# **Schlussbericht**

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH

Nr. 2, Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

> vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

> > geförderten Vorhaben 16338-N

#### Weiterentwicklung des Mikro-Particle Image Velocimetry Analyseverfahrens zur Charakterisierung von Gasströmungen als neuartige Entwicklungsmethodik für Brennstoffzellen

(Bewilligungszeitraum: 01.12.2009 - 30.04.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Umwelttechnik

Duisburg, den 06.07.2012 Ort, Datum Sebastian Burgmann Name und Unterschrift des Projektleiters

Name und Unterschrift des Projektleiter an der Forschungsstelle 1

Duisburg, den 06.07.2012 Ort, Datum Christof Asbach

Name und Unterschrift des Projektleiters an der Forschungsstelle 2

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

			Seite
•	Zusan	nmenfassung und abschließende Bewertung	3
•	Geger	nüberstellung der geplanten und erzielten Ergebnisse	4
•	Arbeit	ten und Ergebnisse der Forschungsstellen	7
	0	1.1 Auswahl geeigneter Partikel und Aufbau eines	
		Partikelerzeugungssystems	12
	0	1.2 Partikelversuche und Fertigstellung des Gesamtsystems	16
	0	1.3 μPIV-Messungen in einer Gasströmung in Mikrokanälen	23
	0	2.1 Herstellung geeigneter Messzellen und Untersuchungen von	
		Flüssigkeitsströmungen in Brennstoffzellenmodellen	30
	0	2.2 Durchführung von Gasströmungsuntersuchungen mit der µPIV-Tech	nik
		in Brennstoffzellenmodellen	35
	0	2.3 Durchführung von $\mu$ PIV-Messungen in betriebenen Brennstoffzeller	ı 39
•	Erläut	erungen zur Verwendung der Zuwendung	53
•	Erläut	erungen zur Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten	55
•	Darst	ellung des wissenschaftlich/technischen und wirtschaftlichen Nutzens	56
•	Zusan	nmenstellung aller vorhabensbezogener Veröffentlichungen	58
•	Plan z	um Ergebnistransfer in die Wirtschaft	59
•	Förde	rungshinweis	62
•	Unter	schriften	63

#### Zusammenfassung und abschließende Bewertung

Anlass des Forschungsvorhabens war das vermehrte Interesse in der Brennstoffzellenforschung, die komplizierten strömungsmechanischen Zusammenhänge in den kleinen Kanälen der Bipolarplatten zu verstehen. Die verschiedenen Oberflächen und Benetzungseigenschaften (Kanalwände und Gasdiffussionslage) im Zusammenspiel mit den aus den elektrochemischen Prozessen entstehenden Mehrphasenströmungen bilden ein strömungsmechanisches System, welches noch nicht in Gänze verstanden ist. Es ist jedoch allgemeiner Stand der Erkenntnis, dass hier bei dem Design der Flow-Fields in den Bipolarplatten Optimierungsbedarf besteht. Bisher stand keine Messtechnik zur Verfügung, die es erlaubt, die strömungsmechanischen Prozesse in den Mikrokanälen unter Realbedingungen in situ zu vermessen und mit der instantanen Zellleistung zu korrelieren. Ziel des Projekts war es daher, die Methode der Mikro-Partikel-Image-Velocimetry (µPIV) in der Art weiterzuentwickeln, dass eine Analyse der lokalen Geschwindigkeitsverteilung einer Gasströmung in einem Mikrokanal ermöglicht wird. Darüber hinaus sollte als zweites Ziel des Projekts eine solche Messung unter den erschwerten Bedingungen einer betriebenen Brennstoffzelle in den Mikrokanälen einer Zelle durchgeführt werden.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden verschiedene Verfahren und Materialen systematisch getestet, um die für eine µPIV-Messung notwendigen fluoreszierenden Partikel in ausreichender Größe, Anzahl und Fluoreszenzintensität zu erzeugen und für eine Messung in Mikrokanälen bereitzustellen. Die notwendigen Maßnahmen zur Kopplung des Partikelerzeugungssystems an die Messzellen wurden erarbeitet und die Prozeduren für eine erfolgreiche µPIV-Messung in einer Mikrogasströmung ermittelt. Es wurden Demonstrationsmessungen in Mikrokanalströmungen unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt und validiert. Darüber hinaus wurde die µPIV-Technik erfolgreich an Brennstoffzellenmodellen und betriebenen Brennstoffzellen unter Realbedingungen eingesetzt. Die Ergebnisse wurden zur Validierung numerischer Strömungssimulationen und zur Optimierung des Bipolarplattendesigns genutzt. Darüber hinaus offenbarten die in-situ µPIV Messungen bei gleichzeitiger Leistungsmessung neue, unbekannte Phänomene bei der Ausbildung von Mehrphasenströmungen, die weiteren Forschungsbedarf offenbarten.

#### abschließende Bewertung:

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

3

### Gegenüberstellung der geplanten und erzielten Ergebnisse

Das Hauptziel des Vorhabens war die Weiterentwicklung des Mikro-Particle Image Velocimetry (µPIV)-Verfahrens, um Untersuchungen von Gasströmungen in Mikrokanälen durchführen zu können. Dieses Ziel wurde erreicht.

Darüber hinaus sollte es mit der weiterentwickelten µPIV-Methode erstmalig ermöglicht werden, unter realen Betriebsbedingungen einer Brennstoffzelle einen genauen und vor allem unmittelbaren Aufschluss über das Strömungsverhalten innerhalb der Kanalstrukturen zu erhalten. Dieses Ziel wurde ebenfalls erreicht.

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Projektziele und Ergebnisse Punkt für Punkt gegenüber gestellt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte und Maßnahmen, welche für ein Erreichen der Projektziele durchgeführt wurden, ist im anschliessenden Kapitel dargestellt.

No.	Zielsetzung gemäß Forschungsantrag	erzieltes Projektergebnis	Zielsetzung erreicht?
1	Realisierung und Aufbau eines Aerosolsystems zur Erzeugung geeigneter Messpartikel	Es wurde ein System entwickelt, welches ein Aerosol mit geeigneter mittlerer Partikelgröße bereitstellt. Es wurde ein geeignetes Partikelmaterial identifiziert, welches die Erzeu- gung eines fluoreszierenden Aerosols für μPIV-Messungen ermöglicht.	ја
2	Aufbau von Messzellen mit optischem Zugang für μΡΙV-Messungen	it Es wurden Messzellen entwickelt, die den Einbau einer Ori- ginal-Bipolarplatte in der Art gewährleistet, dass ein opti- scher Zugang ermöglicht wird. Es wurden Messzellen mit optischem Zugang aufgebaut, die die Strömungsunter- suchung unter speziellen Randbedingungen, wie Kanalgeo- metrie, Bewandung mit poröser Gasdiffusionslage (GDL), etc. erlauben. Die Messzellen können mit flüssigen oder gasför- migen Medien betrieben werden	
3	Adaptierung des μPIV- Systems zur Untersuchung von Mikrogasströmungen	Es wurde eine funktional angepasste Kopplung des Parti- kelerzeugungssystems an die Mikrokanalstruktur realisiert. Es wurden µPIV-Messungen komplexer gasförmiger Strö- mungen in Mikrokanälen mit Hilfe des Korrelationssumma- tionsverfahrens durchgeführt und validiert.	ја

