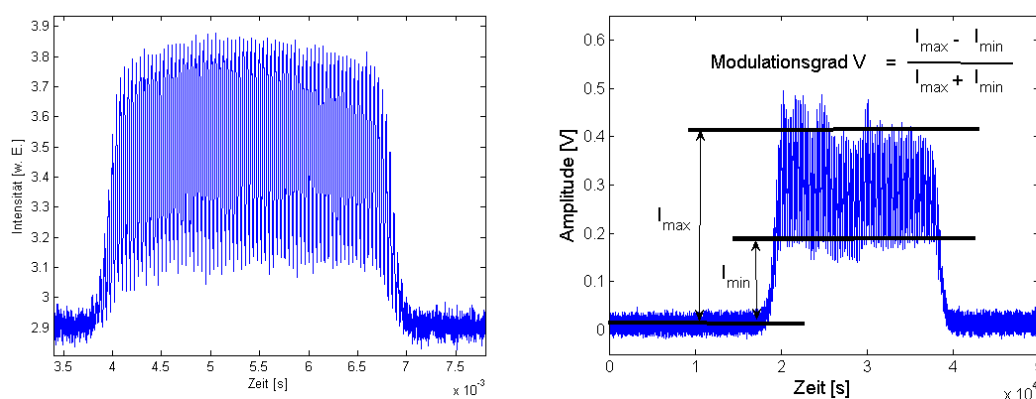


Abb.3: Links: Streulichtsignal mit einem Modulationsgrad von 60 % und einem Offset von 2,9 V. Rechts: Fluoreszenzsignal mit einem Modulationsgrad von 40 % und einem Offset von 0 V.

Validierung des Sensors an einem Modell

Um den soeben vorgestellten Sensor, welcher aufgrund der Verwendung multimodiger Laserstrahlung Multimode-LDA (MM-LDA) genannt wird, zu validieren, wurden Messungen an einem Modell des Manifolds eines Brennstoffzellenstapels durchgeführt. Dieses besteht aus zwei PMMA-Röhren mit einem Innendurchmesser von 7 mm, welche das Zu- und Ableitungsmanifold darstellen. Diese sind in Abständen von 1 cm durch insgesamt 32 Schläuche verbunden, die das flowfield der einzelnen Brennstoffzellen darstellen und in ihrer Länge so gewählt wurden, dass sich ein repräsentativer Druckverlust einstellt. Um die Strömungsmessungen in diesem Modell zu erleichtern, wurde als Fluid Wasser gewählt. Aufgrund von Rohrkrümmung, Rillen und Haarrissen in der Oberfläche ist in diesem Falle die optische Qualität nicht ausreichend, um die Fluoreszenz zu nutzen. Es wurden zwei Strömungszustände untersucht, eine laminare Strömung mit einer Reynoldszahl von 1500 und eine turbulente mit einer Reynoldszahl von 3000. Diese entsprechen über die Reynoldsanalogie zwei

relevanten Betriebspunkten des hier modellhaft dargestellten Brennstoffzellenstapels. Der Messaufbau ist schematisch in Abbildung 2 rechts dargestellt. Vergleichsmessungen wurden mittels PIV (particle image velocimetry) durchgeführt. Da es sich bei dieser Messtechnik im Gegensatz zum LDA um ein flächenhaftes verfahren handelt, wird ein großer optischer Zugang benötigt, welcher bei diesem Modell jedoch gegeben ist. Aus diesen flächenhaften Daten wurden die entsprechenden Strömungsprofile extrahiert und mit den durch das MM-LDA gewonnenen verglichen. Zudem wurden Strömungssimulationen für die bekannte Geometrie des Manifold-Modells durchgeführt. Beispielhaft sind in Abbildung 4 Strömungsprofile für 3 verschiedene Messpositionen im Manifold bei Z-Konfiguration und $Re=3000$ dargestellt.

