

ENTWICKLUNG DER MIKRO PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY METHODE FÜR GASPHASENSTRÖMUNG IN MIKROKANÄLEN

DEVELOPMENT OF THE MICRO PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY METHOD FOR GAS-PHASE FLOW IN MICRO CHANNELS

N. van der Schoot¹, S. Burgmann¹, C. Asbach², J. Wartmann¹, A. Heinzl¹, R. Lindken¹

Zentrum für Brennstoffzellentechnik gGmbH (1) Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (2)
Carl-Benz Straße 201 Bliersheimer Str. 60
47057 Duisburg 47229 Duisburg

Mikro Particle Image Velocimetry, Mikro-PIV, Gasphase, Aerosol, laserinduzierte Floreszenz
Micro Particle Image Velocimetry, Micro-PIV, gas-phase, aerosol, laser induced fluorescence

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie soll eine Messtechnik entwickelt werden, die Geschwindigkeitsmessungen der Gasströmung in Mikro-Kanälen von betriebenen Proton Exchange Membrane (PEM)-Brennstoffzellen ermöglicht.

Mit der Mikro-Particle Image Velocimetry (Mikro-PIV) Methode können Strömungen in Mikrokanälen derzeit nur für Flüssigkeiten analysiert werden. Zur Realisierung des Mikro-PIV Verfahrens für die Anwendung auf Mikrogasströmungen müssen geeignete Tracerpartikel gefunden werden, die dem Strömungsverlauf ideal folgen und nicht an den Kanalwänden haften bleiben. Außerdem müssen sie im Kanal optisch detektierbar sein.

Auf der Suche nach Tracer-Aerosolen, die diese Voraussetzungen erfüllen sind verschiedene Substanzen auf ihre Eignung getestet worden. Die Partikelbereitstellung wurde mit einem Aerosolgenerator, einem der Standardsysteme zur Bereitstellung luftgetragener Partikel, realisiert.

Es wurde überprüft, ob die Sichtbarkeit und die Partikelkonzentration der Feststoff- und Flüssigkeitsaerosole für eine Mikro-PIV Messung ausreichend sind. Anhand der Beobachtungen von Partikelablagerungen für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten an einer 90° Kanalumlenkung konnte das Partikelfolgeverhalten bewertet werden.

Mit Größenverteilungsmessungen wurde das Partikelgrößenspektrum der Aerosole ermittelt. Das Partikelfolgeverhalten, bzw. die Abweichung der Partikel von den realen Stromlinien in einer 90° Kanalumlenkung, wurde für verschiedene Partikelgrößen und brennstoffzellentypische Maximalgeschwindigkeiten analytisch, numerisch und experimentell betrachtet.

Ein Ethylenglycol-Rh-B-Aerosol hat im Vergleich mit anderen getesteten Substanzen eine höhere Intensität und eine höhere Anzahl auswertbarer Partikelsignale gezeigt. Beobachtungen des Partikelfolgeverhalten in einer 90° Kanalumlenkung zeigen die Notwendigkeit auf, ein System zu finden, mit dem es möglich ist, monodisperse Partikel zu generieren.

Einleitung

Untersuchungsmethoden für Mikrokanalströmungen in Brennstoffzellen sind bisher hauptsächlich für Flüssigkeitsströmungen entwickelt, siehe Martin et al 2005, Feser et al 2007, van der Schoot 2008 und van der Schoot 2009. Für Anwendungen z. B. in Brennstoffzellen und Gasmikroreaktoren ist jedoch die Auslegung der Gasströmung in Mikrokanälen wesentlich. Die Messung der Strömung ist zur Optimierung dieser Mikroanwendungen unerlässlich. Es wird angenommen, dass eine Optimierung der Gasströmungsführung in den Bipolarplatten einer Brennstoffzelle zu einer Erhöhung der Ausgangsleistung führt. Mit den Erkenntnissen aus optischen Strömungsuntersuchungen können eine gleichmäßige Verteilung der Reaktionspartner auf der Membranoberfläche erzielt und der Austrag von Wassertropfen als Reaktionsprodukt aus den Kanälen optimiert werden.

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist eine berührungslose, laseroptische Ganzfeldmessmethode, um Gas- oder Flüssigkeitsströmungen zu visualisieren und zu quantifizieren. Es können sowohl zwei- als auch dreidimensionale Strömungsbilder mit hoher örtlicher Auflösung erstellt werden. PIV auf Strömungen in Mikro-Kanälen anzuwenden, ist bisher nur für Flüssigkeitsströmungen möglich. Gründe hierfür sind die schlechte Sichtbarkeit von Tracern in Gas in Wandnähe auf Grund von Reflexion, unzureichendes Partikelfolgeverhalten, sowie Wechselwirkungen von Tracern mit der umgebenden Wand.

Im Unterschied zur klassischen PIV wird bei der Mikro-PIV-Methode (Santiago et al 1998) die zu untersuchende Strömung im Volumen ausgeleuchtet, s. Meinhart et al 2000. Als Lichtquelle dient ein Doppelpuls-Laser. Die Schärfentiefe bzw. die Korrelationstiefe der Mikroskopoptik bestimmt die Tiefe des Messbereiches. Eine detaillierte Beschreibung des Mikro-PIV Meßverfahrens ist in Wereley und Meinhart 2009 und in Lindken et al 2009 gegeben. Die klassische PIV hingegen arbeitet im makroskopischen Bereich in der Regel mit Lichtschnittebenen und detektiert Mie-Streuung zur Abbildung der Partikel. Um kleinste Kanäle mit Durchmessern bis maximal 1mm zu untersuchen, kommt in der Mikro-PIV häufig ein Mikroskop zum Einsatz und man arbeitet bevorzugt mit farbstoffbeschichteten Partikeln, deren Fluoreszenzsignal detektiert wird, Meinhart et al 1999. So wird das Signal- zu Rauschverhältnis der Partikelbilder im Vergleich zur Hintergrundintensität erhöht, die für die zu untersuchenden Mikrokanäle üblicherweise einen Durchmesser von einigen hundert Nanometern bis wenigen Mikrometern haben. Bei diesem Prinzip regt Laserstrahlung im sichtbaren grünen Bereich den Farbstoff an, der infolgedessen rotes Fluoreszenzlicht emittiert. Die durch einen Fluoreszenzfilter aufgenommenen Bilder werden nur mit dem Fluoreszenzlicht belichtet, das reflektierte grüne Licht wird von einem Filter subtrahiert. Durch diese Markierung heben sich die Partikel deutlich vom Hintergrund ab. In Abbildung 1 ist ein Aerosol aus fluoreszierenden Wassertröpfchen in Luftströmung direkt am Ausgang eines Atomizers zu sehen.