No.	Zielsetzung gemäß Forschungsantrag	erzieltes Projektergebnis	Zielsetzung erreicht?
4	Beurteilung verschiedener Flow-Field-Geometrien anhand von Flüssigkeits- strömungsuntersuchungen mit der µPIV Methode	Es wurden vergleichende Messungen mit der μPIV-Methode in einer Wasserströmung für verschiedene Flow-Field- Designs durchgeführt. Zur Beurteilung der strömungsme- chanischen Zustände und Auswirkungen der Designs (Druck- verlauf und Gleichverteilung) wurden numerische Strö- mungssimulationen durchgeführt. Ein Abgleich zwischen den Messergebnissen mittels der μPIV-Methode in einer Gas- strömung und einer Wasserströmung zeigte eine hervor- ragende Übereinstimmung der Ergebnisse, so dass bei Aus- klammerung elektrochemischer Prozesse eine Untersuchung verschiedener Flow-Field-Geometrien anhand von μPIV- Messungen in Flüssigkeiten eine belastbare Analyse ermöglicht.	ja
5	Messung von Mikrogas- strömungen (in verschie- denen Flow-Field-Struk- turen) im realen Brenn- stoffzellenbetrieb	Es wurden Brennstoffzellen mit optischem Zugang auf der Anode und der Kathode in der Art aufgebaut, dass eine Messung mittels µPIV sowohl in der flüssigen Phase (Wasser- Methanol) als auch in der gasförmigen Phase (Luft) bei einem laufenden elektrischen Betrieb der Zelle bei syn- chroner Spannungsmessung durchgeführt werden können. Grundsätzliche Fragestellungen zum Design von Flow-Fields können gemäß Ergebnis No. 4 in flüssigen Medien anhand der Reynoldsanalogie durchgeführt werden. Die sich aus dem elektro-chemischen Prozess einer Brennstoffzelle ergebenden Mehrphasenströmungen konnten mittels µPIV untersucht werden. Es zeigten sich eindeutige Zusammen- hänge zwischen Zellleistung und CO <sub>2</sub> -Blasen bei einer DMFC. Ein ebenso eindeutiger Zusammenhang zwischen Wasser- tropfen und Zellleistung konnte nicht verifiziert werden. Insgesamt zeigten sich hochkomplexe strömungsmecha- nische Zusammenhänge, die mittels µPIV weiter erforscht und analysiert werden müssen.	ja

No.	Zielsetzung gemäß Forschungsantrag	erzieltes Projektergebnis	Zielsetzung erreicht?
6	Optimierung von Bipolar- platten durch den Einsatz der μΡΙV-Technik	Die Ergebnisse der µPIV-Untersuchungen an betriebenen Brennstoffzellen zeigten unerwartete und noch nicht voll- ständig verstandene Phänomene. Eine gezielte Optimierung von Flow-Field-Designs basierend auf µPIV-Messungen in Gasströmungen bei Miteinbeziehung der elektro-chemisch bedingten Entstehung von Mehrphasenströmung konnte aufgrund der Komplexität der gefundenen Phänomene nicht durchgeführt werden. Hier ergibt sich weiterer erheblicher Forschungsbedarf. Die Ergebnisse und Methoden aus Punkt No. 4 lassen jedoch eine grundsätzliche Flow-Field-Optimie- rung zu. Ein optimiertes Design wurde entwickelt.	teilweise erfüllt
$\rightarrow$	System zur Messung von Gasströmungen in Mikrokanälen mittels µPIV		ја
<i>&gt;</i>	System zur in-situ Untersuchung von Strömungen in betriebenen Brennstoffzellen mittels µPIV		ја

#### Arbeiten und Ergebnisse der Forschungsstellen

In diesem Projekt wurden die komplementären Kompetenzen der Forschungsstellen ZBT und IUTA zusammengeführt. Das ZBT erforscht und entwickelt erfolgreich Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme. Besondere Aufmerksamkeit wird seit 2008 dem Thema Strömungsmechanik und Strömungsmesstechnik gewidmet. Strömungsmechanische Problemstellungen sind auch international zunehmend in den Fokus der Brennstoffzellenforschung gerückt. Das ZBT hat in den vergangenen Jahren die notwendige Kompetenz und apparative Ausstattung aufgebaut, um im internationalen Vergleich eine singuläre Stellung einzunehmen. Dazu gehören numerische Strömungssimulation und experimentelle Strömungsmessverfahren. Beide Schwerpunkte sind in diesem Forschungsvorhaben verzahnt worden, um grundsätzliche strömungsmechanische Fragestellungen der Brennstoffzelle wie Mehrphasenströmungen und Gleichverteilungsprobleme zu analysieren und zu lösen. Dazu wurde das Geschwindigkeitsmessverfahren μPIV (Mikro-Particle-Image-Velocimetry) für die spezielle Anwendung in gasführenden Mikrokanälen weiterentwickelt sowie eine fundierte Analyse des Zusammenhangs zwischen Zellleistung und Mehrphasenströmung durchgeführt.

Das IUTA hat eine ausgewiesene Kompetenz im Bereich der Gas- und Aerosoltechnologie; insbesondere sind hier im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt die Schwerpunkte Erzeugung und Charakterisierung luftgetragener Partikel sowie Aerosolphysik zu nennen. Das IUTA ermöglichte in diesem Projekt die Weiterentwicklung des Geschwindigkeitsmessverfahrens µPIV durch die Analysen und Erarbeitung der notwendigen Verfahren zur Partikelerzeugung und –bereitstellung sowie im Bereich der numerischen Strömungssimulation.

Im Folgenden sind die einzelnen Schritte des Projektablaufs hinsichtlich der erarbeiteten Ergebnisse und Ziele dargestellt. Die Projektergebnisse sind durch die beiden Forschungsstellen (1) ZBT und (2) IUTA erarbeitet worden. Es wurden über die Laufzeit des Projekts keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen. Die vorhabenbezogenen Aufwendungen der Wirtschaft, insbesondere die Beratungs- und Sachleistungen der Firmen Palas GmbH und LaVision GmbH, seien an dieser Stelle jedoch ausdrücklich erwähnt.

7

Der erste Schwerpunkt des Projekts lag in der Analyse der notwendigen Partikelcharakteristiken, der Erarbeitung der erforderlichen Maßnahmen für eine für µPIV-Messungen angepasste Partikelbereitstellung und der Durchführung und Validierung von µPIV-Messungen in Mikrokanalstrukturen.

### 1.1) Auswahl geeigneter Partikel und Aufbau eines Partikelerzeugungssystems

Die im Folgenden dargestellten Arbeiten wurden maßgeblich an der Forschungsstelle 2 (IUTA) durchgeführt.

Das Grundproblem partikelbasierter Strömungsmesstechniken wie der Particle-Image-Velocimetry (PIV) oder der Laser-Doppler-Velocimetry (LDV) ist, dass die Strömungsgeschwindigkeiten nicht direkt gemessen werden, sondern indirekt über eine Messung der Partikelgeschwindigkeit. Daraus folgt zwingend, dass die Partikel der Strömung in ausreichendem Maße folgen müssen. Insbesondere bei Mikroströmungen sind Abweichungen der Partikelbahnen von den Stromlinien zu vermeiden, da hier im Gegensatz zu Messungen im Makro-Maßstab die Größenverhältnisse zwischen Strömungsgeometrie und Partikeldrift ähnlich sind. Verständlicherweise sind kleine Partikel von Vorteil. Da es sich bei der µPIV-Technik um ein optisches Verfahren handelt, müssen die Partikel jedoch noch detektierbar, d.h. ausreichend groß, bleiben.

Ziel des ersten Arbeitsschritts (AP1) dieses Projekts war daher die Definition von Auswahlkriterien für einsetzbare Partikel. Dazu wurden eine gründliche Analyse und eine Modellierung des Partikelfolgeverhaltens vorgenommen.

In Flüssigkeiten stellt die Partikeldrift in der Regel kein Problem dar. Die Dichten von Fluid und Partikeln liegen in derselben Größenordnung, so dass die Trägheitseffekte der Partikel sehr klein sind. In Gasströmungen dagegen ist die Abbildung der Strömung mit Hilfe von Partikelbewegungen schwieriger zu verwirklichen, da die Dichte von Partikeln und Gas in der Regel mehrere Größenordnungen auseinander liegen. Für ein kleines rundes Partikel mit Durchmesser  $d_P$ , Dichte  $\rho_P$  und relativer Masse  $m_{P,rel}$  (berücksichtigt den Dichteunterschied zum umgebenden Fluid und damit Auftriebseffekte) das sich in einem Umgebungsfluid mit einer relativen Geschwindigkeit  $u=U-u_P$  bewegt und mit  $du_P /dt$  beschleunigt wird, gilt folgender Zusammenhang:

$$F_{D} = m_{p,rel} \frac{du_{p}}{dt} \Leftrightarrow \frac{3\pi\eta u d_{p}}{C_{c}} = (\rho_{p} - \rho) \frac{\pi}{6} d_{p}^{3} \frac{du_{p}}{dt}$$
(1)

Hier ist  $\eta$  die Viskosität und  $\rho$  die Dichte des Fluids<sup>1</sup>. Die Formulierung der Widerstandskraft  $F_D$  stellt das Stokessche Gesetz dar. Der Parameter  $C_C$  ist der so genannte Cunningham Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass an Partikeln mit ca. < 1 µm Gasmoleküle nicht mehr spiegelnd von der Oberfläche reflektiert werden, sondern unter einem vergrößerten Reflexionswinkel. Hierdurch verringert sich die auf die Partikel wirkende Widerstandskraft. Hier muss für kleine Partikel, d.h. bei  $d_P \le 1$  µm, die Schlupf-Korrektur, beispielsweise  $C_C = 1.15$  bei 1 µm Partikeln, berücksichtigt werden<sup>2</sup>. Bei noch kleineren Partikeln erhöht sich der Schlupf zunehmend.

