

## Strömungsverteilungsmessungen an einer Brennstoffzelle mit einem hochauflösenden Zeitmultiplex-Laser-Doppler-Profilsensor

### Flow distribution measurements on a fuel cell using a high-resolution time division multiplex laser Doppler profile sensor

F. Bürkle<sup>\*1</sup>, F. Moyon<sup>2</sup>, L. Feierabend<sup>2</sup>, M. Dues<sup>3</sup>, L. Büttner<sup>1</sup>, J. Czarske<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik  
Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden, \*E-Mail: [florian.buerkle@tu-dresden.de](mailto:florian.buerkle@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH, Carl-Benz-Str. 201, 47057 Duisburg

<sup>3</sup> ILA R&D GmbH, Karl-Heinz-Beckurts-Str. 13, 52428 Jülich

Strömungsmessung, Laser-Doppler-Profilsensor, Brennstoffzelle, CFD  
Flow measurement, laser Doppler profile sensor, fuel cell, CFD

#### Zusammenfassung

Brennstoffzellen sind in den letzten Jahren immer weiter in den Fokus der Öffentlichkeit geraten. Als dezentrale Energierzeuger spielen sie eine wichtige Rolle in der Zukunft der Energiewirtschaft mit Wasser als Abfallprodukt. Als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erzeugen sie sowohl elektrische Energie als auch Wärme und sind damit vielseitig einsetzbar. Für technisch relevante Spannungen müssen jedoch mehrere Brennstoffzellen in Reihe geschaltet werden, wobei die Reaktionsgase jeder einzelnen Brennstoffzelle über ein gemeinsames Verteilerrohr, dem Manifold, zugeführt werden. Dabei kann aber eine Ungleichverteilung der Reaktionsgase entstehen, welche zu einem Spannungsabfall in einzelnen Brennstoffzellen führt und somit die Effizienz des Brennstoffzellenstapels verringert.

In diesem Beitrag wird daher ein Ansatz gezeigt, der diese Ungleichverteilung verringern kann. Mittels Simulationen wird ein rein fluidisches Modell eines Brennstoffzellenstapels untersucht. Die Simulationen werden mit Strömungsmessungen, welche mit einem Laser-Doppler-Profilsensor im Zeitmultiplexbetrieb durchgeführt werden, überprüft. Durch die hohe Ortsauflösung von 3  $\mu\text{m}$  und einer Geschwindigkeitsauflösung von weniger als 0,1 % einerseits und einer Messvolumenlänge von 1,1 mm eignet sich der Profilsensor hervorragend, um die geringen Unterschiede zwischen den Kanälen aufzulösen. Es werden Messungen an einem Brennstoffzellenmodell vorgestellt und der Vergleich mit Simulationen dargestellt, welche die Eignung des Messsystems bestätigen. Durch weitere Simulationen wird gezeigt, dass durch eine Anpassung der Einströmlöcher die Ungleichverteilung der Reaktionsgase verringert werden kann, was perpektivisch zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades führen kann.

#### Einleitung

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-BZ) erzeugen Energie durch einen elektrochemischen Umwandlungsprozess, ohne die Entstehung von Stickoxiden, Schwefelgasen, Staub und Ruß. Die PEM-BZ haben sich in vielen Anwendungsbereichen etabliert,

als Energieversorger für z. B. Mobilfunkmasten, in Krankenhäusern und Computersysteme, aber auch in der mobilen Kommunikation, in der Elektromobilität und zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung werden die PEM-BZ genutzt. Die Hochtemperatur-PEM-BZ funktionieren bei 120 °C bis 200 °C und werden aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile immer weiter verbreitet: nutzbare Abwärme, Vermeidung von Flüssigwasser, geringe Zelldegradation durch Schadgase (siehe Bandlamudi 2011), und Versorgungsmöglichkeit mit reformierten Brennstoffen. Um relevante Leistungen zu erreichen, werden mehrere Brennstoffzellen in Reihe geschaltet. Alle Zellen werden durch einen gemeinsamen Manifold mit den Reaktionsgasen versorgt. Je mehr Zellen in Reihe zusammengebaut werden, desto schwieriger ist es, die Gleichverteilung der Gase zu erreichen. Verschiedene Ursachen können dieses Problem erklären: gestörte Anströmung des Manifolds, instationäre Strömungen im Manifold, ungünstige Druckverlust-Verteilung zwischen Manifold und Einzelzelle (Schmieder et al. 2016). Die Ungleichverteilung der Gase hat einen direkten Einfluss auf die Leistung des Stapels (Chang et al. 2006). Um dieses Problem zu lösen, wird ein Manifold-Einsatz konstruiert, um die Gleichverteilung der Stoffströme in der HT-PEM-BZ Stapel zu erreichen. Die Entwicklung des Manifold-Einsatzes besteht aus verschiedenen Schritten: Die Geometrie wird zuerst mit Computational Fluid Dynamics (CFD) untersucht, danach werden die Strömungsmessungen verwendet, um die Berechnungen zu validieren. Die Konstruktion dieses Teils wird am Ende als Input benutzt, um den Manifold für den realen HT-PEM-BZ-Stapel zu entwickeln. Zur Durchführung der Strömungsmessungen wurde ein Modell eines Brennstoffzellenstapels auf Basis eines realen HT-PEM-BZ-Stapels konstruiert, dessen Strömungszustand mittels CFD bestimmt wurde und mit Hilfe optischer Strömungsmessverfahren gemessen wurde. Da die Kanäle einer HT-PEM-BZ Abmessungen im Millimeterbereich aufweisen, sind besondere Anforderungen an das verwendete Messgerät gestellt.