Es müssen also fluoreszierende Partikel gefunden werden, die dem Strömungsverlauf folgen, nicht an den Kanalwänden haften bleiben und im Kanal detektierbar sind. Die Tracerpartikel, die für den Einsatz in Mikro-Kanälen in flüssiger Phase oder in Makro-Gasströmungen geeignet sind, sind nicht zwangsläufig auch für den Einsatz in Mikro-Kanälen in Gasphase geeignet. Materialien die für Makro-Gasströmungen verwendet werden, müssen für die Verwendung als Aerosolmaterialien für Mikro-Gasströmungsmessungen mit Fluoreszenzfarbstoff versetzt werden. In den engen Mikro-Kanälen kommen außerdem Oberflächeneffekte hinzu, die die Partikel vom Weg ablenken oder sogar an der Wand anhaften lassen. Trägheitseffekte, welche durch unterschiedliche Dichte des Partikelmaterials und des Gases verursacht werden, beeinflussen ebenfalls das Partikelfolgeverhalten.

Erste PIV-Messungen der Gasströmung in Brennstoffzellen wurden realisiert. Grega et al untersuchten 2007 ein um den Faktor zwei größer skaliertes PEM-Brennstoffzellenmodell

aus Plexiglas, bestehend aus Einlass, 21 Einzelzellen und Auslass. Die Strömung durch das Modell wurde generiert, indem ein 15cm langer Einlassbereich die Luftströmung aus einem Windkanal in den Eingangsverteiler leitet. Die Luftströmung war mit ölbasierten Tracern angereichert. Es wurde ein Zusammenhang zwischen der Strömungsverteilung im Eingangsverteiler und den Einzelzellen gefunden. Im Eingangsverteiler vor jeder Zelle und in den Einzelzellen wurden jeweils Geschwindigkeitsprofile gemessen, deren mittlere Geschwindigkeiten einen ähnlichen Trend aufwiesen.

Die Anwendung der Gasphasen-Mikro-PIV in Millimeterkanälen nutzten Yoon et al 2006 und Huang et al 2009. Yoon et al 2006 analysierten ein transparentes Modell mit U-förmigen Kanalumlenkungen. Als Tracer wurden Rauchpartikel ($<1\mu\text{m}$) und Wassertröpfchen ($1-8\mu\text{m}$) getestet. Im Falle der Wasser-Tracer wurde die relative Luftfeuchtigkeit im Kanal auf 100% geregelt. Eine Heizung beheizte die Kanalwände und verhinderte das Auskondensieren von Wassertröpfchen an den Wänden. Die Geschwindigkeitsverteilung der Luftströmung in komplexen Geometrien wurde erfolgreich gemessen.

Die genannten Arbeiten nutzen die Lichtschnittbeleuchtung in transparenten, nicht betriebenen Modellen.

Sugii und Okamoto 2006 untersuchten ein Glasmodell mit 1mm Kanal unter Verwendung fluoreszierender Ölpartikel. Sie beleuchteten den Messbereich von der Seite mit einem Nd:YAG Laser im Volumen und detektierten im 90° Winkel zum einfallenden Laserstrahl die Partikelsignale unter Verwendung eines Mikroskops. Die Strömungsverteilung wurde in einem geraden Kanal gemessen und mit Particle Tracking Velocimetry ausgewertet. Eine Aussage zum Folgeverhalten der Partikel wurde nicht gemacht.

In der vorliegenden Arbeit wird die Mikroskopieauflichtmethode mit Fluoreszenzdetektion zur Realisierung des Gasphasen-Mikro-PIV-Analyseverfahrens angewendet. Wegen der beschränkten Zugänglichkeit der Brennstoffzellen-Kanäle ist die klassische PIV-Methode mit Lichtschnittbeleuchtung für unser Vorhaben nicht einsetzbar.

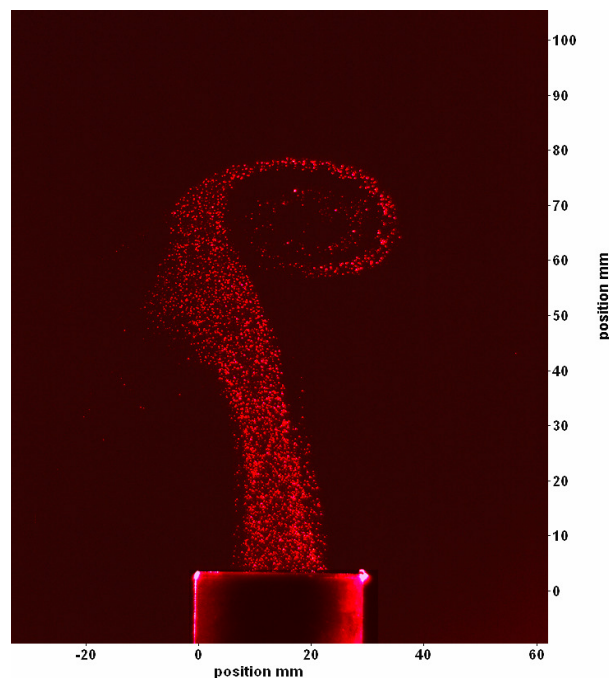


Abb. 1: Fluoreszierende Wassertröpfchen in Gasströmung ($d_m \sim 3\mu\text{m}$)

Anforderungen an die Tracer

Das Ziel, mit Mikro-PIV in betriebenen Brennstoffzellen zu messen, legt die geforderten Einsatzbedingungen für das Tracer-Aerosol fest. Die Kanaldurchmesser in Brennstoffzellen liegen zwischen 200µm in Mikrosystemen und 1mm in Standardanwendungen. Die zu untersuchenden Kanalgeometrien sind unterschiedlich, z. B. einfacher gerader Kanal, 90°- und 180°-Umlenkung. Typische Reynoldszahlen in den Kanälen sind 10 (Anode) und 300 (Kathode), mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von 1,5m/s Wasserstoffströmung für die Kanäle der Anodenseite und 5,0m/s Luftströmung für die Kanäle auf der Kathodenseite. Die Temperatur in NT (Niedrigtemperatur)-PEM Brennstoffzellen liegen üblicherweise zwischen 60 und 85°C und in HT (Hochtemperatur)-PEM Brennstoffzellen zwischen 160 und 180°C.

Die benötigte Partikelkonzentration des Aerosols für eine PIV-Auswertung eines 1mm Kanals wird im Folgenden abgeschätzt. Der Aufnahmesensor der CCD-Kamera besitzt eine Aufnahmefläche von 8,9mm x 6,7mm, so dass zum Analysieren der Strömung für diese Kanalbreite sinnvollerweise mit einem 5-fachen Vergrößerungsobjektiv gearbeitet werden sollte. Damit wird ein Ausschnitt von 1,78mm x 1,34mm abgebildet. Für die Berechnung der Strömungsvektoren über Kreuzkorrelation wird das per CCD-Kamera aufgenommene Bild in gleich große Quadrate, sogenannte Auswertefenster, aufgeteilt. Der Aufnahmesensor ist aus quadratischen 6,45µm x 6,45µm großen Pixeln aufgebaut und besteht somit aus 1376Pixeln x 1040Pixeln. Idealerweise wird dieses Aufnahmegebiet für die Kreuzkorrelation in 32Pixel x 32Pixel große Auswertefenster unterteilt. Da 1Pixel genau 6,45µm/5 x 6,45µm/5 (5: Vergrößerung des Objektivs), d. h. 1,3µm x 1,3µm der Strömungsstruktur abbildet, erfasst das 32Pixel x 32Pixel große Auswertefenster eine Fläche von etwa. 40µm x 40µm.