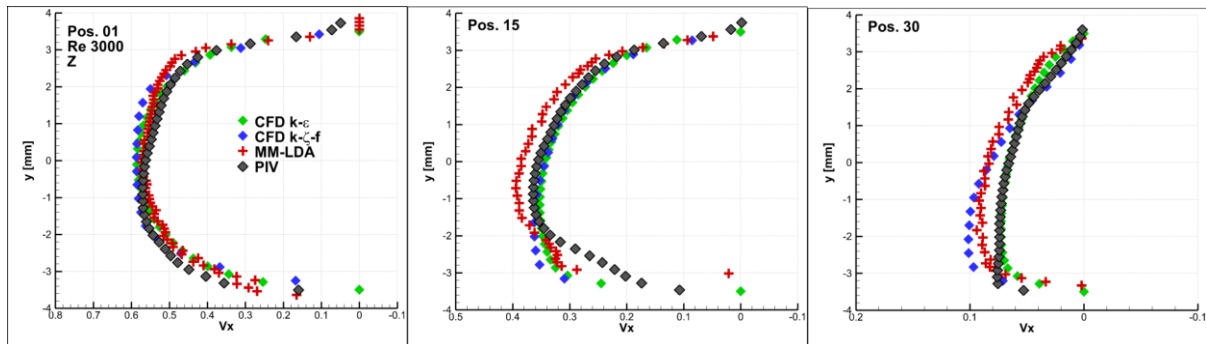


Abb.4: Beispiele von Strömungsprofilen für eine turbulente Strömung mit einer Reynoldszahl von 3000 im Manifoldmodell für drei unterschiedliche Messpositionen an Anfang, Mitte und Ende des Manifolds (Z-Konfiguration). Rot: MM-LDA-Messung, grau: PIV-Messung, grün: CFD-Simulation mit $k-\epsilon$ -Modell, blau: CFD-Simulation mit $k-\zeta-f$ -Modell

Der Vergleich der experimentell ermittelten Strömungsprofile untereinander zeigt dabei eine sehr gute Übereinstimmung für beide betrachteten Reynoldszahlen für alle untersuchten Positionen und in U- und Z-Konfiguration. Auftretende Abweichungen sind vornehmlich auf die geringe Qualität des optischen Zuganges zurückzuführen. Das MM-LDA ist damit für Strömungsmessungen in kleinen Röhren, die anderen Messsystemen unzugänglich sind, als einsatzfähig zu betrachten. Der Vergleich der experimentell gewonnenen Strömungsprofile mit den entsprechenden simulierten Profilen, zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Generell zeigt sich dabei jedoch für Strömungsprofile im mittleren Bereich des Manifolds eine Abweichung von den experimentellen Werten. Im Fall der laminaren Strömung werden die Strömungsgeschwindigkeiten durch die Simulation eher überschätzt, im turbulenten Fall eher unterschätzt. Ein ähnliches Verhalten wurde von anderen Arbeitsgruppen ebenfalls beobachtet (siehe Grega et al. 2007). Zudem muss für die Berechnung der turbulenten Strömung beachtet werden, dass die Wahl des Turbulenzmodells einen starken Einfluss auf die Ergebnisse haben kann (siehe Lebaek et al. 2010).

Messung im Manifold eines realen Brennstoffzellenstapels

Nach der Untersuchung eines Manifold-Modells wurde als nächster Schritt ein reales Manifold eines Brennstoffzellenstapels untersucht. Der in Abb. 5 dargestellte Dummy eines Brennstoffzellenstapels entspricht in allen Maßen und Geometrien einem realen Brennstoffzellenstapel. Aus Kostengründen, und da hier strömungsmechanische Effekte im Vordergrund stehen, wurde dieser Dummy erstellt, der keine echten MEAs enthält. Um einen optischen Zugang zum Manifold dieses Stapels zu gewährleisten, wurden Zwischenstücke aus Kupfer zwischen zwei Brennstoffzellen eingefügt. Diese Zwischenstücke aus Kupfer eignen sich auch für den Einsatz in einem echten Brennstoffzellen-Stapel zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt, da sie die elektrische Durchkontaktierung gewährleisten. Das Manifold ist