In der Praxis stellt die Berechnung der Relaxationszeit  $\tau$  eines Partikels auf eine plötzliche Geschwindigkeitsänderung und der zugehörige Versatz  $s_P$  ein wertvolles Maß zur Beurteilung des Partikelfolgeverhaltens dar<sup>3</sup>. Die Relaxationszeit wird hauptsächlich von Trägheitskräften bestimmt und kann aus Gleichung (1) bestimmt werden. Eine Umstellung dieser Gleichung führt zu:

$$U - u_{p} = \frac{(\rho_{p} - \rho)d_{p}^{2}C_{c}}{18\eta} \frac{du_{p}}{dt} \implies u_{p} = U\left(1 - e^{-t/\tau}\right), \text{ mit } \tau = \frac{|\rho_{p} - \rho|d_{p}^{2}C_{c}}{18\eta}$$
(2)

Die Relaxationszeit kann als ein direktes Maß für die Abweichung des Partikelpfades von den Stromlinien genutzt werden.



Abbildung 1: Abschätzung der Partikeltrajektorien für ein-Partikel im Vergleich zu den Stromlinien in einem 90°-Krümmer

Multipliziert man die Reaktionszeit mit einer charakteristischen Geschwindigkeit, beispielsweise der mittleren Geschwindigkeit im Mikrokanal *U*<sub>mean</sub> erhält man eine geometrische

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Symbole ohne Index stellen Parameter des Fluids dar. Der Index p kennzeichnet Partikeleigenschaften.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bei  $\rho/\rho_P \approx 1$  können Schlupfeffekte vernachlässigt werden ( $C_C = 1$ ). Dies gilt bei µPIV für Partikel in Flüssigkeiten.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Die dimensionslose Kennzahl, die genutzt werden kann, um das Partikelfolgeverhalten abzuschätzen, ist die Stokes-Zahl  $St = \rho_n d_n^2 U C_c / 18\eta L$ . Bei  $St \rightarrow 0$  folgen die Partikel der Strömung.

Größe, welche im Verhältnis beispielsweise zur Kanalbreite ein Maß für die trägheitsbedingte Drift der Partikel liefert:

$$s_{p,\tau} = \tau \ U_{mean} \,. \tag{3}$$

Man stelle sich einen 90°-Krümmer vor, wie er typischerweise in den Flowfieldstrukturen der Bipolarplatten von Brennstoffzellen vorkommt. Ein Partikel bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $u_P=U$  ohne Schlupf auf einer Stromlinie, welche einen Viertelkreisbogen mit dem Radius r beschreibt (Abb. 1). Durch Trägheitseffekte weicht die Partikelbahn mit zunehmender Lauflänge von der Stromlinie ab. Mit der Zentrifugalgeschwindigkeit  $U_C = t U^2/r$  und der Zeit  $t = 2\pi r/(4U)$  für die Bewegung durch den Viertelkreisbogen ergibt sich eine Abweichung der Partikelbahn von der Stromlinie von:

$$s_{p,\tau} = U_C \ \tau = \frac{\pi}{2} \tau \ U \ . \tag{4}$$

Bezüglich des Partikelfolgeverhaltens sind die kritischen Bedingungen aufgrund der hohen Geschwindigkeiten auf der Kathodenseite zu suchen. Eine typische Reynoldszahl ist Re = 250bei einer mittleren Geschwindigkeiten von U = 3.5 m/s. Legt man eine akzeptable Abweichung des Partikelpfades von der Stromlinie von 5.0 % der Kanalbreite von 1 mm zu Grunde, erhält man für Ethylenglykol-Partikel somit einen Grenzwert für die Partikelgröße von  $d_P = 1.1 \,\mu$ m.



Abbildung 2: berechnete Partikeltrajektorien für 1µm-Partikel (rot) im Vergleich zu den Stromlinien (hellblau) in einem 90°-Krümmer bei Brennstoffzellen-typischen Strömungsbedingungen

Diese analytische Betrachtung wurde durch dreidimensionale Strömungssimulationen ergänzt. Dabei wurden mit Hilfe des in die CFD-Software Fluent integrierten "Discrete Phase

Model"-Partikelmodells die Partikeltrajektorien verschiedener Partikelgrößen berechnet, um die entsprechende Abweichung von den Stromlinien zu ermitteln. Abbildung 2 zeigt die Strömungsstruktur in der Mittelebene eines 90°-Krümmers mit quadratischem Querschnitt. Die hellblauen Linien zeigen die entsprechenden Stromlinien, die roten Linien die Partikelbahnen für Partikel mit einem Durchmesser von 1  $\mu$ m. Wir konnten zeigen, dass die analytische Betrachtung des Partikelfolgeverhaltens und die CFD-Simulation sehr ähnliche Werte der zu erwartenden Partikeldrift ergeben. Für den in Abb. 2 dargestellten Fall errechnet sich die Partikeltrajektorien der CFD-Rechnung eine Abweichung von 30  $\mu$ m ergibt. Somit ist die dargelegte analytische Betrachtung des Partikelfolgeverhaltens und Partikelgrößen für laseroptische, partikelbasierte Strömungsmessverfahren. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde für einen Dichteverhältnis zwischen Fluid (Luft) und Partikelmaterial (Wasser, Ethylenglykol, Polystyrol, etc.) von etwa 1:1000 eine Zielpartikelgröße von 1  $\mu$ m definiert.

Basierend auf diesem Ergebnis war Ziel des zweiten Arbeitsschritts (AP2) dieses Projekts die Auswahl bzw. die Konstruktion und der Aufbau eines Partikelerzeugungssystems, mit dem sich die Zielpartikelgröße einstellen lässt.

Von den Firmen Palas GmbH und LaVision GmbH wurde jeweils ein Partikelgenerator zur Verfügung gestellt. Mit dem so genannten AGK2000 der Firma Palas GmbH lassen sich sowohl Aerosole aus Feststoffpartikeln (Polystyrol, suspendiert in Wasser) als auch aus Flüssigkeiten erzeugen. Der Partikelgenerator der Firma LaVision GmbH ist für die Aerosole aus Flüssigkeiten konzipiert. Beide Generatoren werden mit Druckluft betrieben und arbeiten nach dem Saugprinzip, d.h. über einen Luftstrom mit hoher Geschwindigkeit wird in einer Steigleitung ein Unterdruck erzeugt, so dass aus einem Reservoir Flüssigkeit in den Luftstrom gelangt und dabei zu feinen Tröpfchen zerstäubt wird. Für PIV-Messungen in Windkanälen wird häufig auf so genannte Laskin-Seeder zurückgegriffen. Diese Art von Partikelgenerator arbeitet auch mit Druckluft. In diesem Fall wird die Druckluft über feinste Bohrungen in der Zuführung direkt in die zu zerstäubende Flüssigkeit eingebracht. Auf diesem Weg werden kleine Luftbläschen erzeugt, die an der Flüssigkeitsoberfläche zerplatzen und ein feines Aerosol freisetzen. Ein solcher Laskin-Seeder wurde konstruiert und gefertigt. Alle drei genannten Aerosolgeneratoren (Abb. 3) erzeugen bei der Zerstäubung von Flüssigkeiten ein polydisperses Aerosol. Typischerweise zeigt das Partikelgrößen-

11

spektrum aber eine ausgeprägte Spitze bei einer bestimmten Partikelgröße. Es ist daher nötig, das erzeugte Partikelgrößenspektrum jedes Partikelgenerators zu vermessen.



Abbildung 3: eingesetzte Partikelgeneratoren; links: AGK2000 von Palas GmbH, Mitte: Seeder von LaVision GmbH, rechts: Laskin-Seeder (Eigenbau)

Die in Abbildung 3 gezeigten Partikelgeneratoren wurden hinsichtlich der erzeugbaren Partikelgrößenspektren mit Hilfe eines Aerodynamic Particle Sizer (APS) der Firma TSI (Typ 3321) untersucht. Anschließend wurde eine Auswahl hinsichtlich der in im vorherigen Arbeitsschritt (AP1) bestimmten kritischen Partikelgröße dahingehend getroffen, dass mit dem entsprechenden Partikelgenerator Partikel mit einem Durchmesser nahe der kritischen Größe mit einer hohen Konzentration und geringer Standardabweichung hergestellt werden können.