Für das PIV-Verfahren sollte in jedem Auswertefenster bei jeder Aufnahme mindestens Signale von drei Partikeln registriert werden. Dazu tragen alle Partikel bei, die innerhalb des Schärfebereichs des Vergrößerungsobjektivs, aber auch noch etwas oberhalb und unterhalb davon strömen. Dieser Bereich wird durch die Korrelationstiefe beschrieben (Olsen und Adrian 2000). Für einen typischen Partikeldurchmesser von 1,0µm ergibt sich eine Korrelationstiefe von 90µm. Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass in der Strömung mindestens drei Partikel in einem 40µm x 40µm x 90µm großen Quader vorhanden sein sollte. Dies entspricht einer Partikelanzahlkonzentration von idealerweise $2,1 \times 10^7$ Partikel/cm³. Diese Konzentration liegt in dem Bereich, in dem Partikelkoagulation in Betracht gezogen werden muss, so dass Messungen in diesen kleinen Dimensionen auf Grund physikalischer Grenzen bei der Partikelbereitstellung eine große Herausforderung darstellen. Es gibt jedoch Lösungsansätze, wie z.B. eine Erhöhung der Anzahl der Strömungsaufnahmen, mit denen statische Strömungen mit „ensemble averaging“ (Meinhart et al 1999) auch bei deutlich niedrigeren Partikelkonzentrationen ausgewertet werden können.

Die Wahl einer für die Strömungsvisualisierung geeigneten Partikelgröße stellt einen Kompromiss zwischen Sichtbarkeit und Partikelfolgeverhalten dar. Sehr kleine Partikel unterhalb von etwa 100nm werden durch die Brownsche Molekularbewegung beeinflusst und führen selbst bei absolut laminarer Strömung eine Schwankungsbewegung aus, Einstein 1905. Die Brownsche Molekularbewegung verursacht Ablagerungen der Partikel $d < 100$ nm an den Wänden des Strömungskanals (Gormley et al 1949). Die mittlere thermische Geschwindigkeit \bar{c} (s. Gleichung 1, Hinds 1999) ist

$$\bar{c} = \left(\frac{48kT}{\pi^2 \rho_p d^3} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Ein 100nm Partikel wird durch Diffusion 30x schneller transportiert als ein 1µm Partikel. Für unsere Messung mit $dt \sim 10\mu s$ ist der durch Brownsche Molekularbewegung verursachte Fehler $7,8 \times 10^{-3}$ Pixel für 100nm Partikel und $2,4 \times 10^{-3}$ Pixel für 1µm Partikel. Diese Werte sind vernachlässigbar im Vergleich mit dem statistischen Auswertefehler der PIV Daten (Westerweel 2000). Eine entsprechende Formulierung dieser Fehlerrechnung findet sich in Lindken et al 2006. Gleichung 1 beschreibt die Abhängigkeiten der mittleren thermischen Geschwindigkeit. Hierbei ist k die Boltzmann Konstante, T die Temperatur, ρ_p die Partikeldichte und d der Partikeldurchmesser.

Sind die Partikel zu groß, können sie auf Grund der Trägheit von den realen Stromlinien bei Richtungsänderungen der Strömung abweichen. Für Stokes Zahlen $St \rightarrow 0$ stimmen die Partikelbahnen mit den Stromlinien des Fluids überein. In Gleichung 2 und 3 ist ρ_p die Partikeldichte, ρ_F die Dichte des Fluids, d der Partikeldurchmesser, u ein charakteristisches Geschwindigkeitsmaß der Strömung, t_T die Relaxationszeit, η die Viskosität des Fluids, L ein charakteristisches Längenmaß der Strömung und C_C ein Korrekturfaktor der den Schlupfeffekt der Partikel berücksichtigt (Hinds 1999). Da typischerweise kein Schlupf vorhanden ist, ist $C_C=1$. Für eine größtmögliche Genauigkeit der Strömungsgeschwindigkeitsmessung ist eine möglichst kleine Stokes Zahl notwendig.

$$St = \frac{\rho_p d^2 u C_C}{18\eta L} \quad (2)$$

Bei den z. T. üblichen rapiden Änderungen der Strömung in einer Bipolarplatte müssen trägheitsbedingte Effekte bereits ab einer Größe von ca. 300nm berücksichtigt werden, Hinds 1999. Im Hinblick auf das Strömungsfolgeverhalten sind also Partikelgrößen zwischen 100nm bis 300nm ideal.

Die Strecke s_T , die das Partikel durch Trägheitseffekte bei einer bestimmten Geschwindigkeit vom Weg abgelenkt wird, kann für verschiedene Durchmesser des detektierten Partikels über die Relaxationszeit t_T , abgeschätzt werden, siehe Gleichung 3 und 4 (Ruck 1990 und Raffel et al 1998). Die Relaxationszeit t_T eines Partikels ist die Zeit, in der das Partikel nach einer Störung im System, z. B. einer Kanalkrümmung, seine Geschwindigkeit der neuen Richtung angepasst hat.

$$t_T = \frac{d^2 |\rho_p - \rho_F|}{18\eta} \quad (3)$$

$$s_T = u_0 \cdot t_T \quad (4)$$

Im Hinblick auf die Intensität sollten die Tracer größtmöglich gewählt werden. Allerdings ist die Intensität nicht nur von der Partikelgröße, sondern auch von der Mikroskopvergrößerung, der Intensität der Laserstrahlung am Messort und von dem Maß der Fluoreszenzintensität des Gemisches aus Fluoreszenzstoff und Trägerflüssigkeit abhängig.

Es ist weder bekannt ab welcher Größe die fluoreszierenden Partikel mit den verwendeten Systemeinstellungen detektierbar sind noch welche Größe die Partikel haben dürfen, um für unsere Anwendung, Geschwindigkeiten bis 5m/s, soweit der Strömung zu folgen, dass verwertbare Ergebnisse erzielt werden können. Aus diesem Grunde wurden verschiedene Substanzen auf ihre Eignung als Tracermaterial getestet.

Weitere Anforderungen an das Material des Aerosols sind ein kleiner Dampfdruck, eine Dichte möglichst nah an der des zu untersuchenden Gases und geringe oder keine Toxizität. Für

Substanzen mit einem niedrigen Dampfdruck kann davon ausgegangen werden, dass die Größe der erzeugten Aerosoltröpfchen konstant bleibt und kein vorzeitiges Verdunsten der Partikelsubstanz stattfindet, wie es z. B. bei Wassertröpfchen (Dampfdruck 2.300Pa) der Fall wäre. Außerdem sollte die zu untersuchende Brennstoffzelle durch die Kontaminierung mit Tracermaterial nicht vergiftet werden bzw. die chemischen Abläufe in der Zelle beeinflussen.