Eine etablierte Messtechnik zur Vermessung von Strömungen ist die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), welche auf dem optischen Doppler-Effekt beruht. Dieser beschreibt die Frequenzverschiebung einer elektromagnetischen Welle basierend auf einer Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger. Durch Kreuzen zweier kohärenter Strahlen kann das Prinzip auch durch ein im Kreuzungsvolumen entstehendes Interferenzmuster erklärt werden. Die Dopplerfrequenz  $f_D$  eines Teilchens hängt dann von der Geschwindigkeit und dem Streifenabstand gemäß der Beziehung

$$f_D = \frac{v}{d}$$

ab. Dabei beschreibt  $v$  die Geschwindigkeit eines Partikels orthogonal zu den Streifen des Interferenzmusters und  $d$  den annähernd konstanten Streifenabstand im Messvolumen. Die relative Messunsicherheit der Geschwindigkeit liegt hier in der Regel bei etwa 0,5 %, die Ortsauflösung ist abhängig von der Größe des Messvolumens, welche für konventionelle LDA-Systeme ca. 100  $\mu\text{m}$  \* 100  $\mu\text{m}$  \* 1 mm beträgt und somit ungeeignet für die Messung in den Kanälen einer Brennstoffzelle ist. Es ist möglich das Messvolumen durch starkes Fokussieren der Laserstrahlen zu verkürzen, durch die dadurch erhöhte Wellenfrontkrümmung des Gaußschen Strahles variiert aber der Streifenabstand im Messvolumen (siehe Miles 1996), was zu einer erhöhten Geschwindigkeitsunsicherheit führt.

Genau diese Variation im Streifenabstand wird beim Laser-Doppler-Profilsensor (LD-PS) genutzt um sowohl Geschwindigkeits- und Ortsauflösung zu erhöhen. Dazu wird mit Hilfe der Wellenfrontkrümmung ein fächerförmiges Interferenzstreifenmuster erzeugt, welches die zeitgleiche Erfassung von Ort und Geschwindigkeit eines Partikels im Messvolumen ermöglicht. Es handelt sich hierbei um eine 1D1C-Messtechnik, welche ein Geschwindig-

keitsprofil entlang der Länge des Messvolumens mit hoher Genauigkeit (siehe König et al. 2010) messbar macht. Die Details hierzu werden im folgenden Kapitel erläutert. Daraufhin werden die Messungen am Brennstoffzellenmodell und die Anpassung der Manifold-Geometrie vorgestellt. Der Ausblick schließt den Bericht ab.

### Der Laser-Doppler-Profilsensor mit Zeitmultiplex

Der Laser-Doppler-Profilsensor nutzt zwei fächerförmig angeordnete Interferenzstreifensysteme (siehe Czarske et al. 2002, König et al. 2010). Dabei konvergiert der Streifenabstand des einen Interferenzmusters entlang der optischen Achse  $z$ , während der Streifenabstand des zweiten Interferenzmusters divergiert. Dadurch ergibt sich für jeden Punkt im Messvolumen ein eindeutiges Verhältnis zwischen den beiden Dopplerfrequenzen:

$$q(z) = \frac{f_{D1}(v, z)}{f_{D2}(v, z)} = \frac{v_x/d_1(z)}{v_x/d_2(z)} = \frac{d_2(z)}{d_1(z)}$$

