

Laser-Doppler-Anemometer mit geringer örtlicher Kohärenz zur Strömungsmessung in kleinen Rohrleitungen am Beispiel eines Brennstoffzellen-Stapels

LaserDopplerVelocimetry with low spatial coherence for flow measurements in small tubings demonstrated on a fuel cell stack

Sebastian Burgmann¹, Mustafa Efe Kinaci¹, Lukas Feierabend¹, Florian Schwarzer², Jörg König², Lars Büttner², Jürgen Czarske²

¹ Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT), Carl-Benz-Straße 201, 47057 Duisburg

² Technische Universität Dresden (TUD), Professur für Mess- und Prüftechnik, 01062 Dresden

Multimode-LDA, hohe axiale Ortsauflösung, Strömungsverteilung in Rohrssystemen
multi-mode LDV, high axial spatial resolution, flow distribution in tubing systems

Zusammenfassung

Die Leistung eines Brennstoffzellenstapels hängt unter anderem von der Gleichverteilung des Brennstoffes über ein Verteilersystem (Manifold) in die einzelnen Zellen ab. Für eine strömungsmechanische Optimierung werden in der Regel numerische Strömungssimulationen (CFD) eingesetzt, für die experimentell ermittelte Randbedingungen, z. B. in Form von Geschwindigkeitsverteilungen, erforderlich sind. Die kompakte Bauweise eines Brennstoffzellenstapels sowie auch die Dimension des Verteilersystems von nur wenigen Millimetern stellen jedoch große Anforderungen an die Messtechnik. Neben vertrauenswürdigen Geschwindigkeitsdaten entscheiden vor allem die optische Zugänglichkeit und die erforderliche Ortsauflösung (von $< 100 \mu\text{m}$) über die Anwendbarkeit von Messtechniken. Die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) ermöglicht eine Strömungsgeschwindigkeitsmessung durch lediglich einen kleinen optischen Zugang in dem Rohrverteilersystem, so dass Strömungsmessungen in realen Systemen durchgeführt werden können. Aufgrund der zusätzlichen Forderung nach einer hohen axialen Ortsauflösung, erscheint gerade das MM-LDA besonders dafür geeignet.

In diesem Beitrag wird über ein Laser-Doppler-Anemometer berichtet, das anstatt einer singlemodigen Lichtquelle Licht geringer örtlicher Kohärenz (multimodig) verwendet. Es wird gezeigt, dass sich mit multimodiger Laserstrahlung das Messvolumen des LDAs verkürzt und die axiale Ortsauflösung deutlich verbessert. Eine erste Demonstratorversion des Multimode-LDA (MM-LDA) wurde realisiert mit einer axialen Ortsauflösung von ca. $65 \mu\text{m}$ und einer minimalen Geschwindigkeitsunsicherheit von $7 \cdot 10^{-4}$. Dieses MM-LDA wurde an einem Manifold-Modell eines Brennstoffzellenstapels eingesetzt, bei dem die Randbedingungen bekannt sind. Die gemessenen Strömungsprofile zeigen insbesondere im Bereich des Einlaufes eine sehr gute Übereinstimmung zu den mittels CFD und mittels Particle Image Velocimetry (PIV) erzielten Werten.

Ziel ist es, die Strömungssituation in einem realen Brennstoffzellenstapel mit Hilfe des MM-LDA zu vermessen. Basierend auf den so experimentell gewonnenen Geschwindigkeitsmessungen sollen geeignete Geometrieänderungen des Manifolds entwickelt werden, die eine Gleichverteilung des Brennstoffes im Brennstoffzellenstapel ermöglichen.

Einleitung

Typischerweise sind Brennstoffzellen aus Bipolarplatten gefertigt, in welche Mikrokanäle eingbracht sind, über die die Reaktionsgase zugeführt werden. Zur Trennung der Anode und der Kathode wird eine ionenleitende Membran eingesetzt, die zusammen mit einer Katalysatorschicht und einer so genannten Gas-Diffusions-Lage (GDL) die MEA (membrane electrode assembly) bildet. Zur Erhöhung der Ausgangsspannung werden mehrere Zellen zu einem Stapel zusammengeschaltet. Dabei werden die einzelnen Zellen über eine gemeinsame Versorgungsleitung, das so genannte Manifold versorgt (Abb. 1). Dieses Manifold eines Brennstoffzellenstapels stellt ein besonders komplexes Verteilersystem für Gasströme dar. Die Gleichverteilung von Gas- oder Flüssigkeitsströmen in Rohrverzweigungssystemen hängt von der Anströmung und Durchströmung bzw. dem Druckverlust des Rohrverzweigungssystems ab und erfordert oftmals die Auslegung spezieller Einlauf- bzw. Durchströmungsgeometrien. Die Auslegung dieser Geometrien erfolgt über Computational Fluid Dynamics (CFD), für die experimentell ermittelte Referenzwerte z.B. in Form von Geschwindigkeitsverteilungen erforderlich sind.