Experiment, Ergebnisse und Diskussion

Auf der Suche nach Tracer-Aerosolen, die die oben geforderten Voraussetzungen erfüllen, sind verschiedene Substanzen auf ihre Eignung getestet worden. Die Partikelbereitstellung wurde mit einem Atomizer Aerosolgenerator AGK2000 (Firma Palas) mit Trockenstrecke, betrieben bei 1bar Vordruck, realisiert. Die Vor- und Nachteile anderer Partikelgeneratoren werden in McKeon et al 2007, Melling 1997 und Mazumder et al 1975 erklärt. Zur Überprüfung der Sichtbarkeit wurden Mikro-PIV Rohdatenbilder aufgenommen und ausgewertet. Das zur Durchführung verwendete Mikro-PIV System besteht aus einer PCO Sensicam QE 12bit (4096 Grauwertstufen) CCD-Kamera mit 1376x1040 Pixel Auflösung mit hoher Quanteneffizienz von 62% bei 610nm, einem Zeiss Epifluoreszenz-Mikroskop, einem frequenzverdoppelten Pegasus Nd:YLF Laser (527nm) und LaVision DaVis 7.2 PIV-Software.

Getestet wurden die Substanzen DEHS (Diethylhexylsebacat), Ethylenglycol, 3M Novec 7500 engineered fluid und eine wässrige Suspension mit 0,52µm PSL-Feststoffpartikeln (Polymer Microspheres Red Fluorescing 0,1% solids), wobei die Flüssigkeiten mit Rhodamine-B Farbstoff versetzt wurden, um sie fluoreszierend zu machen. Die Rh-B Farbstoffkonzentration ist 2.000mg/l. Vorversuche haben ergeben, dass die Fluoreszenzintensität für Ethanol ab dieser Konzentration nicht weiter ansteigt. Bei der Novec-Flüssigkeit und auch beim DEHS war die Zugabe von Isopropanol notwendig um den Farbstoff zu lösen. Das Isopropanol wurde anschließend durch Abdampfen, bei Temperaturen etwas oberhalb des Siedepunktes von Isopropanol (82°C) wieder aus den Lösungen entfernt, wobei allerdings auch die Rh-B Kristalle wieder ausfielen. Es blieb etwas Rh-B Farbstoff in Lösung, allerdings ist nicht auszuschließen, dass ebenfalls Reste des Lösungsmittels nach dem Abdampfen zurückblieben, da dies nur durch Wiegen (vor und nach dem Abdampfen) überprüft wurde.

Die PSL-Partikel sind mit Rh-B Fluoreszenzfarbstoff beschichtet. Eine Tabelle mit den Eigenschaften dieser Substanzen ist in Abb. 2 zu sehen.

	Dampfdruck [Pa]	Siedepunkt [°C]	Dichte [g/cm ³]	Toxizität LD50 Ratte [g/kg]	Rh-B Löslichkeit
Ethylenglycol	5,30	197,6	1,11	>2,0	gut
DEHS	1,9 x 10 ⁻⁶	529,0	0,91	12,8	nicht
3M Novec 7500	800	128,0	1,60	>0,2	nicht
PSL (0.5 µm)			1,05	Nicht toxisch	coated

Abb. 2: Tabelle Eigenschaften der untersuchten Substanzen

Als geeignet hat sich bisher ein Aerosol aus Ethylenglycol mit Rhodamin-B (Rh-B) Markierung erwiesen. Der Fluoreszenzfarbstoff Rh-B ist in Ethylenglycol gut löslich. Desweiteren sind ein niedriger Dampfdruck (0,053hPa), hoher Siedepunkt (197,6°C), geringe Dichte (1,11g/cm³) und geringe Toxizität ideal für die Verwendung als Tracer in Brennstoffzellen-Mikrogasströmungen. Die Auswertung von Partikelrohdatenbildern der verschiedenen Aerosole zeigt, dass die Sichtbarkeit des Ethylenglycol-Rh-B-Aerosols wesentlich höher ist als bei den anderen Flüssigkeits- und auch den Feststoffaerosolen. Die DEHS- und Novec-Aerosole sind im Kanal bei 3,25x und 1,6x Vergrößerung nicht detektierbar.

Die Intensität des Feststoffaerosolsignals ist ebenfalls gering. Allerdings ist die PSL-Partikelgröße, mit 0,52µm, relativ klein. Sie waren bei 3,25-facher Vergrößerung gerade im Kanal detektierbar. Sie weisen maximal 279Grauwertstufen an Intensität auf, bei einem mittleren Partikelbilddurchmesser auf dem CCD-Chip von 1-2Pixel. Die gemäß Partikelgrößenverteilungsmessungen (s. Abb. 4) im Mittel 1,4µm großen Ethylenglycol-Rh-B-Partikel mit einem Rh-B Anteil von 0,2% zeigen bei 3,25-facher Vergrößerung maximal 1693Grauwertstufen Helligkeit bei 4-16Pixel. Ein Ethylenglycol Rohdatenpartikelbild ist in Abb. 3 (links) zu sehen. Die Fokusebene lag bei diesen Untersuchungen in der Kanalmitte. Bei 1,6-facher Vergrößerung zeigen die Bilder noch 510Grauwertstufen und 1-2Pixel pro Partikel.

Bei 3,25x-facher Mikroskopvergrößerung wird ein Bildausschnitt von max. 2,2mm x 3mm auf dem CCD Chip abgebildet. Pro Auswertebild sind etwa 30Partikelbilder in dem Kanalausschnitt, also auf einer Fläche von 1mm x 3mm, zu sehen. Die niedrige Partikelkonzentration reicht nicht aus um mittels konventionellen Kreuzkorrelationsauswertungen detaillierte Geschwindigkeitsverteilung zu ermitteln. Die stationäre Strömung wird daher mittels „Sum of correlation“ (Wereley und Meinhart 2000) ausgewertet, s. Abb. 3 (rechts), bei der Korrelationsebenen aufsummiert werden und nach der Summation der Korrelationspeak gesucht wird.