Um die beiden Streifensysteme physikalisch zu trennen, kann der Ansatz des Wellenlängenmultiplex verfolgt werden, bei welchem für beide Streifensysteme jeweils unterschiedliche Wellenlänge verwendet werden. Somit können die Dopplersignale einfach mittels eines dichroitischen Spiegels getrennt werden. Durch die Verwendung verschiedener Wellenlängen kommt es jedoch zu Dispersionseffekten, wenn in Flüssigkeiten oder durch ein Medium hindurch gemessen werden soll. Des Weiteren sollen zur wandnahen Messung fluoreszierende Partikel eingesetzt werden, weshalb Wellenlängenmultiplex nicht in Frage kommt. Die wandnahe Messung hat den Vorteil, dass eine zusätzliche Messung der Tiefe nicht nötig ist. Der Einsatz von Fluoreszenz unterdrückt hierbei störende Wandreflexe. Zur physikalischen Unterscheidung der beiden Streifensysteme kommen demnach nur Multiplexverfahren in Betracht, welche mit einer Wellenlänge arbeiten. Zu nennen wären hier

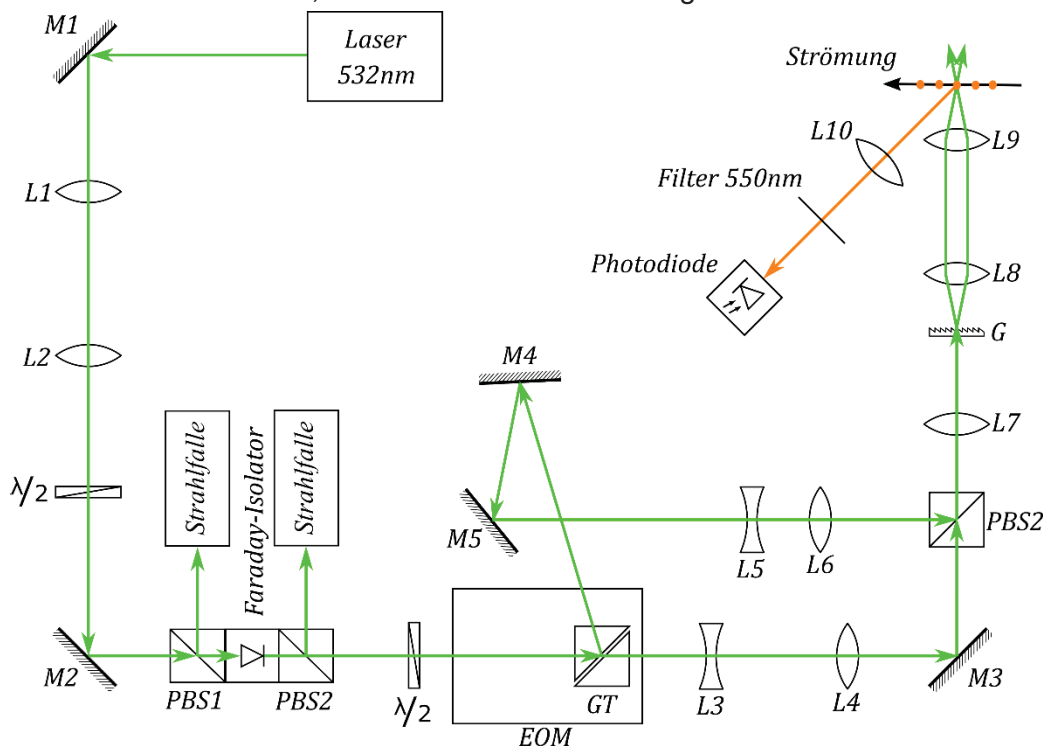
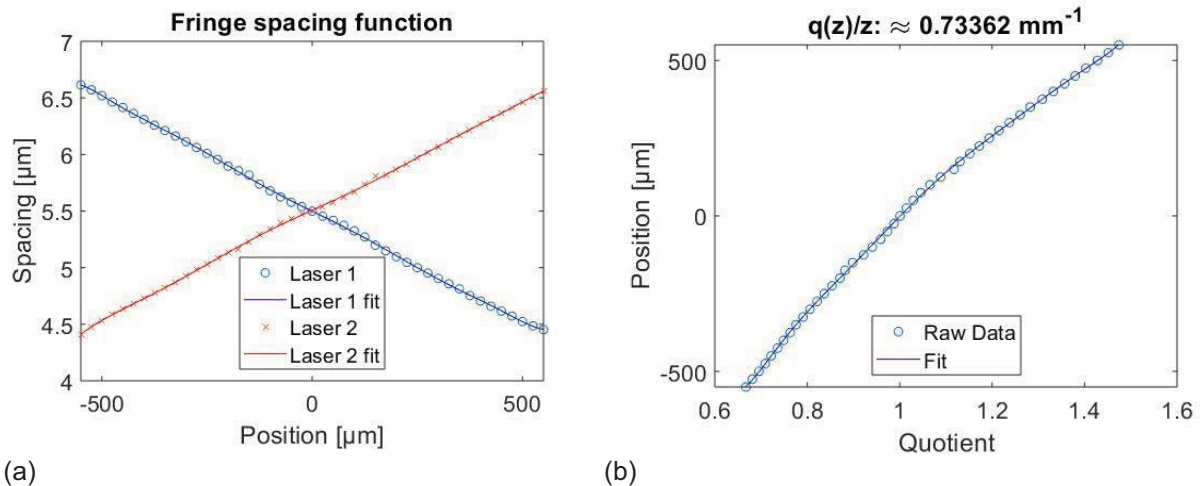


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus. Die Galilei-Teleskope L3/4 und L5/6 dienen der Dimensionierung der Messvolumens. Die erste  $\lambda/2$ -Platte dient dem Abschwächen des Lasers zu Justagezwecken.