Der APS misst den aerodynamischen Durchmesser der im Aerosol enthaltenen Partikel nach dem Time-of-Flight Prinzip (Abb. 4) und erstellt daraus eine Verteilung der Partikelkonzentration. Der APS saugt einen konstanten Volumenstrom von 1 l/min des zu messenden Aerosols an. Gleichzeitig werden 4 l/min der Umgebungsluft angesaugt, gefiltert und dienen im Gerät als Schleierluft für den Aerosolstrom. In der Messkammer befinden sich zwei überschneidende Laserstrahlen, welche von den Partikeln senkrecht durchströmt werden.



Abbildung 4: Messprinzip des APS

Jedes Mal, wenn ein Partikel den Laserstrahl durchquert, streut dieses Licht in der Messkammer. Die Intensität des Streulichtes wird von einer Photodiode gemessen, es entstehen somit zwei Intensitätsmaxima. Zur Bestimmung des aerodynamischen Durchmessers wird die Zeit zwischen den beiden Intensitätsmaxima gemessen, die sog. Time-of-Flight. Je größer der Partikeldurchmesser, desto größer ist die Zeit zwischen den beiden Intensitätsmaxima. Durch die Düse vor der Messkammer werden die Partikel beschleunigt. Partikel mit kleineren Durchmessern werden aufgrund ihrer geringeren Trägheit stärker beschleunigt und durchqueren den Laserstrahl schneller als größere Partikel, weshalb bei kleinen Partikeln die Zeit zwischen den Intensitätsmaxima geringer ist.

Zunächst wurde eine Suspension von Polystyrolpartikeln mit dem AGK2000 zerstäubt. Die in Wasser suspendierten Feststoffpartikel haben eine Nenngröße von 1 µm. Durch die Zerstäubung sind die Partikel zunächst in größeren Suspensionströpfchen eingebunden. Daher wurde eine Trocknungsstrecke eingesetzt, um ein Verdampfen dieser Tröpfchen zu erreichen, sodass nur ein Polystyrolaerosol übrig bleibt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das lokale Maximum bei einer Größe von 1 µm. Agglomerationen von Partikeln bzw. Partikel mit Durchmessern > 2 µm sind offensichtlich in der zerstäubten und getrockneten Lösung kaum vorhanden. Die in Abbildung 5 zu erkennenden Partikel < 1 µm resultieren aus Rückständen aus der verwendeten Flüssigkeit. Diese Partikel sind jedoch zu klein, um per µPIV detektiert zu werden. Bezüglich des Partikelfolgeverhaltens ist die untersuchte Suspension von Polystyrolpartikeln geeignet, um für µPIV-Messungen in Brennstoffzellen-typischen Mikrokanälen eingesetzt zu werden.



Abbildung 5: ermitteltes Partikelgrößenspektrum bei der Zerstäubung von gelösten 1µm Polystyrol-Partikeln mit dem AGK2000

Feststoffpartikel erscheinen jedoch für den Einsatz in Brennstoffzellen wenig geeignet, da Ablagerungen von Partikeln nicht vollständig zu vermeiden sind. Im Gegensatz zu Flüssigkeitspartikeln, die verdampfen können, sind abgelagerte Feststoffpartikel in Mikrokanalstrukturen kaum zu beseitigen. Hinzu kommen Probleme bei der Detektion der mit Fluoreszenzfarbstoff markierten Partikel, wie unter Punkt 1.2 erläutert wird. Aus diesem Grund wurden verstärkt Flüssigkeiten für eine Aerosolerzeugung untersucht. Dabei scheiden einige Flüssigkeiten, die typischerweise bei laser-optischen Verfahren genutzt werden, von vornherein für die Verwendung in Brennstoffzellen aus. Wasser kann nicht genutzt werden, da damit der Wasserhaushalt der Brennstoffzelle gestört würde und die Verdampfungsrate der Tröpfchen unter den Temperaturbedingungen der Zelle zu hoch ist. Öle wie Olivenöl oder DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) können nicht genutzt werden, da Öle die empfindlichen Membranen in Brennstoffzellen schädigen. Zudem ist die Einbringung eines Fluoreszenzfarbstoffs in Ölen schwierig. Es wurde daher Ethylenglykol ausgewählt, da diese Flüssigkeit einen niedrigen Dampfdruck (5.3 Pa) einen ausreichend hohen Siedepunkt (197 °C) und eine relativ geringe Dichte aufweist (1.11 g/cm<sup>3</sup>).

Die drei genannten Partikelgeneratoren wurden mit Ethylenglykol gefüllt und das erzielbare Partikelgrößenspektrum vermessen. Dabei wurden verschiedene Betriebspunkte, d.h. Drücke der Luftversorgung, hinsichtlich des erzielbaren Größenspektrums untersucht. Dabei zeigten sich nur geringe Verschiebungen bzgl. des Konzentrationspeaks der Partikelgrößenverteilung wie in Abbildung 6 beispielhaft für den AGK2000 gezeigt wird.



Abbildung 6: ermitteltes Partikelgrößenspektrum bei der Zerstäubung von Ethylenglykol mit dem AGK2000 für verschiedene Betriebsdrücke

Abbildung 7 zeigt die jeweiligen erzielbaren Partikelgrößenspektren bei der Zerstäubung von Ethylenglykol für die drei verschiedenen Partikelgeneratoren. Deutlich zu erkennen ist, dass der LaVision-Seeder im Mittel kleinere Partikel produziert als die anderen Partikelgeneratoren. Die Nennpartikelgröße liegt bei diesem Partikelgenerator bei etwas mehr als 1  $\mu$ m. Das erzeugte Aerosol erscheint aufgrund dieser Ergebnisse geeignet, um für laseroptische Strömungsmessungen in Brennstoffzellenkanälen eingesetzt zu werden.



Abbildung 7: ermittelte Partikelgrößenspektrum bei der Zerstäubung von Ethylenglykol mit den drei zur Verfügung stehenden Aerosolgeneratoren

Basierend auf den Diskussionen und Beiträgen der Teilnehmer am projektbegleitenden Ausschuss und der Sichtung der aktuellen Literatur wurden die Arbeiten in diesem Arbeitsschwerpunkt laufend fortgeführt, um alternative Partikelmaterialien zu identifizieren. Die in der Literatur genannte viel versprechende Möglichkeit der Verwendung von einer Mischung von Wasser und Polyethylenglykol für PIV-Messungen wurde ebenfalls untersucht. Wie bereits erläutert ist Wasser nicht geeignet, um für PIV-Messungen in Brennstoffzellen eingesetzt zu werden. Der Literatur kann aber entnommen werden, dass die Beimischung von Polyethylenglykol, die Verdampfung der Wassertröpfchen erheblich reduziert<sup>4</sup>. Es wird angenommen, dass sich Polyethylenglykol wie eine Art Hülle um das Wassertröpfchen herumlegt. Wie in Abbildung 8 gezeigt, lassen sich mit demselben apparativen Aufbau bei der Verwendung von Wasser mit Polyethylenglykol deutlich kleinere Partikel als mit reinem Ethylenglykol erzielen. Dieses Material erscheint hinsichtlich der erzielbaren Partikelgrößen

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Siehe: Klinner, J.; Willert, C.; Schneider, A. & Mack-Gardner, A.: Flow Distribution Measurements at the Exit of Bipolar Plates in a PEM Fuel Cell Stack by a Scanning Light Sheet Method, *Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, 7. – 9. September 2010, Cottbus, 2010

ebenfalls geeignet, um laseroptische partikelbasierte Strömungsmessungen in Mikrostrukturen durchführen zu können.



Abbildung 8: ermittelte Partikelgrößenspektrum bei der Zerstäubung von Ethylenglykol bzw. Wasser mit Polyethylenglykol bei Verwendung des LaVision- Aerosolgeneratoren

#### 1.2) Partikelversuche und Fertigstellung des Gesamtsystems

Die im Folgenden dargestellten Arbeiten wurden maßgeblich an der Forschungsstelle 1 (ZBT) durchgeführt. Ziel dieser Arbeitspakete (AP 4, 5, 6) war die Festlegung auf ein Aerosolerzeugungssystem, das zum einen ausreichend kleine Partikel, aber auch ausreichend sichtbare Partikel bereitstellt und zudem eine Partikelkonzentration in der zu untersuchenden Strömung erzeugt, die eine belastbare µPIV-Messung erlaubt.