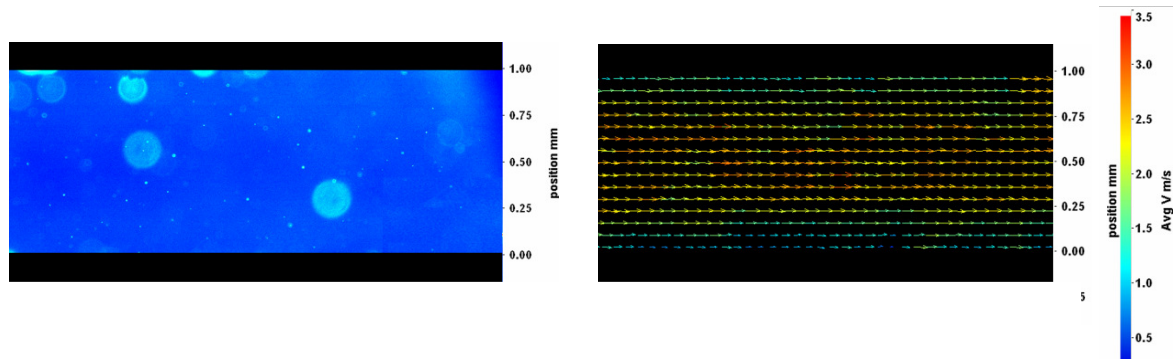


Abb. 3: (links) Ethylenglycol Rh-B Partikelrohdatenbild, (rechts) Geschwindigkeitsfeld PIV Ergebnis über 50 Doppelbilder in 1mm Kanal

Auch die PSL Anzahlkonzentration des Feststoffaerosols ist zu gering für eine PIV-Auswertung. Im Mittel sind in jedem Auswertebild nur 1,3Partikel vorhanden. Hier müsste über eine große Anzahl von Bildern gemittelt werden, um die Berechnung eines Vektorfeldes möglich zu machen. Ein Grund für die niedrige Anzahlkonzentration des Feststoffaerosols ist das Generierungsverfahren. Bei der Feststoffpartikelerzeugung werden feine Tröpfchen einer Suspension erzeugt. Die PSL Partikel werden durch das Passieren einer Trockenstrecke erzeugt. Die maximale Partikelanzahlkonzentration ist bei diesem Generierungsprozess durch die Ausgangssuspension vorgegeben, allerdings steht nur ein geringer Prozentsatz der generierten Tröpfchenkonzentration schließlich tatsächlich als Feststofftracer zur Verfügung, da sich nicht in jedem Tröpfchen genau ein Feststoffteilchen befindet.

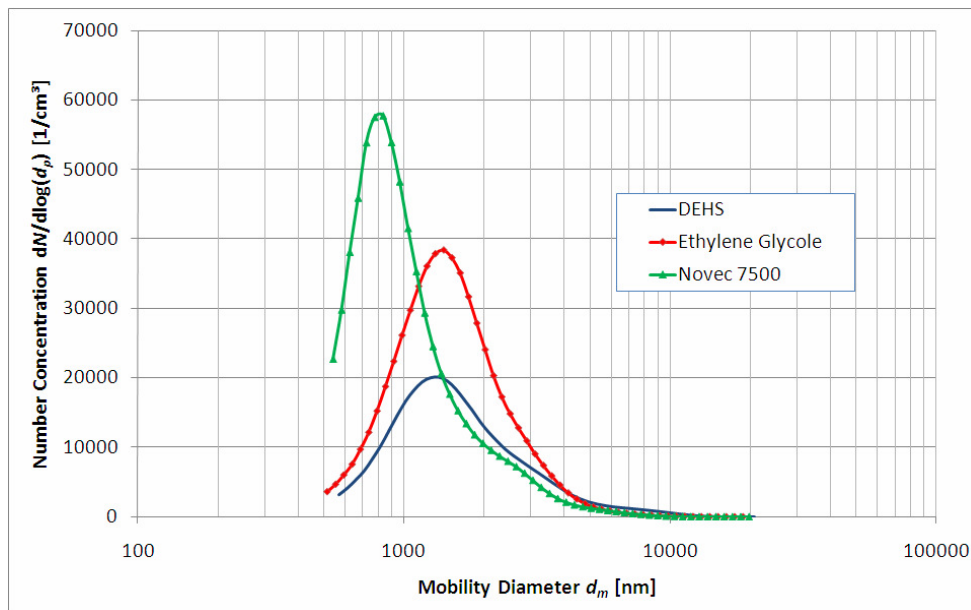


Abb. 4: Partikelgrößenverteilungsmessungen verschiedener Flüssigkeitsaerosole

Mit einem Aerodynamic Particle Sizer (APS) TSI3321 wurden Partikelgrößenverteilungsmessungen der Flüssigkeitsaerosole durchgeführt, s. Abb.4. Es wurden ein mittlerer Durchmesser von etwa $1,4\mu\text{m}$ und eine Anzahlkonzentration von $38.000\text{Partikeln}/\text{cm}^{-3}$ für das Ethylenglycol-Rh-B-Aerosol ermittelt. Der mittlere Durchmesser des DEHS-Aerosols ist mit $1,3\mu\text{m}$ geringfügig kleiner. Die Anzahlkonzentration liegt allerdings nur bei $20.000\text{Partikeln}/\text{cm}^{-3}$. Die 3M Novec 7500 Flüssigkeit zeigt im Vergleich zu den beiden anderen getesteten Substanzen einen kleineren mittleren Durchmesser von $0,8\mu\text{m}$, aber eine höhere Anzahlkonzentration von $58.000\text{Partikeln}/\text{cm}^{-3}$.

Da die mittleren Partikelgrößen der Substanzen, besonders im Falle Ethylenglycol und DEHS, vergleichbar sind, scheint die Größe nicht der Grund für die ungenügende Sichtbarkeit des DEHS-Aerosols und 3M Novec 7500-Aerosols zu sein. Mit größerer Wahrscheinlichkeit ist die geringe Fluoreszenz der Flüssigkeiten hierfür verantwortlich, die schon mit bloßem Auge, an der Färbung der Substanz, zu erkennen ist.

Die Ablenkung der Ethylenglycol-Partikel vom realen Weg der Luftströmung, als Maß für das Partikelfolgeverhalten, wird im Folgenden abgeschätzt. Es werden Werte gewählt, die unterhalb der maximalen Reynoldszahlen von 300 und Strömungsgeschwindigkeiten von 5m/s liegen, die die Luftströmung in den Kanälen auf der Kathodenseite in PEM-Brennstoffzellen, betrieben bei Standardbedingungen, besitzt. Außerdem wird diese Abschätzung für die maximal im Aerosol vorhandene Partikelgröße ($10\mu\text{m}$) bzw. mittlere Partikelgrößen ($1,4\mu\text{m}$) durchgeführt. Nach Gleichung 3 und 4 ergibt sich für eine mittlere Geschwindigkeit von $0,32\text{m/s}$ ($\text{Re}=19$) und die maximale Partikelgröße eine Ablenkung von $s_T=115,5\mu\text{m}$, das sind $13,6\%$ des Kanaldurchmessers und für die mittlere Partikelgröße von $1,4\mu\text{m}$ eine Ablenkung von $2,2\mu\text{m}$, was einem Kanaldurchmesser von nur $0,3\%$ entspricht. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von $2,38\text{m/s}$ ($\text{Re}=138$) ist die Ablenkung $0,9\text{mm}$ ($10\mu\text{m}$), was $101,0\%$ des Kanaldurchmessers entspricht bzw. $16,7\mu\text{m}$ ($1,4\mu\text{m}$), was $2,0\%$ des Durchmessers entspricht. Demnach wird angenommen, dass der größte Anteil an Tracern des Aerosols, die den mittleren Durchmesser von $1,4\mu\text{m}$ besitzen, weitestgehend der Strömung folgt, während sich vorwiegend die größeren Partikel an den Kanalwänden anlagern.