(a) (b)  
 Abb. 2: Kalibrierfunktionen beider Interferenzstreifensysteme im Zeitmultiplex-Betrieb. (a) Streifenabstands-funktionen und (b) Kalibrierfunktion (Quotientenfunktion  $q(z)$ ) für die Ortsbestimmung.

Polarisationsmultiplex (a, PDM), Frequenzmultiplex (b, FDM) und Zeitmultiplex (c, TDM). Methode (a) ist aufgrund der geringen Größe der Partikel im Mikrometerbereich und der damit verbundenen Depolarisationseffekte nicht geeignet. Methode (b) ist eine heterodyne Messtechnik, bei der diese Effekte nicht relevant sind. Durch die verwendeten Trägerfrequenzen werden jedoch breitbandige Detektoren benötigt werden, welche durch eine höhere Rauschleistungsdichte bei gleichbleibender Dopplersignalintensität ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) aufweisen. Im Vergleich dazu können mit Methode (c) die beiden Streifensystem in Zeitbereich getrennt werden und ermöglichen so den Einsatz schmalbandiger Detektoren zur Erhöhung des SNR. Beim Einsatz fluoreszierender Stoffe ist jedoch auf eine ausreichend geringe Abklingzeit zu achten, da sonst ein signifikantes Übersprechen der Kanäle nicht auszuschließen ist.

Zur Realisierung des TDM wird ein Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 532 nm mittels eines elektro-optischen Modulators (EOM) in zwei zeitlich getrennte Strahlwege aufgetrennt. Der schematische Aufbau des LD-PS ist in Abb. 1 dargestellt. Der EOM besteht aus einer Pockels-Zelle, welche beim Anlegen einer Spannung die Polarisation des einfallenden Lichts dreht, und einem Glan-Thomson-Prisma, welches senkrecht zueinander stehende Polarisationen in verschiedene Richtungen ablenkt. Der EOM wird so eingestellt, dass bei angelegter Spannung das Licht seitlich abgelenkt wird und ansonsten geradeaus hindurchgelassen wird. Somit ist bei ausreichend linearer Polarisation des einfallenden Laserstrahls, welche durch einen polarisierenden Strahlteiler gewährleistet wird, eine zeitliche Trennung zweier Strahlen und somit auch zweier Streifensysteme erreichbar. Der EOM kann mit einer Schaltfrequenz von bis zu 30 MHz betrieben werden, wodurch mit

$$v_{max} = \frac{1}{2} f_s d_{min},$$

wobei  $f_s$  die Schaltfrequenz und  $d_{min}$  der minimale Streifenabstand ist, die maximal messbare Geschwindigkeit in etwa  $v_{max} = \frac{1}{2} * 30 \text{ MHz} * 4,5 \text{ μm} = 67,5 \text{ m/s}$  beträgt. Da Geschwindigkeiten von unter 20 m/s erwartet werden, genügt für die Messungen eine Modulationsfrequenz von 10 MHz. Mit einer Abtastrate von 200 MS/s ist eine ausreichende Abtastung garantiert. Das Messvolumen hat eine Länge von 1,1 mm, was es ermöglicht, mit nur einer Messung das Strömungsprofil über die gesamte Tiefe des Kanals zu erfassen. Die Ortsauflösung wurde bei einer Testmessung mit  $2\sigma_z \approx 3 \text{ μm}$  und die relative Geschwindigkeitsunsicherheit mit  $2\sigma_{vx} \leq 0,1 \%$  bestimmt.