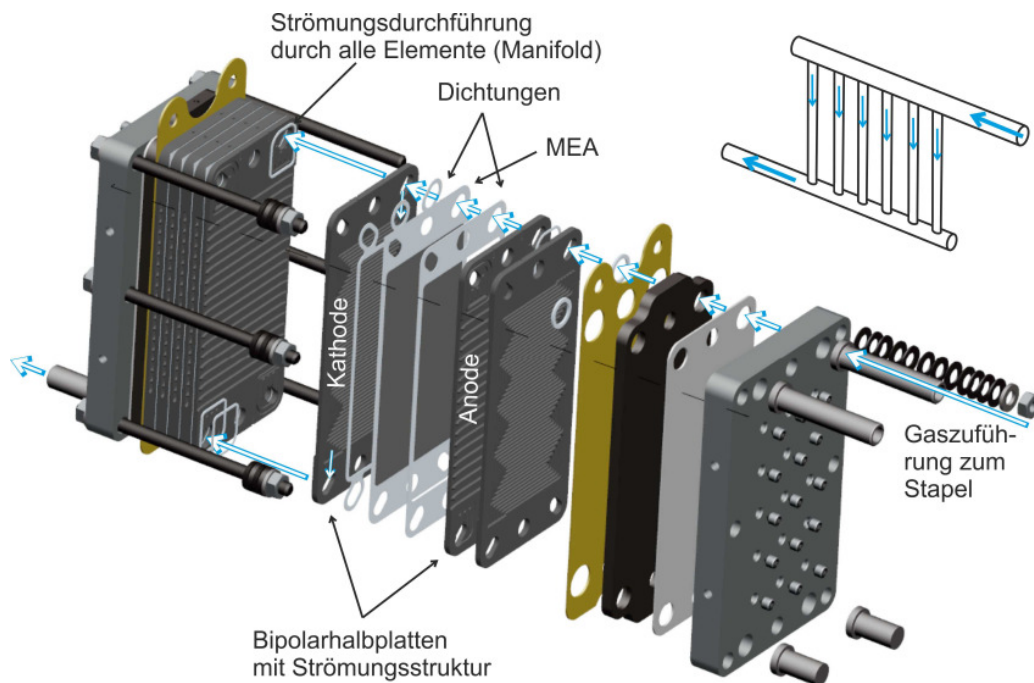


Abb. 1: Aufbau eines Brennstoffzellen-Stapels mit in die einzelnen Elemente integriertem Manifold; oben eingeklinkt: Prinzipskizze des Strömungsverlaufs für die Kathodenluft innerhalb des Stapels

Der Strömung im Manifold eines Brennstoffzellen-Stapels kommt für die Leistung der Brennstoffzelle eine hohe Bedeutung zu, da die Leistungsdichte des Stapels entscheidend von einer homogenen Verteilung der Gase abhängig ist. Das strömungsmechanische Design des Manifolds und die Auswirkungen auf die Durchströmung der einzelnen Zellen hinsichtlich einer Gleichverteilung des Volumenstroms ist eine der großen strömungsmechanischen Fragestellungen der Brennstoffzellen-Forschung (siehe Ma et al., 2002, Chang et al., 2006, Grega et al., 2007, Klinner et al., 2010, Lebaek et al., 2010). Da die reale Zusammenbau-Situation des Stapels (beispielsweise das Eindringen der porösen GDL in die Mikrokanäle der Bipolarplatten infolge des Verpressens, was den Druckverlust erhöht) in der Regel nicht bekannt ist, sind für eine Überprüfung der strömungsmechanischen Auslegung experimentelle Strömungsmessungen erforderlich. Eine Einzelspannungsüberwachung der Zellen liefert hinsichtlich der Strömungsverhältnisse hier keine eindeutigen Aussagen. Es bieten sich laser-optische, berührungslose Strömungsuntersuchungen an; diese benötigen jedoch einen

optischen Zugang. Ein Überblick über den Einsatz laseroptischer Methoden zur Untersuchung von Transportprozessen in Brennstoffzellen wird in Lindken und Burgmann (2012) gegeben. Bezüglich laseroptischer Strömungsmessverfahren in Brennstoffzellen ist in der Vergangenheit hauptsächlich die PIV zum Einsatz gekommen. Eine wichtige Einschränkung zum Einsatz der PIV zur Untersuchung von Strömungen in kleinen Rohren mit Durchmessern der Größenordnung 5-10 mm ist die Notwendigkeit, für Beleuchtung und Detektion einen ausreichend dimensionierten optischen Zugang zu gewährleisten (in der Regel zwei). Die LDA-Technik (in Rückwärtsstreuung) benötigt lediglich einen optischen Zugang. Konventionelle LDA arbeiten nach dem Differenz- oder Referenzverfahren. Dabei wird ein Laser über einen Strahlteiler in zwei gleichartige Teilstrahlen aufgespalten, die durch eine Abbildungsoptik so geführt werden, dass sie sich an einer Stelle schneiden. Dieses Volumen der sich überlagernden Teilstrahlen stellt das Messvolumen dar. Durch die Interferenz der beiden Strahlen entsteht ein Streifenmuster mit dem Abstand Δx . Durchquert ein Partikel dieses Streifenmuster, wird durch die Lichtstreuung an diesem Partikel ein periodisches Intensitätssignal („burst“) erzeugt, das über einen Photodetektor empfangen werden kann. Die Modulationsfrequenz f_D des Intensitätssignals ist über den Streifenabstand direkt proportional zur Geschwindigkeit des Partikels. Typischerweise ist das Messvolumen bei LDA-Systemen mit singlemodiger Strahlung 1-2 mm lang und einige 100 μm breit. Dieses Messvolumen bestimmt bei konventionellen LDA-Systemen die örtliche Auflösung. Mit einem konventionellen LDA können so nur wenige Messpunkte über den Rohrquerschnitt (5-10 mm) erfasst werden. Diese geringe örtliche Auflösung ist für die zu untersuchenden Strömungsverhältnisse nicht ausreichend.