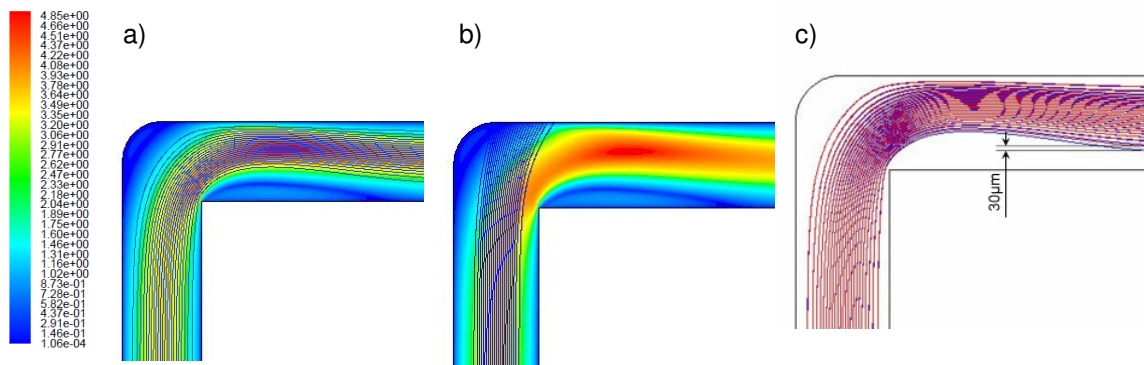


Abb. 5: CFD-Simulationen der Strömung in einer 90° Kanalumlenkung für $Re=138$, die reale Strömung ist in Farbverteilung dargestellt, s. Balken links in m/s, die Stromlinien zeigen den Weg für ein a) $1\mu\text{m}$ großes Teilchen und b) $10\mu\text{m}$ großes Teilchen, c) Vergleich 300nm zu $1\mu\text{m}$ Teilchen

Dieses Annahme wird auch durch CFD-Simulationen bestätigt (s. Abbildung 5). Sie wurde für Luftströmung mit $Re=138$ an einer 90° Kanalumlenkung berechnet. Die Partikelbahnen von $1\mu\text{m}$ Partikeln ($\rho_p = 1,0\text{g/cm}^3$) im Fall a) folgen in ausreichendem Maß der Strömung. Es kommt zu keinen Partikelkollisionen an der Wand. Die $10\mu\text{m}$ Partikel hingegen, Fall b), folgen der Strömung nicht, so dass diese an der Wand anhaften. Eine detailliertere Betrachtung des Partikelfolgeverhaltens in Form eines Vergleichs der Partikelbahnen von 300nm und $1\mu\text{m}$ Partikeln, Abb. 5c), zeigt eine Abweichung der Partikelbahnen von bis zu $30\mu\text{m}$ für die Stromlinien innen am Ort der Umlenkung.

Für verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten ($0,32\text{m/s}$ und $2,38\text{m/s}$) wurden Partikelrohdatenbilder des Ethylenglycol-Rh-B-Aerosols an einer 90° Kanalumlenkung zur Zeit $t_0=0\text{s}$ und $t=t_0+40\text{s}$ verglichen, s. Abbildung 6. Bei der Geschwindigkeit $0,32\text{m/s}$ konnten nur geringe Partikelanhaftungen beobachtet werden. Bei $2,38\text{m/s}$ wurde allerdings eine zunehmende Verschmutzung der Kanalwand nach der Krümmung durch anhaftendes Partikelmaterial beobachtet.

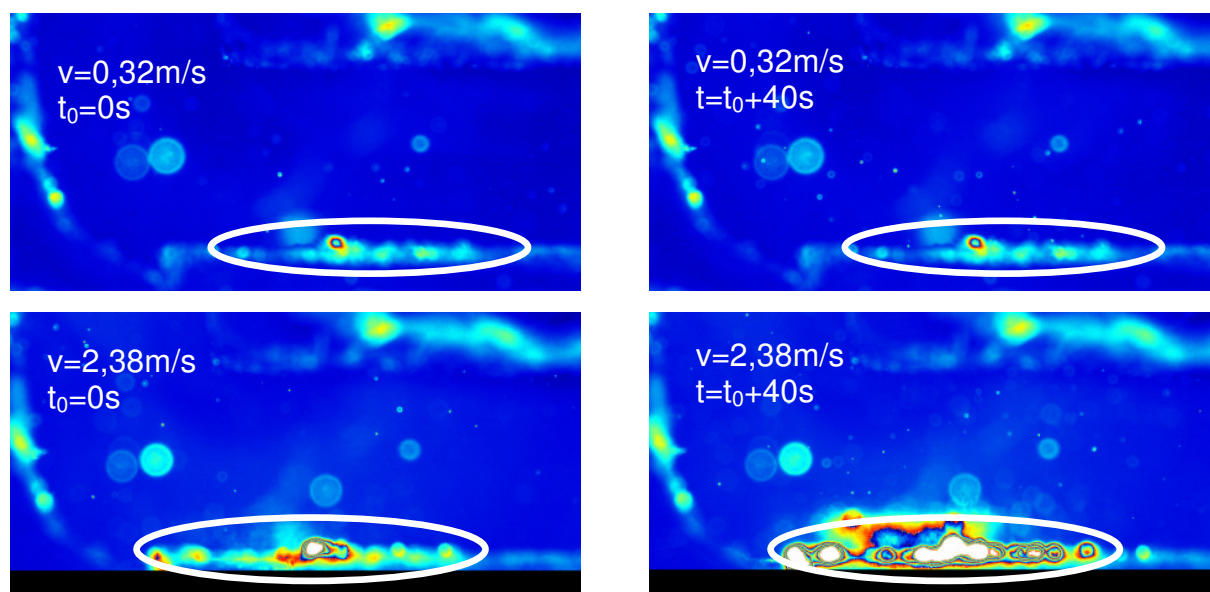
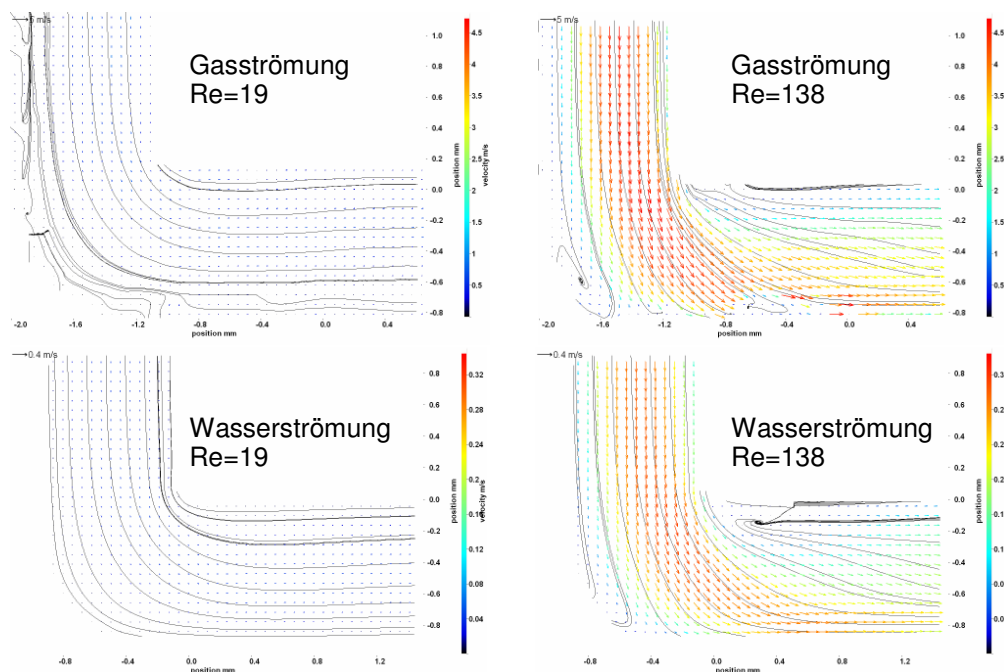