somit durch zwei parallele Fenster mit einer freien Apertur von $< (10 \times 3) \text{ mm}^2$ optisch zugänglich. Diese Voraussetzungen machen den Einsatz von PIV schwierig. Die ermittelten Profile wurden demnach mittels MM-LDA aufgenommen. Dabei wurden mit dem Fluoreszenzfarbstoff Nilblau A versehene Polystyrolpartikel als Streuobjekte in einer Wasserströmung eingesetzt. Das Fluoreszenzlicht wurde in Rückwärtsrichtung, also durch das gleiche Fenster, durch welches beleuchtet wird, detektiert. Die Nutzung von Fluoreszenzlicht ermöglicht dabei Strömungsmessungen bis etwa $100 \text{ }\mu\text{m}$ Nähe zur Wand. Dieser Wert ist dabei alleinig durch die Ortsauflösung des MM-LDA begrenzt. In diesem Falle konnte die Fluoreszenz sinnvoll genutzt werden, da in den Zwischenstücken planare Glasfenster eingesetzt sind, die eine hohe optische Qualität gewährleisten.

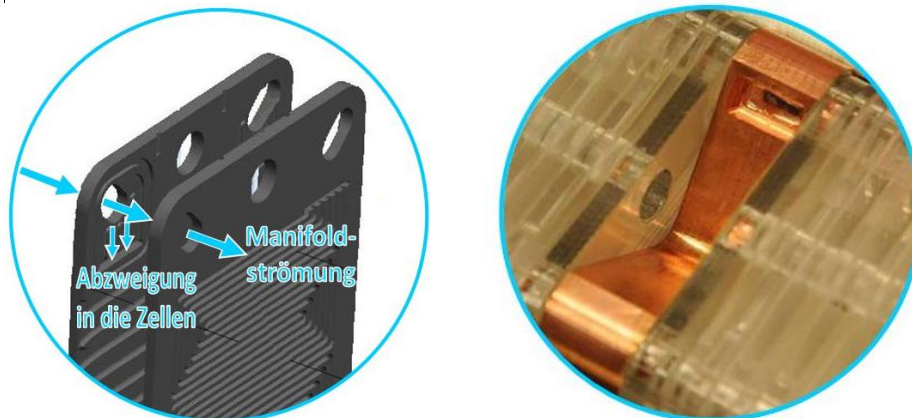


Abbildung 5: Links: Strömungsführung bei einer Verzweigung von Manifold zu einer Zelle des Manifolds, Rechts: Nahaufnahme des Zwischenstücks mit optischem Zugang.