Es ist leicht einzusehen, dass ein ausgezeichnetes Partikelfolgeverhalten (vgl. Darstellung in Abschnitt 1.1), keinen Nutzen für die Strömungsmessung ergibt, wenn die Partikel nicht detektierbar sind. Bei der µPIV-Technik wird die Fluidbewegung über die Partikel, die der Strömung zugeführt werden, visualisiert. Die zu untersuchende Region wird durch einen Laserpuls beleuchtet, so dass die Partikel mittels einer Kamera optisch detektiert werden können. Werden mindestens zwei Partikelbilder in einem kurzen zeitlichen Abstand aufgenommen, kann das Geschwindigkeitsfeld basierend auf der Partikelverschiebung über Kreuz-Korrelationsverfahren rekonstruiert werden. Im Gegensatz zur klassischen makroskopischen PIV-Technik, die eine Lichtschnittbeleuchtung einer einzelnen Messebene mittels geeigneter Lichtschnittoptiken verwendet, wird bei dem µPIV-Verfahren ein Volumen ausgeleuchtet. Dies bedeutet im Falle von Mikrokanalströmungen, dass die gesamte Tiefe des Kanals ausgeleuchtet wird. Daher ist es bei der µPIV-Technik notwendig, fluoreszierende Partikel zu benutzen, um den hohen Grad an Hintergrundrauschen infolge der Volumenillumination zu kompensieren. So werden die Partikel beispielsweise mit grünem Laserlicht zur Fluoreszenz angeregt, so dass Licht einer anderen Wellenlänge (in der Regel rotes Licht) emittiert wird. Durch geeignete Filter vor dem Detektor, d.h. der Kamera, kann somit das von den Partikeln emittierte Licht von der Hintergrundintensität separiert werden. Hier ist die Fluoreszenzintensität des Farbstoffs entscheidend, der bei Feststoffpartikeln auf das Partikel aufgebracht wird und bei Flüssigpartikeln in die Flüssigkeit gemischt wird.

Für µPIV-Anwendungen sind verschiedene Fluoreszenz-Farbstoffe erhältlich, beispielsweise Rhodamin-B (Rh-B) (Anregung:  $\lambda_{ex} = 560$  nm, Emission:  $\lambda_{em} = 584$  nm), Ethidiumbromid ( $\lambda_{ex} = 505$  nm,  $\lambda_{em} = 602$  nm), oder Nil-Blau A ( $\lambda_{ex} = 636$  nm,  $\lambda_{em} = 680$  nm). Da in den µPIV-Anwendungen dieses Projekts grünes Laserlicht ( $\lambda = 527$  bzw. 532 nm) benutzt wird, ist Rhodamin-B eine gute Wahl hinsichtlich der Quanteneffizienz der Fluoreszenz bei der Anregung mit grünem Licht. Rhodamin-B in kristalliner Form kann leicht in verschieden Flüssigkeiten für die Aerosol-Erzeugung für PIV-Messungen gelöst werden. Für die Lösung in Ölen ist ein Lösungsmittel wie Isopropanol erforderlich.

Es wurden verschiedene Tests mit unterschiedlichen mit Rhodamin-B versetzen Flüssigkeiten sowie Rhodamin-B beschichteten Polystyrolpartikeln hinsichtlich der Detektierbarkeit mit einem µPIV-Aufbau durchgeführt. Dazu wurde eine Testzelle aus PDMS mit einem Mikrokanal konstruiert und gefertigt, die einen optischen Zugang gewährleistet. Der Mikrokanal wird in das PDMS-Grundmaterial gefräst und anschließend mit einer Glasplatte oder transparenter Folie gasdicht verschlossen (Abb. 9). Der Mikrokanal ist bereits so dimensioniert, dass er die Kanäle einer Bipolarplatte einer Brennstoffzelle abbildet, d.h. der Kanal hat eine Breite und eine Höhe von jeweils 1 mm. Um eine Durchströmung zu ermöglichen, wurde der Randbereich der Testzelle durchbohrt. Anschließend wurden Kunststoff-Schläuche mit einem lichten Durchmesser von 1 mm jeweils am Eintritt bzw. Austritt des Mikrokanals eingeklebt.



Abbildung 9: Mikrokanal in PDMS für Untersuchungen des Partikelfolgeverhaltens und der Partikeldetektierbarkeit

Das Aerosol, welches mit den in Abschnitt 1.1 genannten Partikelgeneratoren erzeugt wurde, wurde über eine Schlauchleitung dem Mikrokanal zugeführt. Über eine Drossel am Austritt aus dem Mikrokanal und über einen Volumenstromanzeiger konnte der gewünschte Volumenstrom eingestellt werden. Dieser wurde ebenfalls so gewählt, dass Brennstoffzellentypische Reynoldszahlen von *Re*=O(100) erreicht wurde. Abbildung 10 zeigt ein typisches (aufsummiertes) Partikelbild bei der Verwendung eines Aerosols aus Polystyrolpartikeln.



Abbildung 10: aufsummiertes Partikelbild eines Aerosols aus fluoreszenzmarkierten Polystyrolpartikeln mit einem Nenndurchmesser von 0.52  $\mu$ m

Bei denselben Versuchsparametern (AGK2000-Partikelgenerator, Mikroskopvergrößerung M = 5) wurde für Ethylenglykol-Partikel mit einer Konzentration von 0.2% Rhodamin-B ein deutlich höherer Helligkeitswert bei gleichzeitig höherem Signal-Rausch-Verhältnis und größeren Partikelabbildern  $d_p$  als bei 0.52 µm Polystyrol-Partikeln (polymer microspheres, red fluorescing, 0.1% solids) gemessen. Hinzu kommt, dass deutlich mehr Partikel detektiert werden können. Der Partikelbilddurchmesser ist bei der Verwendung von Polystyrolpartikeln so klein (1-2 Pixel), dass es bei der Auswertung mittels Kreuz-Korrelationsalgorithmen vermehrt zum so genannten Peak-Locking-Effekt kommt. Bei diesem Effekt werden vermehrt ganzzahlige Pixelverschiebungen detektiert, die sonst gewährleistete Bestimmung des Subpixel-Shift geht verloren. D.h. die Genauigkeit der Bestimmung der Partikelbewegung wird deutlich reduziert. Tabelle 1 stellt die Ergebnisse für Aerosole aus Ethylenglykol und Polystyrol gegenüber.

Wie bereits in Abschnitt 1.1 erläutert, wurde zusätzlich ein Gemisch aus Wasser und 5% Polyethylenglykol mit einer Beimischung von Rhodamin-B zerstäubt. Für dieses Aerosol wurden ebenfalls Untersuchungen hinsichtlich der Detektierbarkeit durchgeführt. Bei der Vermischung der Flüssigkeit mit Rhodamin-B zeigte sich bereits, dass sich deutlich weniger

18

kristallines Rhodamin-B lösen lässt als in reinem Ethylenglykol. Aus der Literatur ist zudem bekannt, dass man im Vergleich zu einer Lösung von Rhodamin-B in Wasser eine deutlich höhere Quanteneffizienz bei Lösung in Ethylen-Glykol erzielen kann<sup>5</sup>. Der Vergleich der erfassten Partikelbilder (Abb. 11) zeigt deutlich, dass die nur wenig kleineren Wasser-Polyethylenglykol-Partikel deutlich schlechter zu detektieren sind.

	Ethylenglykol-Partikel mit	Rhodamin-B beschichtete	
	gelöstem Rhodamin-B	Polystyrol-Partikel:	
Partikeldurchmesser	1,3 µm	0,5 μm	
Partikel pro Bild	30	≈1,3	
Partikelbilddurchmesser	4-16 pix	1-2 pix	
Grauwerte	950	150	
full-well-capacity	23%	4%	
SNR	170	30	

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Partikelbildeigenschaften bei der Verwendung von zerstäubtem Ethylenglykol und Polystyrolpartikeln





Abbildung 11: aufsummierte Partikelbilder je eines Aerosols aus Ethylenglykol (links) und Wasser mit Polyethylenglykol (rechts)

Als erstes Ergebnis dieses Arbeitsschwerpunkts kann festgehalten werden, dass mit Ethylenglykol mit einem Zusatz von Rhodamin-B ein Material gefunden wurde, welches sich in hohem Maße für laseroptische Strömungsmessverfahren eignet, da es sich leicht zerstäuben lässt und die erforderliche Detektierbarkeit der Partikel gewährleistet ist.