Abb. 6: Beobachtung von Partikelablagerungen nach einer 90° Kanalumlenkung in einem $0,9\text{mm}$ Kanal bei verschiedenen Geschwindigkeiten des mit Ethylenglycol-Rh-B-Aerosol versetzten Luftstromes

Die PIV-Ergebnisse dieser Rohdatenbilder in der 90° Kanalumlenkung wurden für zwei verschiedene Geschwindigkeiten (0,32m/s entsprechend $Re=19$, 2,38m/s entsprechend $Re=138$) des Ethylenglycol-Rh-B-Aerosols in Luft mit PIV-Messungen von MF-Partikeln in Wasserströmung verglichen. Diese Messungen wurden für die verschiedenen Medien mit gleichen Reynoldszahlen durchgeführt, um das Folgeverhalten der Partikel abschätzen zu können. Für die Mikro-PIV Messungen in Wasser wurden $8\mu\text{m}$ MF (Melaminharz) Partikel ($\rho_{PSL} = 1,51\text{g/cm}^3$) als Tracer verwendet. Durch den kleinen Dichteunterschied von Melaminharz und Wasser, sind Trägheitseffekte hier sehr gering und die Ablenkung der Partikel von den Stromlinien nur $s_T=0,3\mu\text{m}$ ($Re=138$). Abb.7, zeigt die Geschwindigkeitsverteilung für zwei Reynoldszahlen $Re=19$ und $Re=138$ in Gasströmung (oben), in Wasserströmung (mitte) und mittels 2D CFD simuliert (unten). Für den Fall $Re=19$ weisen die Geschwindigkeitsverteilungen in Wasser und Luft keine signifikanten Unterschiede auf. Hieraus schließen wir, dass die Tracerpartikel der Gasströmung folgen. 2D-FLUENT-Simulation weist ein deutlich größeres Rezirkulationsgebiet hinter der Strömungsumlenkung auf. Dies ist ein typisches Verhalten von zweidimensionaler Simulation, in der der Effekt der oberen und unteren Kanalwand nicht berücksichtigt ist. Die Geschwindigkeitsverteilungen der Luft und Wasserströmung bei $Re=138$ deuten auf eine Verschiebung der maximalen Geschwindigkeit im Auslasskanal zur äußeren Kanalwand. Für die Wasser- und die Gasströmung detektieren wir die maximale Geschwindigkeit des Profils im Auslasskanal $130\mu\text{m}$ von der Kanalwand entfernt. Entgegen unserer Erwartung weisen bei hoher Reynoldszahl die Geschwindigkeitsverteilung für Luft und Wasser nur geringe Unterschiede auf. Dies spricht dafür, dass die Tracerpartikel auch bei hohen Geschwindigkeiten der Strömung folgen. Dem widerspricht die Beobachtung der Partikelablagerung an der Kanalauswand. Bei einer großen Streuung des Partikeldurchmessers befinden sich einerseits genügend kleine Partikel im Aerosol, die der Strömung folgen und eine korrekte Mikro-PIV-Messung gewährleisten. Andererseits erreichen auch große Partikel den Messort, die nicht der Strömung folgen und an der Wand abgelagert werden. Die Simulationen bei $Re=138$ unterscheiden sich von den Messungen. Die maximale Geschwindigkeit ist zur Kanalmitte hin verschoben. Das Rezirkulationsgebiet ist bei hohen Reynoldszahlen in der Simulation kleiner als im Experiment. Wie zuvor erwähnt können zweidimensionale CFD-Rechnungen die Strömungsablösungen nicht auflösen, so dass zeitaufwändige 3D-Rechnungen für einen Vergleich notwendig sind.



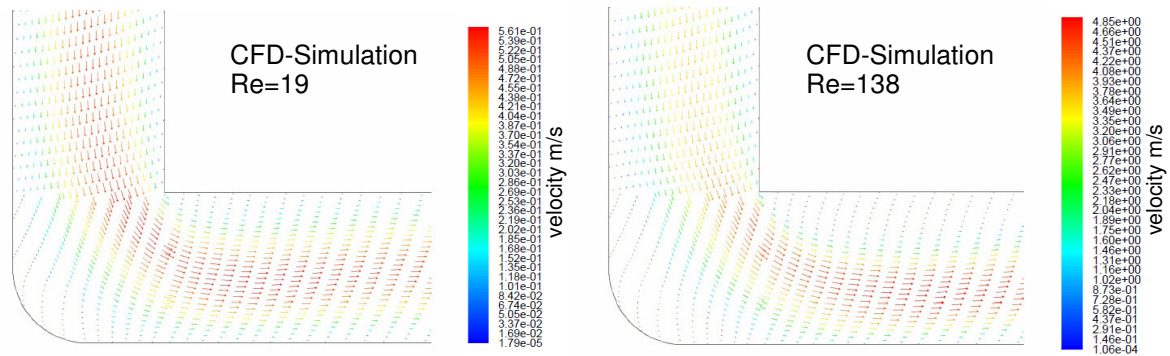


Abb. 7: Vergleich der Strömungsprofile von Gasströmung (oben), Wasserströmung (mitte) und CFD Simulation (unten) in einer 90° Kanalumlenkung. Im WassermodeLL wurde mit äquivalenten Strömungsgeschwindigkeiten gemessen.