## Messungen am Brennstoffzellenmodell

Um einen realen Brennstoffzellenstapel zu simulieren, wurde ein Brennstoffzellenmodell aus Acrylglas gefertigt. Dazu wurden 40 Kanäle mit einer Länge von 0,65 m, einer nominellen Breite von 4 mm und einer nominellen Tiefe von 1 mm in eine Scheibe Acrylglas gefräst. Um die Ungleichverteilung aufgrund des Druckabfalls im Verlauf des Manifolds zu zeigen, wurde für jeden Kanal ein Strömungsprofil aufgenommen. Die Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

mit  $\rho$  als Dichte,  $v$  der Geschwindigkeit und  $\eta$  der dynamischen Viskosität des Fluids und  $d$  als charakteristische Länge der Strömung, in unserem Fall die Tiefe der Kanäle, ergibt sich für die einzelnen Kanäle zu  $Re = 1,2 \text{ kg/m}^3 * 5 \text{ m/s} * 1 \text{ mm} / 18,2 \text{ } \mu\text{Pa}\cdot\text{s} \approx 550$ . Mit einer kritischen Reynoldszahl  $Re_{\text{krit}} \approx 2300$  für Kanalströmungen, ist mit einer laminaren Strömung zu rechnen. Als Messpunkt wurde die Mitte der Kanäle in Länge und Breite gewählt, da dort die laminare Strömung voll ausgebildet ist und das Maximum der Geschwindigkeit zu erwarten ist, aus welchem man mit

$$v_x(y, z) = \frac{4h^2 \Delta p}{\pi^3 \eta L} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left[ 1 - \frac{\cosh\left(n\pi \frac{y}{h}\right)}{\cosh\left(n\pi \frac{w}{2h}\right)} \right] \sin\left(n\pi \frac{z}{h}\right)$$

(siehe Bruus 2008) bei bekannten Kanalabmessungen und Maximalgeschwindigkeit die Druckdifferenz zwischen Einlass und Auslass der Kanäle und über Integration auch den Volumenstrom berechnen kann. Die dabei aufgetretenen Probleme mit der Dichtigkeit bei der Verwendung von Druckluft wurden umgangen, indem mit einem Unterdruck, erzeugt durch eine Vakuumpumpe, an der Ausgangsseite gearbeitet wurde. Als Seeding wurde mit Rhodamin B gefärbtes Ethylenglycol verwendet (siehe Schmieder 2016). Rhodamin B liegt mit einem Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von ca. 540 nm nahe der Wellenlänge des verwendeten Lasers mit 532 nm und eignet sich somit sehr gut als Fluoreszenzfarbstoff. In Abb. 3 (a) ist ein Beispielprofil der Messung an Kanal 38 gezeigt, wobei hier ein Parabelfit verwendet wurde, da das Profil über die Tiefe in guter Näherung

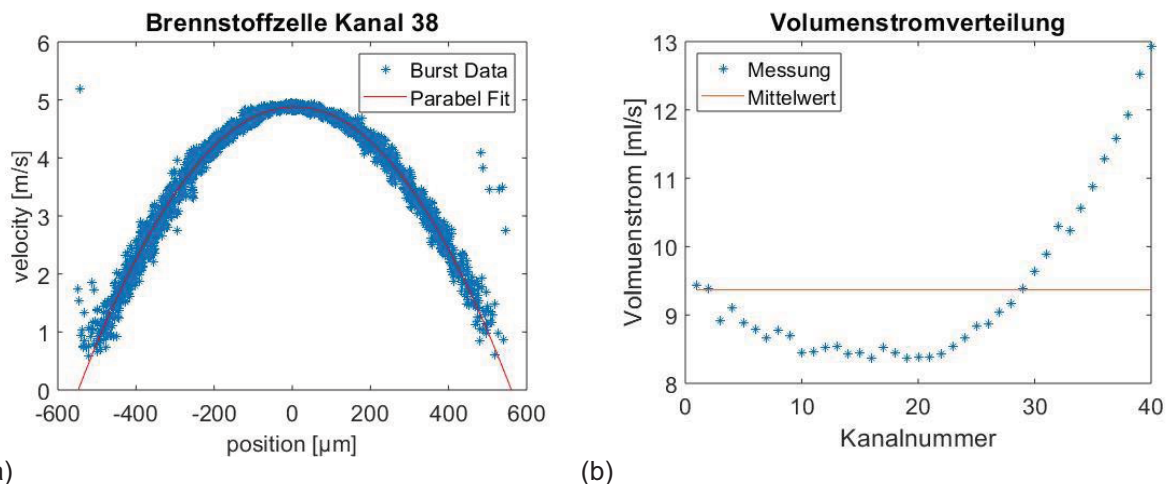


Abb. 3: (a) Geschwindigkeitsprofil des Kanals 38 des Modells. Ausreißer wurden mittels eines  $2\sigma$ -Filters um den Mittelwert entfernt. (b) Volumenstromverteilung über die Kanäle des Modells. Für die Kanaltiefen wurden die Triangulationsdaten genutzt.