Es besteht jedoch das grundsätzliche Problem, dass das Aerosol der Mikrokanalstruktur zugeführt werden muss ohne dabei das Größenspektrum zu größeren Partikeln zu verschieben. Dies kann z.B. durch Tropfenansammlungen und -verschmelzen geschehen, wenn die Zuleitungen unsachgemäß ausgeführt werden, beispielsweise mit stufenförmigen Querschnittsänderungen. Die Zuleitungen sollten zudem so kurz wie möglich sein, um Agglomeration zu vermeiden. In der Regel arbeiten die Aerosolgeneratoren in Druck-

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Bindhu, C. V. & Harilal S. S. (2001) Effect of the Excitation Source on the Quantum-Yield Measurements of Rhodamine-B Laser Dye Studied Using Thermal-Lens Technique, *Analytical Sciences*, 17, 141-144

bereichen, die zu Austrittsgeschwindigkeiten und Volumenströmen führen, die viel größer sind als die notwendigen Werte für Mikrokanal-Konfigurationen, die an Brennstoffzellen angelehnt sind. Daher ist man gezwungen, aus dem Volumenstrom am Austritt des Aerosolgenerators einen Teilvolumenstrom zu entnehmen. Der Volumenstrom in der Mikrokanalstruktur kann beispielsweise über eine Drossel am Austritt des Mikrokanals eingestellt werden. Es wurde zunächst eine Teilvolumenstromentnahme realisiert, bei der der Kernstrom des Austrittsvolumenstroms entnommen wird (Abb. 12). Erste Messungen in der unter Abbildung 9 dargestellten Kanalkonfiguration zeigten mit fortlaufender Messdauer eine zunehmende Partikelablagerung im Bereich des Krümmers (Abb. 12). Dieses typische Ablagerungsmuster entsteht durch den Dean-Wirbel, der sich bei den Strömungsbedingungen in dem Mikrokanalkrümmer einstellt. Dieser Dean-Wirbel ist ein Doppelwirbel, durch den Partikel nach Außen, d.h. zum Kanalboden bzw. –deckel transportiert werden. Dadurch führen trägheitsbedingte Abweichungen der Partikelbahnen von den Stromlinien in verstärktem Maße zu Ablagerungen.





Abbildung 12:

Skizze des realisierten Adapters zur Teilvolumenstromentnahme (oben) und typisches Partikelbild im Kanalkrümmer nach einigen Minuten Messzeit (links) Man erkennt in Abbildung 12 deutlich, dass die lokale Partikelablagerung zu einem enormen Fluoreszenzsignal führt, welches das Signal der Partikel in der Strömung vollständig überlagert. In diesem Bereich sind µPIV-Messungen unmöglich. Es wurden daher verstärkt Maßnahmen untersucht, um diese Ablagerungsproblematik zu reduzieren, um die Messzeiten zu erhöhen. Dabei wurde vor allem die Kopplung des Aerosolerzeugungssystems an den Mikrokanal optimiert. Zur Validierung der Maßnahmen wurde wieder das Partikelgrößenspektrum mit dem APS vermessen. Abbildung 13 zeigt, dass das Partikelgrößenspektrum sich nicht ändert, wenn der Kern- bzw. der Nebenstrom aus dem Aerosolvolumenstrom entnommen wird.



Abbildung 13: Skizzen der Teilvolumenstromentnahme (Kernstrom bzw. Nebenstrom) und zugehörige Partikelgrößenverteilungen.

In weiteren Versuchen konnte festgestellt werden, dass sich jedoch die Partikelanzahl deutlich erhöhen lässt, wenn der Mikrokanal drucklos betrieben wird, d.h. die Partikelzufuhr zum Kanal auf möglichst niedrigem Druckniveau erfolgt. Bei einem hohen Druckniveau scheint das System als Partikelabscheider zu wirken (Abb. 14). Daher wurde ein System entwickelt, bei dem die Partikel aus einem Reservoir mit Umgebungsdruck angesaugt werden. Bei dieser Kopplung des Mikrokanals an das Aersosolerzeugungssystem wird die Druckluft genutzt, welche auch für den Betrieb des Aerosolgenerators benötigt wird. Abbildung 15 veranschaulicht dieses Konzept. Dabei lässt man Druckluft über eine Düse ins Freie strömen. Durch die hohe Geschwindigkeit entsteht ein Unterdruck, so dass über eine Verzweigung ein kleiner Volumenstrom angesaugt wird. Dieser wird aus dem Reservoir gezogen, in den das Aerosol eingeleitet wird. Der nun mit Partikeln versorgte Volumenstrom wird durch den Mikrokanal geführt. Ein Partikelfilter und ein Volumenstrommesser vervollständigen dieses Partikelversorgungskonzept. Mit diesem System verfügt man über deutlich bessere Einstellmöglichkeiten für den Volumenstrom. Gleichzeitig erzielt man höhere Partikeldichten (vgl. Abb. 15) und weniger Ablagerungen im Mikrokanal.



Abbildung 14: Skizzen der Teilvolumenstromentnahme mit druckbeaufschlagem bzw. drucklosem Mikrokanal und zugehörige Partikelgrößenverteilungen.



Abbildung 15: Skizze des finalen Konzepts zur Kopplung des Aerosolerzeugungssystems an den Mikrokanal und Vergleich der erzielbaren Partikeldichten für Druck- (oben rechts) und Saugbetrieb (unten rechts). Als zweites Ergebnis dieses Arbeitsschwerpunkts kann festgehalten werden, dass mit dem dargestellten System ein Verfahren zur Partikelbereitstellung erarbeitet wurde, welches partikelbasierte laseroptische Strömungsmessverfahren in Mikrokanalstrukturen erlaubt. Aus den Überlegungen und Vorversuchen hinsichtlich der beobachteten Partikelablagerungen und einer verbesserten Abscheidung zu großer Partikel mittels Impaktoren und virtueller Impaktoren ist das ZIM-Kooperationsprojekt *"Entwicklung eines Aerosolgenerators für hohe Aerosolkonzentration bei niedrigem Trägergasvolumenstrom"* zwischen den Forschungsstellen 1 und 2 und der Firma Palas GmbH (Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses) entstanden. Dieses Projekt konnte am 01.12.2011 gestartet werden.

#### 1.3) µPIV-Messungen in einer Gasströmung in Mikrokanälen

Basierend auf den oben genannten Ergebnissen wurden erste µPIV-Messungen in dem in Abbildung 9 gezeigten Mikrokanal durchgeführt (AP7). Der Mikrokanal wurde mit partikelbeladener Luft versorgt. Dabei wurden Strömungszustände eingestellt, die denen in einer Brennstoffzelle entsprechen, d.h. basierend auf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und dem hydraulischen Durchmesser des Mikrokanals ergibt sich eine Reynoldszahl von *Re*  $\approx$  200. Der Mikrokanal wird auf der Verfahreinheit des Mikroskops platziert und ausgerichtet (Abb. 16). Das µPIV-System besteht aus einem Zeiss Axio-Observer Z1 Epifluoreszenz-Mikroskop mit einer 12 bit PCO Sensicam QE Kamera und einem Newave Pegasus frequenzverdoppelten Nd:YLF Laser.