Entwicklung eines Multimode Laser-Doppler-Anemometers mit hoher Ortsauflösung

Nutzt man statt singlemodiger Strahlung Multimode-Strahlung, gelingt es, das Messvolumen des LDA deutlich zu reduzieren. Aufgrund der geringen Kohärenz der Multimode-Strahlung wird die Interferenz im Großteil des Überschneidungsbereichs der Teilstrahlen unterdrückt. Das Streifenmuster, welches die Geschwindigkeitsmessung ermöglicht, bildet sich im Gegensatz zum konventionellen LDA nur noch in einem schmalen Bereich in der Mitte des Überschneidungsbereichs aus. Üblicherweise beträgt die Länge des Messvolumens nur noch ca. (1..5) % der Länge des Überschneidungsbereichs (Büttner und Czarske, 2001). Mit diesem in axialer Richtung deutlich verkürzten Messvolumen geht folglich eine Erhöhung der Ortsauflösung einher. Der Streifenabstand besitzt zudem eine weitaus bessere Uniformität als bei konventionellen singlemode-LDA, bei denen der Effekt der Streifenabstandsvariation die relative Unsicherheit der Geschwindigkeit auf ca. (1..0,1) % begrenzt. Beim MM-LDA konnte eine relative Unsicherheit von $< 5 \cdot 10^{-4}$ demonstriert werden (Büttner und Czarske, 2001). Mit einem ersten als portablen Laboraufbau realisierten MM-LDA-Messsystem wurden erfolgreich Messungen im Windkanal an einer einige Millimeter starken laminaren und turbulenten Plattengrenzschicht durchgeführt (Büttner und Czarske, 2004). Wegen dieser vorteilhaften Eigenschaften bietet sich das MM-LDA für die Anwendung in kleinen Rohrsystemen an. Es muss jedoch ein neues, speziell angepasstes, miniaturisiertes MM-LDA-System entwickelt werden. Speziell müssen für eine technische Anwendung außerhalb des Laborbetriebs die Attribute „geringe axiale Ortsauflösung“, „geringe Geschwindigkeitsunsicherheit“ und „Robustheit“ im Vordergrund stehen.

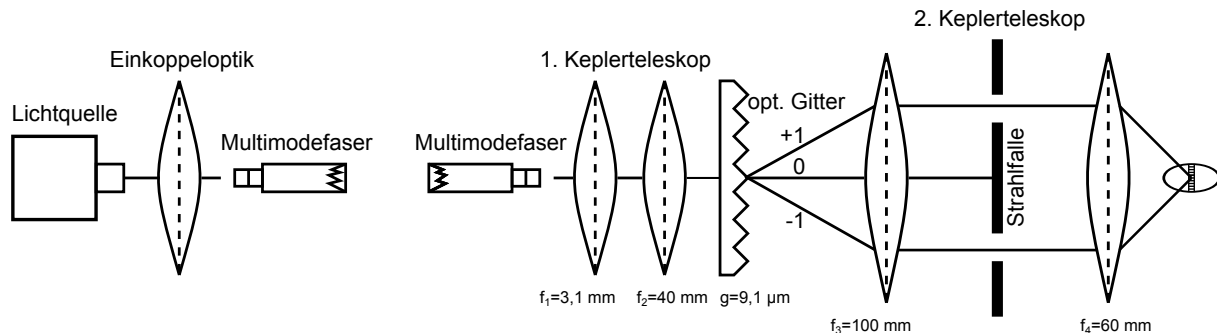


Abbildung 2: Laboraufbau des MM-LDAs zur Untersuchung von Ortsauflösung, Geschwindigkeitsunsicherheit und Robustheit eines LDA mit multimodiger Laserstrahlung

Es wurde ein MM-LDA-Messsystem aufgebaut (Abb. 2), mit dem die oben genannten Attribute untersucht werden konnten. Ziel ist es, durch Wahl verschiedener Lichtquellen und Fasern die örtliche Kohärenz einzustellen und eine für die Anwendung optimierte Kombination herauszuarbeiten. Dieses MM-LDA-Messsystem besteht aus einer Lichtquelle, deren Licht in eine Multimodefaser eingekoppelt und über diese zum Messkopf geführt wird. Mit dem Messkopf werden dann in der Messregion zwei Laserstrahlen überlagert. In dessen Überschneidungsbereich bildet sich das für LDA-Systeme charakteristische Messvolumen mit einem Streifensystem aus. Die örtliche Kohärenz der verwendeten Laserstrahlung hat einen entscheidenden Einfluss auf die örtliche axiale Auflösung eines LDAs. Verwendet man multimodige Laserstrahlung verkürzt sich das Messvolumen und entspricht nicht mehr dem Überschneidungsbereich der Laserstrahlen. Diese Verkürzung kann über den Reduktionsfaktor ξ (Verhältnis zwischen der Länge des Überschneidungsbereichs zur Länge des Messvolumens) quantifiziert werden. Die örtliche Kohärenz wurde durch Variation der Faserparameter der verwendeten Multimodefaser (Kerndurchmesser D und numerische Apertur NA) sowie der verwendeten Lichtquelle (Wellenlänge, singlemodige oder multimodige Lichtquelle), gezielt verändert und eingestellt. Zur Quantifizierung der Strahlqualität des Lichtes wurde die Beugungsmaßzahl M^2 gewählt. Je höher M^2 , desto schlechter die Strahlqualität und somit geringer die örtliche Kohärenz des Lichtes. Die Länge des Messvolumens wurde durch Kalibriermessungen bestimmt.