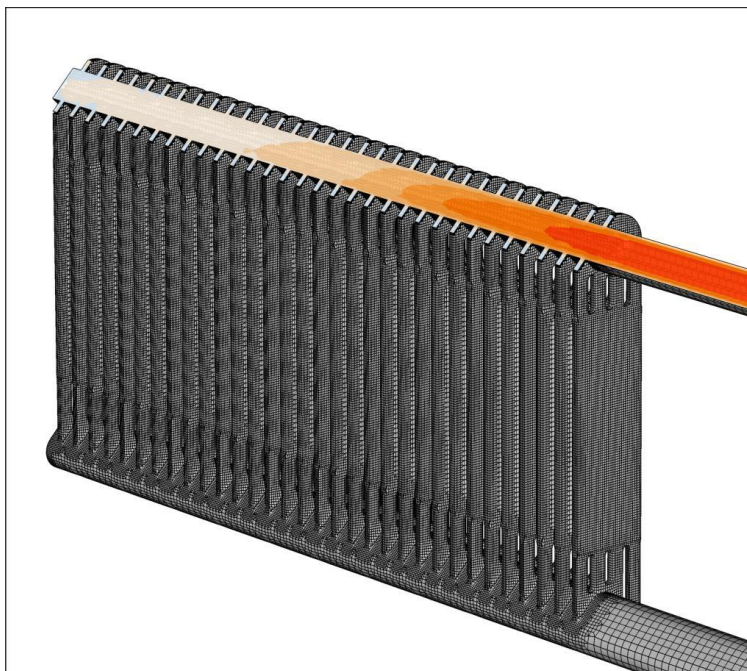


Abbildung 6: Rechengitter des Brennstoffzellenstapels für die numerische Strömungssimulation und Schnittansicht der Strömungsverteilung im Eintrittsmanifold in der Messebene der MM-LDA-Messung

Es wurden zum Vergleich abermals Simulationen durchgeführt. Das verwendete Rechengitter mit einem Schnitt durch das Zuleitungsmanifold ist in Abb. 6 zu sehen. Die mit Simulation und MM-LDA erhaltenen Strömungsprofile an Position 15 im Manifold, also in der Mitte des Brennstoffzellenstapels, sind für eine laminare Strömung mit einer Reynoldszahl von 1500 in Abb. 7 links dargestellt. Die hier präsentierten Messungen sind dabei nach unserem Kenntnisstand die ersten, welche nicht am vereinfachten oder skalierten Modell des Manifolds eines Brennstoffzellenstapels durchgeführt wurden, sondern in einer realen Geometrie. Die

Strömungsgeschwindigkeit an dieser Position wird von der Simulation überschätzt, jedoch war dieses Verhalten auch schon bei den Simulationen am Manifoldmodell zu erkennen. Das gleiche gilt mit umgekehrter Tendenz für den turbulenten Fall (Abb. 8).

Aufgrund der aufwendigen Fertigung der optischen Zugänge für den Brennstoffzellenstapel stand zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Beitrags nur ein optischer Zugang für Messungen zur Verfügung. Untersuchungen an weiteren Positionen im Manifold des Stapels und der Vergleich mit den entsprechenden Simulationsergebnissen werden während des Tagungsvortrages präsentiert.

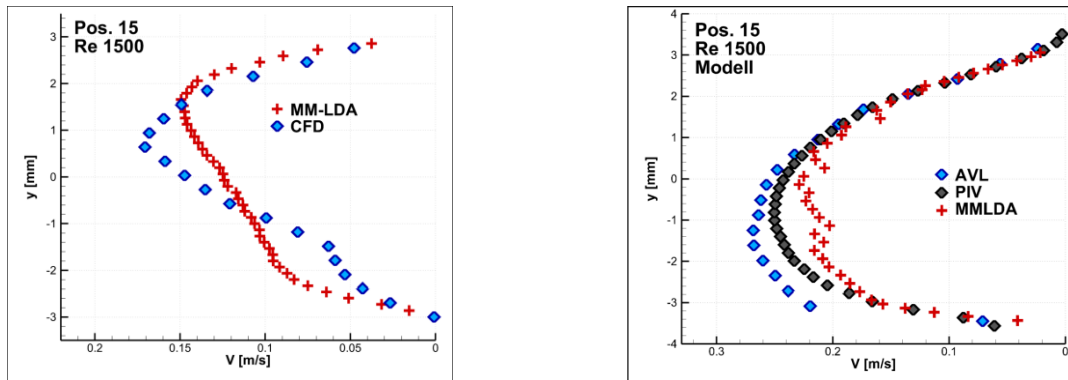


Abbildung 7: Links: Strömungsprofile von MM-LDA (Kreuz) und Simulation (blaue Raute) an Position 15 des realen Manifolds, also in der Mitte des Brennstoffzellenstapels (siehe Abb. 5) für eine laminare Strömung ($Re=1500$, U-Konfiguration). Zum Vergleich rechts: Strömungsgeschwindigkeit bei gleicher Messung am Manifoldmodell