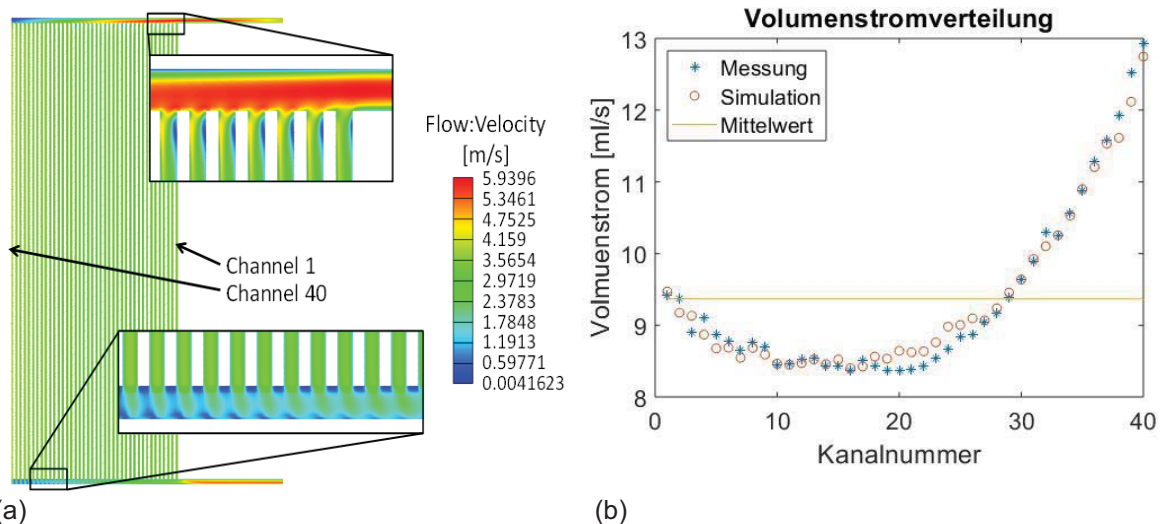


Abb. 4: (a) Simulationsergebnis der Geschwindigkeitsverteilung beim Betriebspunkt  $i = 300 \text{ mA/cm}^2$ . (b) Volumenstromverteilung über die Kanäle des Modells im Vergleich mit der Simulation. Für die Kanaltiefen wurden die Triangulationsdaten genutzt.

eine Parabel beschreibt. Die Maximalgeschwindigkeit kann direkt aus der Scheitelpunktsform abgelesen werden, mit den dazu angegebenen 95%-Konfidenzintervallen ergibt sich ein Standardabweichung von  $2\sigma_{v_x} \approx 0,26 \%$ , was einen sehr guten Wert darstellt. Dabei wurde die Tatsache ausgenutzt, dass die Form des Strömungsprofils bekannt ist. Wählt man einen Bereich um den Scheitel herum aus und berechnet dort die Standardabweichung der Geschwindigkeit, so erhält man  $2\sigma_{v_x} \approx 1,2 \%$ , wobei das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der Messungen im Mittel bei etwa  $-4 \text{ dB}$  liegt. In Abb. 3 (b) ist die Volumenstromverteilung über die 40 Kanäle zu sehen. Entgegen der Erwartung einer früheren Simulation (Ramos et al. 2018) steigt der Volumenstrom zu den hinteren Kanälen hin an. Aus der Bestimmung der Kanaltiefen aus den Nullstellen des Fits wird der Grund dafür ersichtlich: Die Kanaltiefen nehmen zu den hinteren Kanälen hin zu. Bei einer Vermessung der Kanaltiefen mit einem Triangulationssensor wurde festgestellt, dass die Tiefen um bis zu 15 % von der nominellen Tiefe abweichen. Mit den Daten des Triangulationssensors wurden erneut CFD-Simulationen durchgeführt (Abb. 4 (a)), da frühere Simulationen von konstanten Kanaltiefen ausgingen. Die daraus erhaltenen Daten der Volumenströmung wurden mit der Messung verglichen