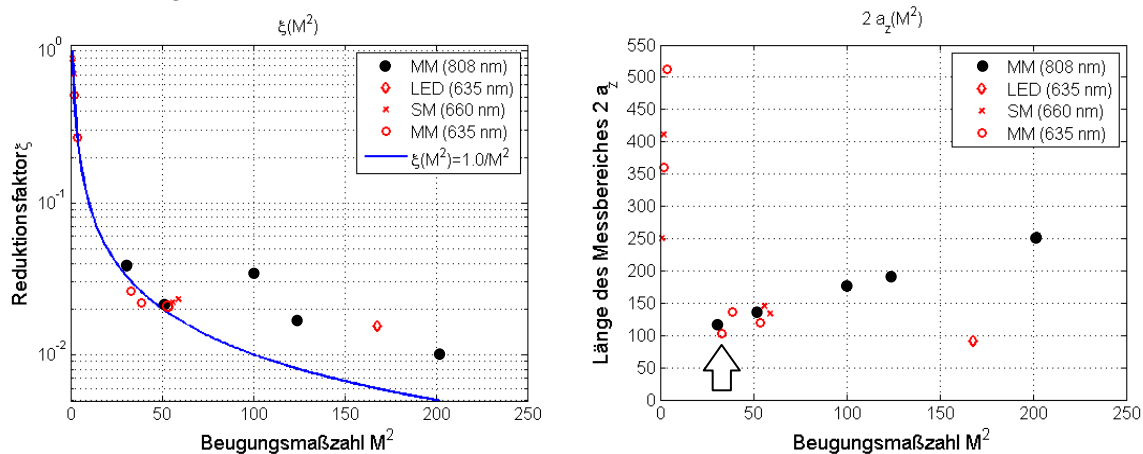


Abbildung 3: Reduktionsfaktor χ und erreichbare Ortsauflösung eines LDA in Abhängigkeit der örtlichen Kohärenz (gegeben über Parameter M^2)

Abb. 3 (links) zeigt, dass sich das Messvolumen mit steigendem M^2 verkürzt. Der Verlauf des Reduktionsfaktors ξ lässt sich dabei in sehr guter Näherung mit der Hyperbelfunktion $1/M^2$ beschreiben. Der Reduktionsfaktor beschreibt die relative Länge des Messvolumens bezogen auf die Länge des Schnittbereichs der Laserstrahlen. Letztere wird jedoch von der Beugungsmaßzahl ebenfalls beeinflusst. Daher ist es zweckmäßig, die Länge des Messvolu-

mens direkt in Abhängigkeit von der Beugungsmaßzahl anzugeben. Die für jede Kombination erreichte Ortsauflösung ist in Abb. 3 (rechts) dargestellt. In dieser lässt sich, auch mit Blick auf die erreichbare Signalleistung, ein Optimum, d.h. eine minimale Messvolumenlänge, bei einem M^2 von ca. 33 ableiten, welches bei Verwendung einer Breitstreifendiode mit 635 nm Wellenlänge und einer Multimodefaser mit 50 μm Kerndurchmesser und einer numerischen Apertur von $NA = 0,22$ eingestellt werden kann.

Die Geschwindigkeitsunsicherheit eines LDA ist im Wesentlichen vom Signal-to-Noise-Ratio (SNR) und der Messdauer abhängig. Zusätzlich hat der in der Realität nicht konstante Streifenabstand einen Einfluss (\rightarrow „virtuelle Turbulenz“). Ein Vergleich zwischen einem Sensor mit singlemodiger Laserstrahlung und einem LDA mit multimodiger Laserstrahlung zeigt, dass die Streifenabstandsvariation und die damit einhergehende relative systematische Geschwindigkeitsunsicherheit für das singlemodige Referenz-LDA (SM-LDA) mit $1,4 \cdot 10^{-2}$ größer als für das MM-LDA mit ca. $9,5 \cdot 10^{-4}$ ist. Mit Hilfe einer Mehrfachmessung pro Position (50 Einzelmessungen) wurde die Standardabweichung der Geschwindigkeit pro Position ermittelt. Die statistische Geschwindigkeitsunsicherheit für ein MM-LDA ist mit $< 0.2\%$ nicht nur weitgehend konstant, sondern auch über das gesamte Messvolumen kleiner als die des SM-LDA. Dies liegt an der generellen Form des Messvolumens eines MM-LDA, welches eine bessere Anpassung an die Messgröße Geschwindigkeit bietet.

Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen wurde eine erste Realisierung eines angepassten MM-LDA umgesetzt. Dieses MM-LDA nutzt eine Breitstreifendiode mit hoher Leistung (Wellenlänge 635 nm) sowie eine Multimodefaser mit einem Kerndurchmesser von 50 μm und einer numerischen Apertur von 0,22. Die Realisierung wurde aufgebaut (Abb. 4) und hinsichtlich Ortsauflösung und Geschwindigkeitsunsicherheit charakterisiert. Diese erste optimierte Realisierung bietet an Luft eine axiale Ortsauflösung von 65 μm (92 μm in Wasser) und eine minimale relative Geschwindigkeitsunsicherheit von ca. $7 \cdot 10^{-4}$. Für eine Anwendung durch lediglich einen optischen Zugang wurde eine Detektion in Rückwärtsrichtung implementiert.