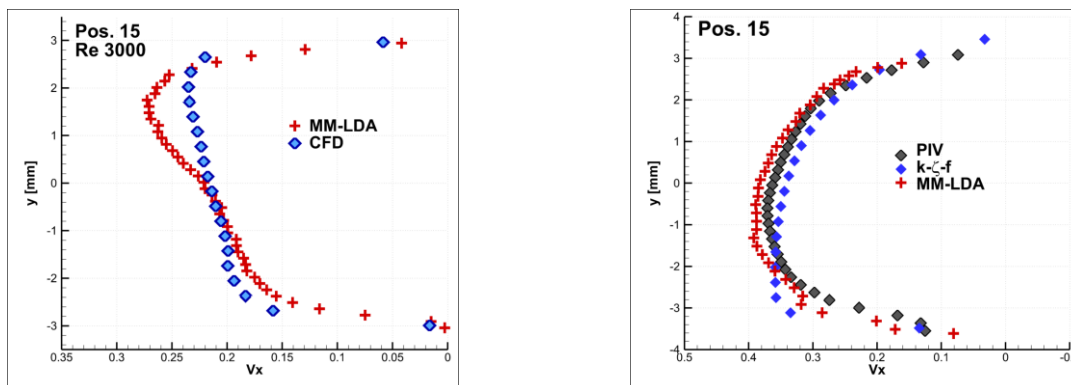


Abbildung 8: Links: Strömungsprofile von MM-LDA (Kreuz) und Simulation (blaue Raute) an Position 15 des realen Manifolds, also in der Mitte des Brennstoffzellenstapels (siehe Abb. 5) für eine turbulente Strömung ($Re=3000$, U-Konfiguration). Zum Vergleich rechts: Strömungsgeschwindigkeit bei gleicher Messung am Manifoldmodell

Zusammenfassung und Ausblick

Anhand sehr gut übereinstimmender unabhängiger Messungen mit PIV und Multimode-LDA am Modell des Manifolds eines Brennstoffzellenstapels konnten Strömungsmessungen mittels des MM-LDA validiert werden. Daraufhin konnten erstmals Strömungsmessungen im realen Manifold eines Brennstoffzellenstapels durchgeführt werden. Durch die Nutzung von mit Farbstoff versehenen Streupartikeln waren die Messungen durch einen einzigen kleinen optischen Zugang hindurch realisierbar. Dabei konnte die Strömung mit einer Ortsauflösung von $92\ \mu\text{m}$ bis an die Rohrwände heran untersucht werden. Der Vergleich mit Strömungssimulationen zeigt für das Manifold-Modell gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten. Im nächsten Schritt werden Messungen mittels MM-LDA an Luftströmungen

im realen Brennstoffzellenstapel-Manifold durchgeführt. Hierzu werden Tracer-Partikel verwendet, welche in späteren Messungen einen Brennstoffzellenbetrieb nicht stören werden. Deren Erzeugung wurde innerhalb zweier Projekte bereits entwickelt und mit einem LDA in einer Luftströmung getestet. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse können Maßnahmen zur Optimierung für das Manifold eines Brennstoffzellenstapels, z.B. eine geometrische Verjüngung oder Erweiterung des Querschnitts des Zulauf- und des Ablauf-Manifolds, ergriffen und die Gesamtleistung des Stapels damit perspektivisch um bis zu 10 % erhöht werden.

Dankesworte

Dieses Projekt wird über die AiF im Programm zur Förderung der "Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)" vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (IGF 407 ZBG) gefördert.

Literatur

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

S. Burgmann, M. E. Kinaci, L. Feierabend, F. Schwarzer, J. König, L. Büttner, J. Czarske, „Laser-Doppler-Anemometer mit geringer örtlicher Kohärenz zur Strömungsmessung in kleinen Rohrleitungen am Beispiel eines Brennstoffzellen-Stapels“, 13. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, S. 47.1 - 47.9, München, 3.-5. Sept. 2013

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

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

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

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