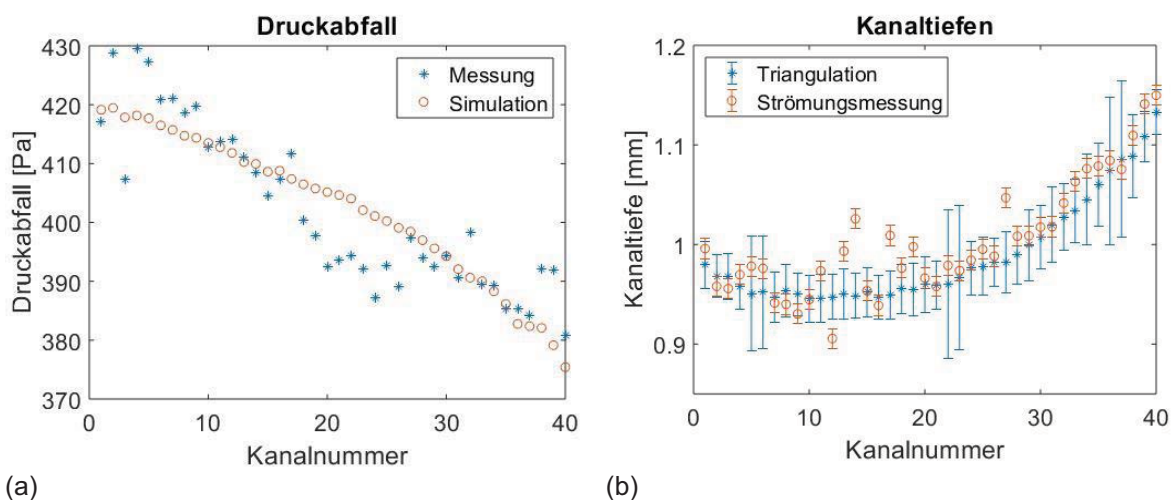


Abb. 5: (a) Druckabfall über die Kanäle berechnet aus den Volumenströmen. (b) Kanaltiefen in der Kanalmitte (Messpunkt). Die Messunsicherheit für die Strömungsmessung wurde mit  $\sigma_x = 5 \mu\text{m}$  aus den Unsicherheiten der Fitparameter abgeschätzt. Die Fehlerbalken geben das 95%- Konfidenzintervall an..

(Abb. 4 (b)). Man kann erkennen, dass die Messung gut mit der Simulation übereinstimmt. Die maximale Abweichung beträgt 3,3 %, die mittlere Abweichung liegt bei ca. 1,4 %. Die große Abweichung der einzelnen Kanäle lässt sich mit den unterschiedlichen Kanaltiefen erklären, da diese kubisch in den Volumenstrom einfließen. Die größte Abweichung entsteht somit an den hinteren Kanälen mit etwa 38 % gegenüber des Mittelwerts und ca. -10 % in der Mitte mit einer mittleren Abweichung von 9,5 %. Der Vergleich des Druckabfalls über die einzelnen Kanäle (Abb. 5 (a)) zeigt jedoch das erwartete Ergebnis eines zu den hinteren Kanälen abfallenden Drucks. So ist die Druckdifferenz zwischen Einlass und Auslass an den hinteren Kanälen um etwa 10 % geringer als an den vorderen Kanälen. Die Abweichungen beim Druckabfall sind aufgrund der linearen Abhängigkeit identisch mit denen der Volumenstromverteilung, fallen aber wegen der geringeren gesamten Abweichung stärker ins Gewicht. Der Trend ist dennoch für Messung und Simulation zu erkennen. Zu guter Letzt wurden die Kanaltiefen aus der Triangulation und der Strömungsmessung verglichen (Abb. 5 (b)). Bei der Messung wurde festgestellt, dass sowohl die Kanäle als auch die Stege zwischen den Kanälen eine Rauheit von bis zu  $30 \mu\text{m}_{\text{PP}}$  aufweisen, wodurch sich hier eine hohe Messunsicherheit ergibt, welche bei der Strömungsmessung mit  $5 \mu\text{m}$  als wesentlich geringer abgeschätzt wurde. Bis auf wenige Ausnahmen liegen die Tiefen aus der Strömungsprofilmessung im Bereich der Messabweichung der Tiefen aus der Triangulation, wodurch sich sagen lässt, dass der Profilsensor auch zur Kanaltiefenmessung eingesetzt werden kann.