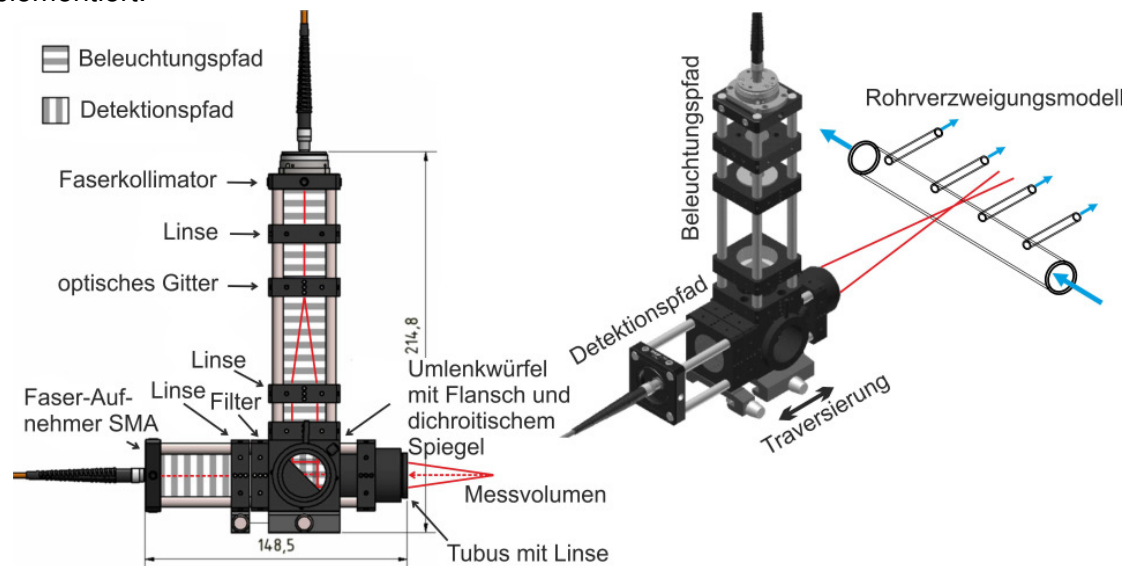


Abb. 4: Aufbau des MM-LDAs (links) und Schema des Messaufbaus zur Messung an dem Modell des Brennstoffzellen-Stapels (rechts)

Messungen mit dem entwickelten MM-LDA an einem Manifold-Modell

Am ZBT wurde ein Prüfstand aufgebaut, der die notwendige Peripherie enthält, um ein Modell eines Brennstoffzellenmanifolds mit Hilfe laser-optischer Verfahren zu untersuchen. Dieses Modell besteht aus einem Plexiglasrohr mit einem Durchmesser von 7 mm, von dem in regelmäßigen Abständen Röhren mit 1.2 mm Durchmesser abzweigen. Diese Röhren

vereinigen sich wieder in derselben Art in einem zweiten Plexiglasrohr mit Durchmesser 7 mm (vgl. Abb. 1). Dieses Modell repräsentiert die Strömungsstruktur eines Brennstoffzellen-Stapels. Das erste Plexiglasrohr entspricht dabei dem Eintrittsmanifold, das zweite dem Austrittsmanifold. Die Durchmesser der einzelnen Komponenten sind an diejenigen der Realkonfiguration angelehnt. Die Länge der Röhrrchen wurde so gewählt, dass sich bei entsprechenden Volumenströmen ein repräsentativer Druckverlust einstellt. In einem ersten Schritt wurde dieses Modell unter Berücksichtigung der Reynolds-Analogie mit Wasser durchströmt. Dabei wurde folgender Betrieb des Stapels simuliert: 32-Zeller mit 0.5 V und 0.15 A/cm² bei 50 cm² aktiver Fläche und 60 °C. Für diese Bedingungen ergäbe sich bei einem λ von 2.0 ein benötigter Luftvolumenstrom von 10 l/min, was einer Reynoldszahl von $Re = 1500$ entspricht. An diesem (Wasser-) Modell wurden dann unter bekannten Randbedingungen Strömungsmessungen mit Hilfe der PIV im Eintrittsmanifold durchgeführt. Zusätzlich wurde das sich einstellende Strömungsfeld mittels der CFD-Software AVL Fire[®] simuliert. Unter diesen Bedingungen kann die Strömungssimulation zum Abgleich der experimentellen Ergebnisse genutzt werden, da alle Randbedingungen bekannt sind und kontrolliert werden können. Da das neue MM-LDA generell in Rohrverzweigungsmodellen mit kleinen Durchmesser einsetzbar sein soll, sind Messungen in Flüssigkeiten und der Abgleich mit anderen Daten zur Qualifizierung des MM-LDA erforderlich.