Abbildung 16: Darstellung des Messaufbaus für eine µPIV-Messung der Strömung in einem Mikrokanal

Wie bereits erwähnt, lassen sich mit dem erstellten System zur Partikelversorgung bei einer Vergrößerung von M = 6.3 im Mittel einige Dutzend Partikel pro Partikelbild erzeugen. Für eine klassische PIV-Messung sind deutlich höhere Partikelkonzentrationen erforderlich. Dieses Problem lässt sich beheben, indem einige hundert aufgenommene Partikelbilder summiert werden. Diese Möglichkeit besteht, da die Strömungszustände im Mikrokanal in



der Regel im laminaren Bereich liegen. D.h. turbulente Schwankungsbewegungen etc. treten

Abbildung 17: Funktionsweise der Kreuzkorrelation (oben) und des "Sum-of-Correlation"-Verfahrens (unten)

Die Strömung ist geordnet und stationär. Dennoch können komplexe dreidimensionale Strömungsstrukturen auftreten, wie später im Bericht gezeigt werden wird. Solange die Mikroströmung stationär ist, was bei Brennstoffzellenkonfigurationen der Fall ist, können für PIV-Messungen Summationsverfahren genutzt werden. Neben der Aussummierung der reinen Partikelbilder kann auch das so genannte "Sum-of-Correlation"-Verfahren Verwendung finden. Das Partikelbild wird bei der PIV-Technik mittels eines Kreuzkorrelationsverfahrens ausgewertet. Im Gegensatz zur PTV-Technik (Particle Tracking Velocimetry) werden nicht einzelne Partikelpaare identifiziert, sondern das ganze Partikelbild in so genannte "interrogation windows" oder "spots" gerastert (vgl. Abb. 16). Für jedes "interrogation window" wird nun das Partikelmuster identifiziert. In Abb. 17 ist das Partikelmuster für jedes Bild des Doppelbildes als Hütchenstruktur dargestellt. Diese beiden werden Strukturen werden korreliert und man erhält eine Korrelationsverteilung, d.h. eine Art Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Partikelmusterverschiebung. Typischerweise besitzt diese Verteilung einen deutlichen Peak (vgl. Abb. 17 oben). Ist das Korrelationsergebnis eines (Doppel-) Bildes aufgrund von fehlender Information, d.h. zu wenigen Partikeln, stark verrauscht, wird dieser Peak gegenüber dem Umgebungsrauschen der Korrelationsverteilung deutlich reduziert. Da eine stationäre Strömung vorliegt, kann nun eine Bilderfolge so ausgewertet werden, dass die einzelnen Korrelationsergebnisse aufsummiert werden. Dies ist exemplarisch in Abb. 17 für 3 Bilder dargestellt. Man erkennt, dass in der Summe der Korrelationspeak sich aus dem Korrelationsrauschen deutlicher hervorhebt. Über dieses Verfahren kann zum einen die Genauigkeit der Detektion der Partikelverschiebung deutlich erhöht werden, zum anderen aber auch eine valide Geschwindigkeitsmessung ermöglicht werden, wenn in den Einzelbildern nur wenig Partikel abgebildet werden. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für eine Messung in einem 90°-Krümmer eines Mikrokanals bei einer Luftströmung mit der Reynoldszahl *Re* = 200.



Abbildung 18: exemplarische Ergebnisse zu ersten μPIV-Messungen in der Gasphase: aufsummiertes Partikelbild über 200 Einzelbilder (links), Ergebnis einer PTV-Auswertung (Mitte) und Ergebnis einer μPIV-Messung (rechts)mit "Sum-of-Correlation"-Verfahren

Das aufsummierte Partikelbild verdeutlicht, dann eine ausreichende Menge von Partikeln dem Mikrokanal zugeführt werden konnte. Der Vergleich zwischen der PTV-Auswertung und der µPIV-Auswertung mit dem "Sum-of-Correlation"-Verfahren zeigt, dass die Strömungsstruktur in der beobachteten Mittelebene des Krümmers mittels µPIV qualitativ und quantitativ korrekt wiedergegeben werden kann. Die Gebiete hoher Geschwindigkeit (rote Vektoren) und niedriger Geschwindigkeit (blaue Vektoren) sind für beide Verfahren deckungsgleich. Bei der Darstellung in Abb. 18 wurde dieselbe Farbkodierung verwendet.

Sowohl das PTV als auch das µPIV-Verfahren sind von einem ausreichenden Partikelfolgeverhalten abhängig. Um abschließend validieren zu können, ob die Strömungsstruktur in einem solchen Krümmer mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden kann, oder eine Verfälschung des Ergebnisses infolge einer Abweichung der Partikeltrajektorien von den Stromlinien vorliegt, wurden Vergleichsmessungen in einer Wasserströmung vorgenommen. Fluidmechanisch betrachtet sind Strömungen ähnlich, d.h. die Strömungsstrukturen sind gleich, wenn die dimensionslose Kennzahl "Reynoldszahl" gleich ist. Diese ist bei gleicher Kanalgeometrie abhängig von Dichte  $\rho$ , Viskosität  $\eta$  und der charakteristischen Geschwindigkeit u:

$$\operatorname{Re} = \rho \ u \ d / \eta \,. \tag{5}$$

Verwendet man nun anstelle von Luft Wasser im Mikrokanal, muss lediglich die Strömungsgeschwindigkeit angepasst werden, so dass die Reynoldszahl gegenüber der Luftströmung identisch ist, so dass sich dieselben Strömungsphänomene einstellen. Um die Messergebnisse der Gasströmung für *Re* =200 zu validieren, wurden bei gleichen Reynoldszahlen µPIV-Messungen in Wasser mit 8µm MF-Partikeln durchgeführt. Da hier  $\rho/\rho_P \approx 1$  gilt, ist die Partikeldrift in diesem Fall vernachlässigbar. In Abbildung 19 sind die jeweiligen Ergebnisse als farbige Vektorverteilungen übereinander gelegt. Man erkennt deutlich die Deckungsgleichheit der Vektoren.



Abbildung 19:

Die Überlagerung der Geschwindigkeitsergebnisse aus je einer µPIV-Messung in Flüssigkeit (blau) und in Gas (rot) verdeutlicht das ausreichende Partikelfolgeverhalten für die Gasphase

Man kann folgern: das Ergebnis der  $\mu$ PIV-Messung in Luft beruht auf den Partikeln der Größenordnung  $d_P = O(1 \ \mu m)$  des Partikelgrößenspektrums. Da ein Korrelationssummations-Verfahren genutzt wurde, werden die Korrelationswerte aufgrund der großen Partikel, die selten vorkommen, in einem Maße unterdrückt, dass der höchste Korrelationswert die Partikelbewegung der kleineren Partikel wiedergibt, so dass das Strömungsfeld korrekt wiedergegeben wird. Abbildung 19 zeigt das Strömungsbild in der Symmetrieebene des 90°-Krümmers. In dem zu untersuchenden Reynoldszahlbereich bildet sich in solchen Krümmern ein Doppelwirbel aus, der so genannte Dean Wirbel. Die zugehörige Kennzahl ist die Dean-Zahl, die wie folgt gebildet wird:

$$De = \operatorname{Re}\sqrt{\frac{a}{2R}}.$$
 (6)

Dabei stellt *R* den Krümmungsradius und *a* die Kanalbreite dar. Bei Dean-Zahlen größer als 30 kann die Ausbildung eines solchen Doppelwirbels erwartet werden. In dem untersuchten Fall ist  $De \approx 140$ . Ein Doppelwirbel stellt ein komplexes dreidimensionales Strömungsbild dar, welches hinsichtlich des Folgeverhaltens der Partikel als kritisch zu sehen ist. Um zu verifizieren, ob es mit der erarbeiteten Methodik gelingt auch solche Strukturen zu erfassen, wurden µPIV-Messungen in mehreren Beobachtungsebenen durchgeführt. D.h. das Strömungsfeld in dem Krümmer wurde in mehreren Ebenen abgescannt und die Partikelverteilung aufgenommen und deren Verschiebung detektiert. Es zeigte sich, dass eine ausreichende Partikelverteilung in allen Messebenen erreicht werden konnte. Da mit dem in entwickelten Verfahren zur Kopplung des Partikelerzeugungssystems an den Mikrokanal die Ablagerung von Partikeln deutlich reduziert werden konnte, stand eine ausreichende Messzeit für das Scanning-µPIV-Verfahren zur Verfügung. Da das hier verwendete µPIV-Verfahren kein Stereo-Verfahren ist, kann nur die Geschwindigkeitsverteilung in der Messebene (*u*, *v*) und nicht senkrecht hierzu (*w*) gemessen werden. Nutzt man jedoch die Kontinuitätsgleichung in der Form:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rightarrow \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y} + \frac{\Delta w}{\Delta z} = 0$$
(7)

und die Randbedingung, dass an den Kanalwänden keine Geschwindigkeit vorliegt, kann das dreidimensionale Strömungsfeld über ein Integrationsverfahren rekonstruiert werden. Die Auflösung der Gradienten wird dabei von der Größe der "interrogation windows" ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) und dem Abstand der Messebenen ( $\Delta z$ ) bestimmt<sup>6</sup>. Abbildung 20 zeigt als Resultat dieser Messungen den typischen Dean-Doppelwirbel in zwei verschiedenen Ansichten.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Das Verfahren wurde bereits erfolgreich bei wesentlich komplexeren Wirbelstrukturen angewandt. Siehe hierzu: Burgmann S., Klaas M., Schröder W.: *Vortex Detection via Scanning-PIV Measurements*, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", GALA06, Braunschweig, 5.-7. September 2006



Abbildung 20: zwei Ansichten des Stromlinienbildes eines Dean-Wirbels in einem Kanal; jeweils gemessen in einer Luftströmung bei Re = 200 mit einem Scanning-µPIV-Verfahrens mit fluoreszierenden Ethylenglykol-Partikeln

Man erkennt anhand der farblich geschwindigkeitsmarkeirten Stromlinien deutlich, dass das Fluid und damit die Partikel in starkem Maße zu dem Kanalboden (z = 0) bzw. –deckel (z = 1) transportiert wird. Dennoch konnte keine massive Partikelablagerung an Boden oder Deckel festgestellt werden. Diese Beobachtung bestätigt das ausreichende Folgevermögen der Partikel.