### Anpassung der Manifold-Geometrie

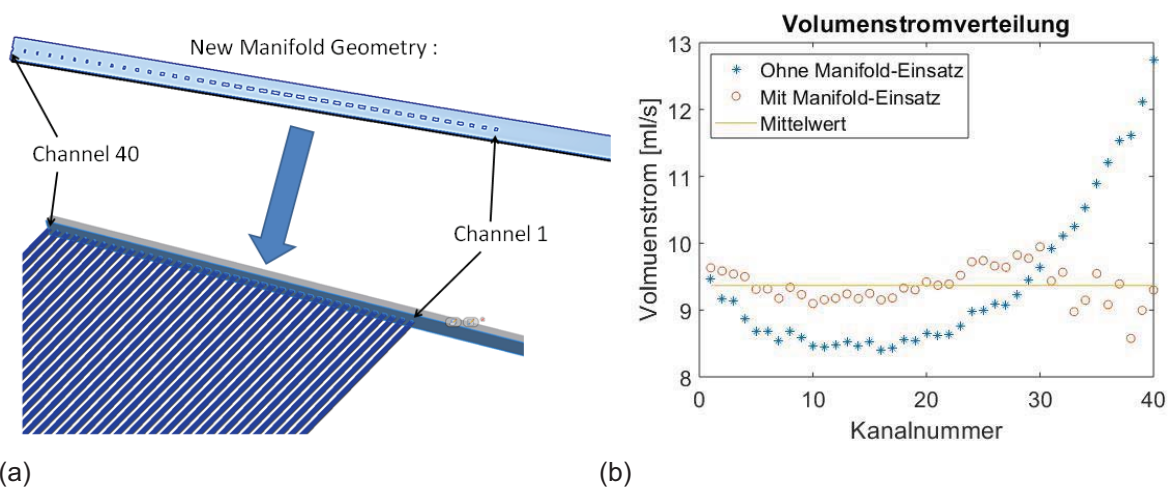


Abb. 6: (a) Neue Geometrie des Manifolds. Die Geometrie wird über einen Einsatz, welche in den Manifold gesetzt wird, implementiert. (b) Vergleich der Volumenstromverteilungen mit und ohne den Manifold-Einsatz.

Um die Gleichverteilung des Gases im Stack zu erreichen, wurde die Geometrie des Manifolds bearbeitet. Die bearbeitete Geometrie wird in Abb. 6 (a) präsentiert. Die Breite der Öffnung an dem Einlass der Zelle wurde unter Berücksichtigung der mit initialem Manifold berechneten Volumenstromverteilung angepasst. Diese Geometrie wurde mit denselben Strömungsbedingungen wie bei der initialen Geometrie berechnet. In Abb. 6 (b) wird die Verteilung des Volumenstroms über die Position der Zelle im Brennstoffzellenmodell gezeigt. Im Vergleich mit der initialen Verteilung wird das Gas im Stack mit der neuen Manifold-Geometrie besser verteilt. Eine maximale Überversorgung von ca. 6% beim Kanal 30 und eine maximale Unterversorgung von ca. 8% beim Kanal 38 bei einer mittleren Abweichung von 2,3 % wurden berechnet, was einem Viertel der vorherigen Abweichung entspricht. Die Geometrie soll weiter bearbeitet werden, um diese maximale Abweichung zu minimieren.

## Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass mit einem LD-PS im Zeitmultiplexbetrieb hochauflösende Strömungsmessungen an Kanälen möglich sind. Dabei wurde mit einer Messunsicherheit von  $2\sigma_{vx} \approx 0,26\%$  gezeigt, dass das Messsystem für die Messung der erwarteten geringen Abweichungen geeignet ist. In Simulationen wurde gezeigt, dass über einen passenden Einsatz im Manifold die mittlere Abweichung der Verteilung der Reaktionsgase von 9,5 % auf 2,3 % reduziert wird und damit die Effizienz eines entsprechenden Brennstoffzellenstapels verbessert werden kann. Durch einen passend gefertigten Einsatz sollen Messungen die Simulation validieren. Zusätzlich soll noch das Strömungsverhalten eines Mikrokanals auf einer Gas-Diffusions-Schicht, wie sie in Brennstoffzellen eingesetzt werden, untersucht werden.

## Dankesworte

Die Autoren danken der DFG für die Förderung im Rahmen des Projekts BU 2241/4-1 und der AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), Förderkennzeichen 18233 BG.

## Literatur

- Bandlamudi, G., 2011**, "Systematic Characterization of HT PEMFCs Containing PBI/H3PO4 systems. Thermodynamic Analysis and Experimental Investigations", Logos Verlag Berlin
- 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), 340-355
- Schmieder, F., Kinaci, M. E., Wartmann, J., König, J., Büttner, L., Czarske, J., Burgmann, S., Heinzl, A., 2016**, "Investigation of the flow field inside the manifold of a real operated fuel cell stack using optical measurements and Computational Fluid Mechanics", Journal of Power Sources 304C:155-163, (DOI 10.1016/j.jpowsour.2015.11.010)
- A. E. Ramos Ruiz, F. Schmieder, F. Moyon, L. Feierabend, M. Dues, J. W. Czarske, L. Büttner, 2018**, "Hochaufgelöste Strömungsmessungen in den Mikrokanälen einer Brennstoffzelle mittels Zeitmultiplex-Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor", Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik" Rostock
- P. C. Miles, 1996**, "Geometry of the fringe field formed in the intersection of two Gaussian beams", Appl. Opt., vol. 35, no. 30, pp. 5887–95.
- J. König, A. Voigt, L. Büttner, and J. Czarske, 2010**, "Precise micro flow rate measurements by a laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing", Meas. Sci. Technol., vol. 21, no. 7, p. 074005.
- J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, and H. Müller, 2002**, "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution," Meas. Sci. Technol., vol. 13, no. 12, pp. 1979–1989.
- H. Bruus, 2008**, "Theoretical Microfluidics", Oxford University Press