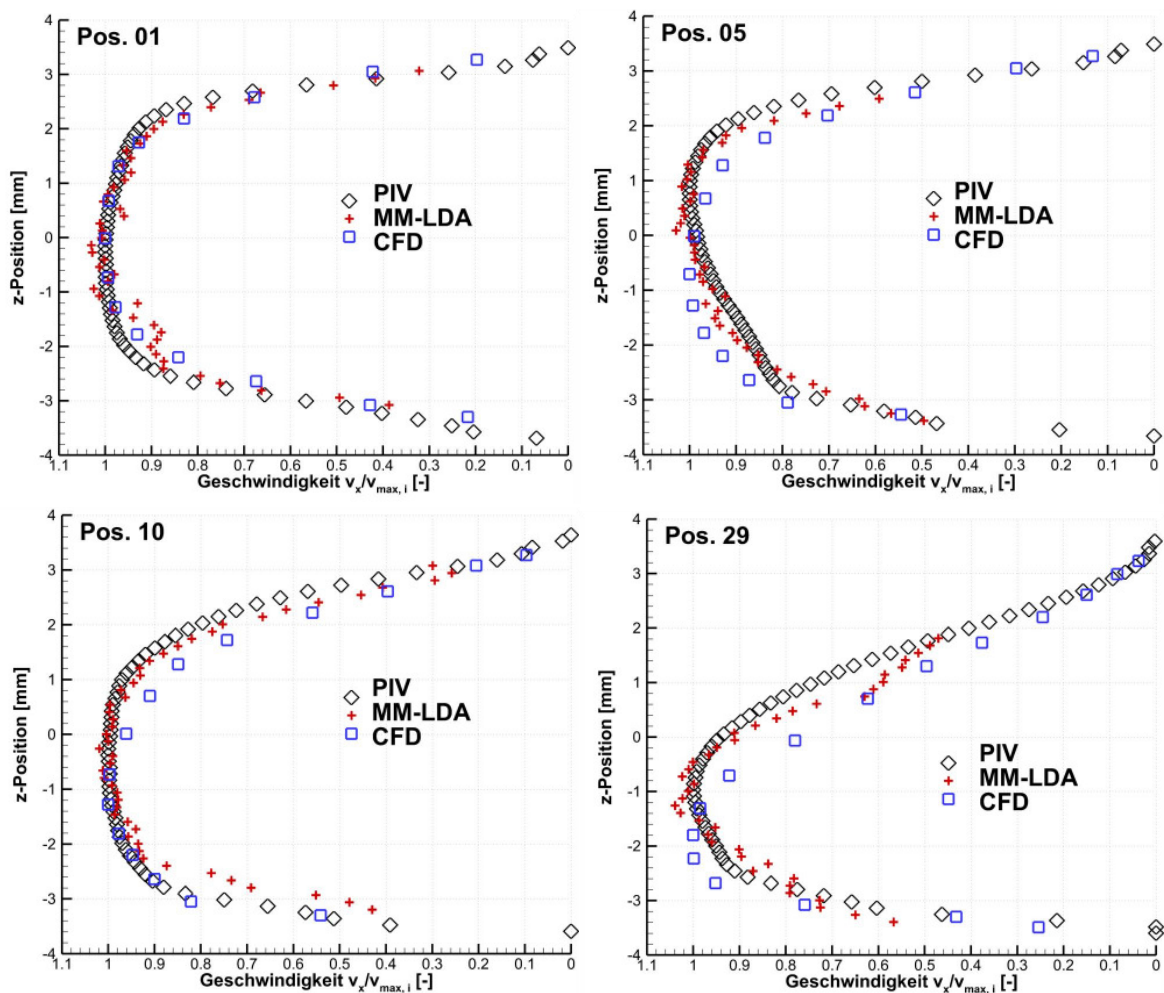


Abb. 5: Ergebnisse der Strömungsprofilmessungen an ausgewählten Stellen des Manifold-Modells für MM-LDA und PIV im Vergleich mit der numerischen Simulation

Mit dem ersten angepassten MM-LDA wurden erste Strömungsmessungen durchgeführt. Dazu wurden entlang der oberen Zuleitung die Strömungsprofile zwischen den einzelnen „Zellen“ gemessen. In Abb. 5 sind exemplarisch Vergleiche zwischen den gemessenen Profilen

des MM-LDA, der PIV und der Ergebnisse der numerischen Simulation am Einlauf des Manifold-Modells dargestellt. Die experimentell bestimmten Geschwindigkeitsprofile zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die CFD-Daten entsprechen qualitativ sehr gut denen mit PIV und MM-LDA gemessenen Profilen. Entlang der Manifoldströmungsrichtung kann jedoch zwischen den Profilen der Simulation und denen der Messungen eine Abweichungstendenz festgestellt werden: das lokale Geschwindigkeitsmaximum der CFD-Profile ist in der Regel nach unten, d.h. in Richtung der abzweigenden Röhrrchen verschoben. Ein Grund hierfür könnte beispielsweise in kleinen Abweichungen der Geometrien zwischen Experiment und CFD oder leicht unterschiedlichen Volumenströmen zu suchen sein. Es bleibt aber festzuhalten: die Ergebnisse zeigen bereits jetzt eine gute Übereinstimmung mit den mittels CFD berechneten Geschwindigkeitsverteilungen.