Ausblick

Das Ethylenglycol-Rh-B-Aerosol hat sich in Signalstärke, Anzahl auswertbarer Partikel am Messort und im Partikelfolgeverhalten als geeignet erwiesen.

Die Beobachtungen an der 90° Kanalumlenkung (Abb. 6) zeigen allerdings auch, dass das hier eingesetzte Aerosol eine Partikelgrößenverteilung aufweist, die für unsere Anwendung mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 5m/s wie sie in Brennstoffzellen üblich ist, nicht geeignet ist. Tracer werden an starken Kanalkrümmungen abgeschieden.

Der für die Partikelgenerierung verwendete Atomizer erzeugt Partikel die nominal zwischen 5nm und 10µm groß sind. Dieses System ist nicht optimal für unsere Anwendung. Die kleineren Partikel sind mit unserer Methode nicht detektierbar und die großen Partikel folgen der Strömung nicht und verschmutzen durch Ablagerung an den Wänden den Kanal.

Um die Methodik weiter zu verbessern muss eine Möglichkeit gefunden werden fluoreszierende Partikel möglichst monodispers (etwa 0,5-2µm) zu generieren. Andere Partikelgeneratoren mit verschiedenen Parametereinstellungen wie der Vordruck der Generatoren, andere Partikelmaterialien und Fluoreszenzfarbstoffe können getestet werden.

Der Einbau eines Partikelabscheiders in die Aerosolzuführung würde die Abscheidung der großen Partikel vor dem Messort ermöglichen. Die Partikelanzahl im Bereich 0,5-2µm sollte erhöht werden. Dies ist einerseits durch Verkürzen und Optimierung der Zuleitungen möglich oder die Wahl eines anderen Generierungssystems.

Im Falle der Feststoffaerosole ist die Forderung nach der Monodispersität der Partikel gegeben. Allerdings muss die Partikelanzahlkonzentration im Kanal erhöht werden. Die Anzahl der generierten Partikel kann durch die Verwendung einer höheren Konzentration der Ausgangssuspension maximiert werden. Die Tests wurden mit verdünnten Suspensionen von 0,1% Feststoffgehalt durchgeführt. Die Suspensionen vom Hersteller weisen einen Feststoffgehalt von 1% auf. Da die unverdünnten Suspensionen sehr teuer sind, ist die Auswahl des Aerosolmaterials auch eine Kostenfrage.

Vor dem Einsatz der Mikro-PIV-Methode in betriebenen Brennstoffzellen muss der Einfluss der Aerosole auf die chemische Funktion von Brennstoffzellen getestet werden.

Dankesworte

Der Firma Palas danken wir für ihre Unterstützung auf der Suche nach einem geeigneten Partikelgenerierungssystem.

Wir danken der Firma LaVision für die Diskussion über Fluoreszenzmarkierung von Flüssigkeiten.

Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen: KF2056309PR9).

Literatur

- Einstein, A., 1905: Annalen der Physik, 17 549
- Feser, J. P., Prasad, A. K., Advani, S. G. 2007: "Particle Image Velocimetry Measurements in a Model Proton Exchange Membrane Fuel Cell", Transactions of the ASME Vol. 4, August
- Gormley, P. G., Kennedy, M., 1949: Proc. R. Irish Acad., 52a 163
- Grega, L., Mc Garry, M., 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, Vol. 4 272-279
- Hinds, W. C., 1999: "Aerosol Technology: Properties, behaviour, and measurement of airborne particles"
- Leder, A., 1990: "Windkanalmessung mit LDA-Systemen", in Ruck, B. (Hrsg.): „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, AT-Fachverlag GmbH Stuttgart
- Lindken, R., Westerweel, J., Wieneke, B., 2006: "Stereoscopic Micro Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids, 41:161-171
- Lindken, R., Rossi, M., Grosse, S., Westerweel, J., 2009: "Micro-Particle Image Velocimetry (μ PIV): Recent developments, applications, and guidelines" Lab on a Chip, 9:2551-2567
- Martin, J., Oshkai, P., Djilali, N., 2005: "Flow structures in a U-shaped fuel cell flow channel: Quantitative visualization using particle image velocimetry", Transactions of the ASME, Vol. 2 70-80
- Mazumder, M. K., Kirsch, K. J., 1975: "Flow tracing fidelity of scattering aerosol in Laser Doppler Velocimetry", Applied Optics, Vol. 14, No.4
- McKeon B. J., Comte-Bellot, G., Foss, J. F., Westerweel J., Scarano, F., Tropea, C., Meyers, J. F., Lee, J. W., Cavone, A. A., Schodl, R., Koochesfahani, M. M., Andreopoulos, Y., Dahm, W. J. A., Mullin, J. A., Wallace, J. M., Vukoslavcevic, P. V., Morris, S. C., Pardyjak, E. R., Cuerva, A., 2007: "Velocity, Vorticity, and Mach Number" Part B 5, in Yarin, A., Tropea, C., Foss, J. F. (Hrsg.): "Handbook of Experimental Fluid Mechanics", Springer
- Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Santiago, J. G., 1999: "A PIV measurements of a microchannel flow", Exp. Fluids 27 414-9
- Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Gray, M. H. B., 2000: „Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry“, Meas. Sci. Technol. 11 809-814
- Melling, A. 1997: "Tracer particles and seeding for particle image velocimetry", Meas. Sci. Technology 8 1406-1416
- Olsen, M. G., Adrian, R. J., 2000: "Brownian motion and correlation in particle image velocimetry", Optics & Laser Technology 32 621-627
- Raffel, M., Willert, C., Wereley S., Kompenhans, J., 1998: "Particle Image Velocimetry, A Practical Guide", Springer
- Ruck, B., 1990: "Laser-Doppler-Anemometry" in Ruck, B. (Hrsg.) „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, AT-Fachverlag GmbH Stuttgart
- Santiago, J. G., Wereley S. T., Meinhart, C. D., Beebee, D. J., Adrian, R. J., 1998: "A particle image velocimetry system for microfluidics", Exp. Fluids 25 316-19
- Sugii, Y., Okamoto, K., 2006: "Velocity measurement of gas flow using micro PIV technique in polymer electrolyte fuel cell", Proceedings of ICNMM2006 96216
- van der Schoot, N., Lindken, R., Sharp, K. V., Peil, S., Wartmann, J., Westerweel, J., 2008: "PIV-Messungen zur Untersuchung in Brennstoffzellen", Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik, 9.-11. September, Karlsruhe
- van der Schoot, N., 2009: „Einblicke in Brennstoffzellen während des Betriebs“, Hzwei Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 01 22-23
- Wereley, S. T., Meinhart, C. D., 2009: "Recent Advances in Micro-Particle Image Velocimetry", Annu. Rev. Fluid Mech. 2010. 42:557-76
- Westerweel J., 2000: "Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry", Exp. Fluids 29: S3-12
- Yoon, S. Y., Ross, J. W., Mench, M. M., Sharp, K. V., 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