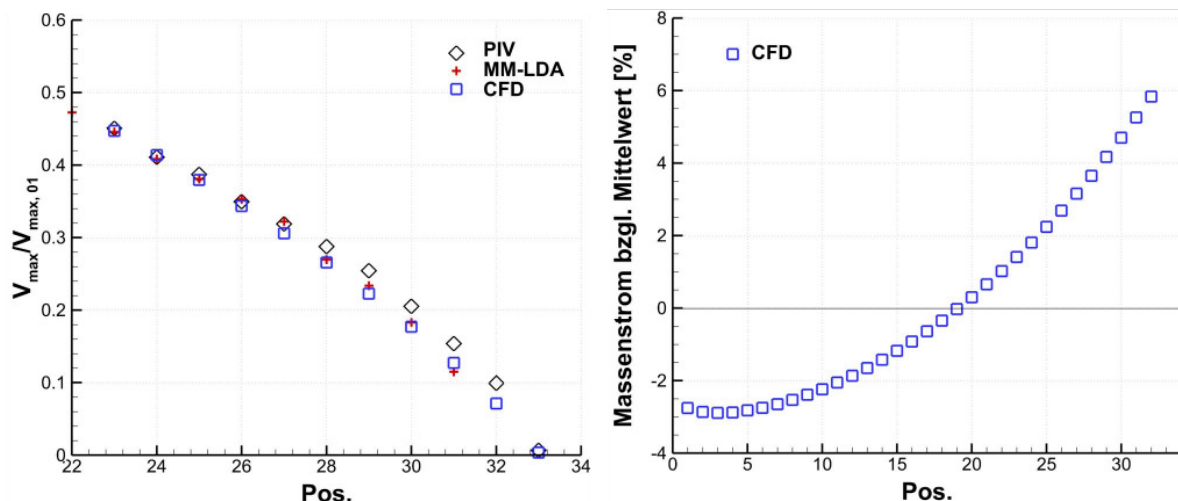


Abb. 6: Ausschnitt des Verlaufs der gemessenen und berechneten lokalen maximalen Geschwindigkeit entlang des Manifold-Modellkanals (links) und mittels CFD berechnete Verteilung der Volumenströme auf die „Einzelzellen“ des Modells (rechts)

Wie in Abb. 6 dargestellt, kann der mittels MM-LDA gemessene Verlauf der lokalen Maximalgeschwindigkeit über die Länge des Manifold-Modellkanals sehr gut mit den Ergebnissen der CFD-Simulation zur Übereinstimmung gebracht werden (vgl. die im Gegensatz hierzu großen Abweichungen bei Lebaek et al. (2010) und Grega et al. (2007)). Die CFD-Simulation zeigt unter diesen Bedingungen, dass sich bereits bei diesem Modell eine Ungleichverteilung der Einzelvolumenströme auf die „Einzelzellen“ einstellt. Es sollte daher an einer Realkonfiguration möglich sein durch eine Kombination von MM-LDA-Messungen und CFD, aus den gemessenen Geschwindigkeitsprofilen Rückschlüsse auf eine mögliche (Un-) Gleichverteilung der Volumenströme zu ziehen.

Numerische Simulation der Strömungsverteilung in einem Brennstoffzellen-Stapel

Im Vorgriff darauf sind basierend auf dem aktuellen Design des ZBT-Brennstoffzellen-Stapels numerische Strömungssimulationen mittels der CFD-Software AVL Fire® zur Analyse der Strömungsverteilung im realen Stapel durchgeführt worden. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Strömungsverteilung auf die einzelnen Zellen bei unterschiedlichen Strömungsgeometrien in den Zellen prinzipiell abzuschätzen. Dazu wurde in einem ersten Schritt das Strömungsfeld einer einzelnen Zelle simuliert, um den Druckverlust über eine Zelle zu parametrisieren. Anschließend werden dann in der Simulation des ganzen Brennstoffzellenstapels die einzelnen Zellen durch poröse Strukturen ersetzt, deren Eigenschaften so gewählt werden können, dass sie den entsprechenden Druckverlust einer Zelle abbilden. Auf diese Weise kann eine Vielzahl von Zellen des Rechengitters eingespart und somit die Rechenzeit verkürzt werden. Abb. 7 zeigt beispielhaft das reduzierte Rechengitter für die Simulation eines Brennstoffzellen-Stapels. Mit einer solchen Vorgehensweise wurden die in dieser Abbildung dargestellten Zellkonfigurationen berechnet und die sich daraus ergebende Strömungsvertei-

lung über die einzelnen Zellen des Brennstoffzellen-Stapels analysiert. Es zeigt sich auch an dem hier dargestellten Beispiel deutlich, dass geringe Druckverluste über eine Zelle zu einer stark unterschiedlichen Strömungsverteilung über alle Zellen führen. Wie Chang et al. (2006) für eine ähnliche Konfiguration eines 100-Zellers zeigten, kann eine Ungleichverteilung der Strömung von 15 Prozentpunkten (vgl. das Ergebnis aus Abb. 7) zu einem Unterschied in der Einzelspannung der Zellen von 50 Prozent führen. Dies limitiert die Leistung des Zellstapels in hohem Maße. Auf der anderen Seite führen hohe Druckverluste zu einer erhöhten Pumpleistung für die Kathodenluftversorgung und somit zu einem Leistungsverlust des Brennstoffzellen-Systems. Ziel muss es daher sein, den Druckverlust über die Zellen eines Stapels so gering wie möglich (hinsichtlich der Pumpleistung), aber so hoch wie nötig (hinsichtlich des Austrags von Flüssigwasser) zu gestalten und dabei eine Gleichverteilung der Kathodenluft über alle Zellen zu gewährleisten.

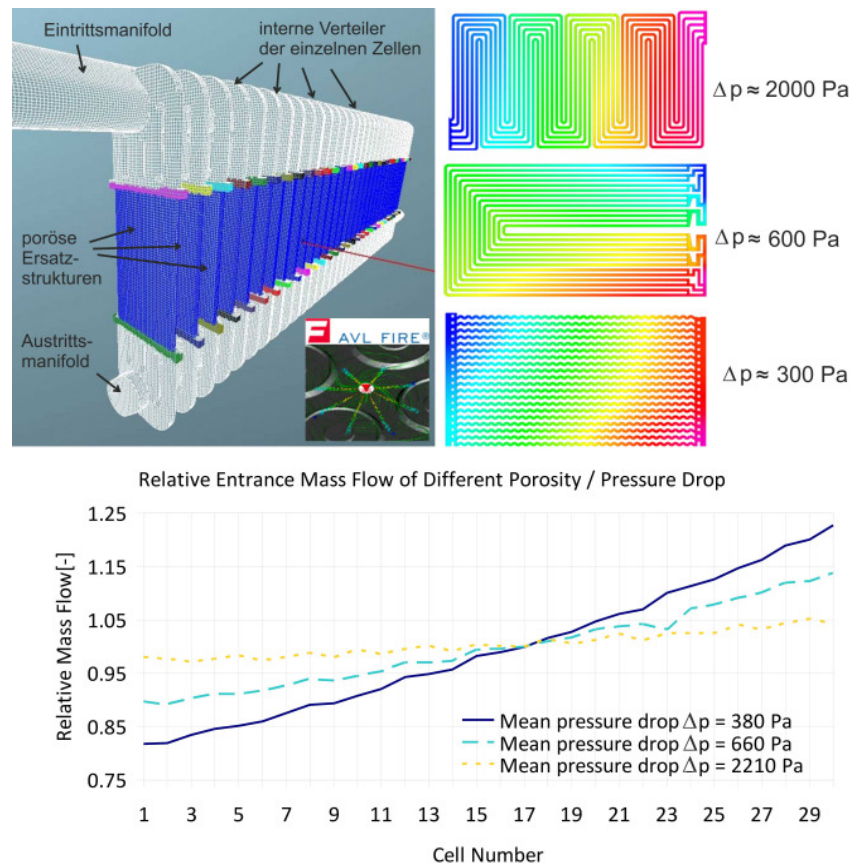


Abb. 7: Rechengitter für die (vereinfachte) Strömungssimulation eines Brennstoffzellenstapels (oben links), simulierte Strömungsstrukturen verschiedener Zellkonfigurationen und ihr Druckverlust (oben rechts) und Ergebnis der Strömungsverteilung über die Zellen eines Stapels für die verschiedenen Zellkonfigurationen (unten)

Ausblick

Die bisherigen Messungen zeigen, dass mit dem realisierten MM-LDA eine ausreichende Ortsauflösung bei geringer Geschwindigkeitsunsicherheit und hoher Robustheit erzielt werden kann. Der Vergleich der Messdaten an einem mit Wasser durchströmten Modell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Es sind weitere Messungen in einem Manifold-Modell vorgesehen, bei dem geseedete Luft eingesetzt wird, um die Grenzen und Möglichkeiten des MM-LDAs auszuloten.

Die numerischen Simulationen der Strömungsverteilung eines Brennstoffzellenstapels weisen bisher eine nicht quantifizierbare Ungenauigkeit auf, da der reale Strömungsraum infolge des Zusammenbaus des Stapels nicht bekannt ist. Auch Chang et al. (2006) weisen explizit

darauf hin, dass für eine genaue Analyse und Auslegung der Manifold-Strukturen eines Brennstoffzellen-Stapels in-situ-Strömungsmessungen notwendig sind. Daher wird im nächsten Schritt ein Brennstoffzellen-Stapel aufgebaut, der lokal einen ausreichenden optischen Zugang für Messungen mit der MM-LDA-Technik aufweist. Dabei soll der Stapel einen Realbetrieb gewährleisten, sprich den Brennstoffzellen-Prozess ermöglichen. Um laser-optische, partikelbasierte Strömungsmessungen in einem betriebenen Brennstoffzellenstapel durchführen zu können, muss ein entsprechendes Seeding bereitgestellt werden. Hier sind von Seiten des ZBT entsprechende Vorarbeiten unternommen worden: in Burgmann et al. (2011) und Burgmann et al. (2013) wurde gezeigt, dass laser-optische Strömungsmessungen in betriebenen Brennstoffzellen mit Hilfe eines Aerosols aus Ethylenglykol möglich sind, ohne die elektrochemischen Prozesse in der Zelle zu stören und ohne dass das Partikelmaterial mit eventuell auftretendem Flüssigwasser in der Zelle interagiert.

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

- 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., 2004: "Multimode fibre laser Doppler anemometer (LDA) with high spatial resolution for the investigation of boundary layers", Selected paper from the 11th Lisbon Symposium, *Exp Fluids*, 36, pp. 214-216
- Burgmann, S., van der Schoot, N., Wartmann, J., Lindken, R., 2011: "Micro Particle-Image-Velocimetry für Gasströmungen in Mikrokanälen", *tm - Technisches Messen*, 5, pp. 253-259
- Burgmann, S., Blank, M., Panchenko, O., Wartmann, J., 2013: "µPIV measurements of two-phase flows of an operated direct methanol fuel cell", *Exp Fluids*, 54:1513
- 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
- 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
- Klinner, J., Willert, C., Schneider, A., Mack-Gardner, A., 2011: „Messung der Strömungsverteilung am Austritt der Bipolarplatten eines Brennstoffzellen-Stacks“, *tm-Technisches Messen*, 78 (5), pp. 246-252
- 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
- Lindken, R., Burgmann, S., 2012: "Laser-optical methods for transport studies in low temperature fuel cells", in: Hartnig, C., Roth, C.: "Polymer electrolyte membrane and direct methanol fuel cell technology, Volume 2: In situ characterization techniques for low temperature fuel cells", Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, pp. 425-461
- Ma, Z., Jeter, S., Abdel-Khalik, S., 2002: "Flow network analysis application in fuel cells", *Journal of Power Sources*, 108, pp. 106-112
- Rosli, M. I., Pourkashanian, M., Ingham, D. B., Ma, L., Ismail, M. S., 2009: "Transparent PEM Fuel Cells for Direct Visualisation Experiments", *Proceedings of FuelCell2009, Seventh International Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference June 8-10, 2009, Newport Beach, California, USA*