Zur Bestätigung der Messergebnisse wurden die Strömungssimulationen aus 1.1 herangezogen sowie identische µPIV-Messungen in einer Wasserströmung vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Farbgebung bei der flächigen Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung ist derjenigen des CFD-Ergebnisses angepasst worden. Man erkennt deutlich die gleichen Muster der Geschwindigkeitsverteilung. Der Vergleich der Messergebnisse aus der Luft- und der Wasserströmung an einer ausgewählten x-z-Ebene zeigt wieder die identischen Muster des Doppelwirbels. Zudem wird deutlich, dass auch die normierten Geschwindigkeiten dieselbe Verteilung (erkennbar an der Farbgestaltung) aufweisen.

28



Abbildung 21: linke Seite: Darstellung der Verteilung der Absolutgeschwindigkeit bei einem Dean-Wirbel in einem 90°-Krümmer für µPIV Messung (oben) und CFD-Rechnung (unten). Rechte Seite: Gegenüberstellung der gemessenen Rotationsgebiete in einer ausgewählten x-z-Ebene des Krümmers für eine Luft- und eine Wasserströmung

Anhand der hier dargestellten Ergebnisse kann festgehalten werden, dass in dem ersten Schwerpunkt dieses Projekts erfolgreich ein Verfahren erarbeitet und demonstriert wurde, mit dem sich verlässliche und reproduzierbare µPIV-Messungen in Gasen in Mikrokanälen durchführen lassen.

Der zweite Schwerpunkt des Projekts lag in der Anpassung der in ersten Schwerpunkt erarbeiteten Ergebnisse und Maßnahmen für µPIV-Messungen in Brennstoffzellenmodellen und betriebenen Brennstoffzellen.

## 2.1) Herstellung geeigneter Messzellen und Untersuchungen von Flüssigkeitsströmungen in Brennstoffzellenmodellen

Um die in dem ersten Schwerpunkt des Projekts erarbeiteten Maßnahmen für µPIV-Messungen für Untersuchungen in Brennstoffzellen anwenden zu können, mussten die Kanalstrukturen der Bipolarplatte optisch zugänglich gestaltet werden. Wie Abbildung 22 verdeutlicht, besteht ein Brennstoffzellenstapel aus mehreren Brennstoffzellen. Eine solche Brennstoffzelle wird jeweils aus den Bipolarplatten der Kathode und Anode gebildet, die von der MEA (membrane electrode assembly) getrennt werden. In den Bipolarplatten der Kathode und Anode sind Kanalstrukturen eingelassen, die für die gleichmäßige, flächige Verteilung der Reaktionsmedien sorgen sollen. Die Gleichverteilung der Medien in den Bipolarplatten ist einer der Untersuchungspunkte dieses Projekts.



Abbildung 22: Aufbau eines Brennstoffzellenstapels, Illustration als Explosionsansicht

Um die Strömungsverhältnisse in den Kanälen der Bipolarplatte untersuchen zu können, wurden spezielle Messzellen aufgebaut (Abb. 23). In diesen wird eine ausgewählte Bipolarplatte eingebaut und die Kanäle mit einer Glasplatte oder transparenten Folie verschlossen (AP3). Die verwendete Folie klebt nur an den Stellen, an denen ein Formschluss vorliegt und sie angedrückt werden kann. Somit sind Einflüsse einer Klebesubstanz z.B. auf Partikel in der Strömung ausgeschlossen. Dieser Aufbau der Messzellen erlaubt eine Untersuchung mittels µPIV auf einem Mikroskop mit einem Messbereich von wenigen Millimetern Kantenlänge oder aber auch eine angepasste PIV-Messung mittels einer üblichen CCD-Kamera und Standardobjektiven und einer Volumenbeleuchtung, wie sie in Abb. 23 dargestellt ist. Ein solcher Aufbau erlaubt einen größeren Messausschnitt (~ 10 mm Kantenlänge). Der Rahmen verfügt auf der Rückseite über die entsprechenden Medienanschlüsse und kann gasdicht verspannt und verschlossen werden. Alternativ zu den üblichen Compound-Bipolarplatten kann auch eine aus Plexiglas hergestellte Bipolarplatte eingesetzt werden. Der optische Zugang ist durch das transparente Material bereits gegeben. Auf diese Weise können auch Strömungsverhältnisse unter dem Einfluss einer MEA untersucht werden, welche bei dem oben beschriebenen Aufbau nicht eingesetzt werden kann, da sie den optischen Zugang blockieren würde.





Abbildung 23: Messzelle für Strömungsmessungen mit der PIV-Technik in den Kanälen einer ZBT-Bipolarplatte (links) und exemplarischer Einsatz bei einer Volumenbeleuchtungsmessung mit PIV (rechts)

Auch ohne den Einbau einer MEA können mit der Apparatur grundsätzliche Fragestellungen zur Gleichverteilung in Bipolarplatten-Kanalstrukturen untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Kanalstrukturen entworfen und die Strömungszustände in diesen Kanalstrukturen mittels numerischer Simulation berechnet. Dazu wurde die CFD-Software ESI Ace+ verwendet. Der Strömungsführung in Brennstoffzellen kommt eine entscheidende Bedeutung bezüglich der Leistungsfähigkeit der Zelle zu. Abbildung 24 zeigt die errechneten Druckverläufe in zwei verschiedenen Konfigurationen. Das Serpentinendesign weist einen relativ hohen Druckverlust auf. Pro aktiver Fläche eines Kanals soll derselbe Einzelvolumenstrom vorliegen. Da alle sechs Kanäle die gleiche Länge aufweisen, ist der Volumenstrom in jedem Kanal gleich. Dies gilt es jedoch mittels PIV-Messungen zu belegen. Das U-KanalDesign wurde entworfen, um den Druckverlust zu reduzieren. Hohe Druckverluste sind gleichbedeutend mit einer höheren Pumpleistung und damit einer parasitären elektrischen Leistung, was den Wirkungsgrad des Systems herabsetzt. Da in diesem Design die Kanallängen unterschiedlich sind, aber wieder dergleiche Volumenstrom pro aktiver Fläche vorliegen soll, ist eine komplexe Einlassstruktur entworfen worden, um die entsprechenden Einzelvolumenströme anzupassen. Auch diese Strömungsverhältnisse wurden mittels PIV-Messungen untersucht.



Abbildung 24: Ergebnisse der CFD-Rechnung für zwei verschiedene Kanalstrukturen einer Bipolarplatte; die Farbkodierung repräsentiert den Druckverlauf.

Einige Strömungsphänomene in den Kanälen der Bipolarplatte wie beispielsweise Ablösezonen etc., welche die Verteilung des Fluids und die Druckverluste beeinflussen, können über die Reynolds-Analogie in einer Flüssigkeitsströmung untersucht werden. Eine reale Gasströmung der Zelle ist hier nicht erforderlich. µPIV-Messungen in Flüssigkeiten sind, wie schon erwähnt, erheblich unkomplizierter als in Gasströmungen. Um grundsätzliche Designfragen in kurzer Zeit zu klären, kann somit auf Flüssigkeitsströmungen zurückgegriffen werden. In Abbildung 25 sind exemplarisch die Ergebnisse der PIV-Messungen für die beiden genannten Strukturen als Geschwindigkeitsvektorplot dargestellt. Bei dem Multi-Serpentinen-Design erkennt man anhand der Farbgebung (Betrag der lokalen Geschwindigkeit) bereits die gute homogene Volumenstromverteilung. Der extrahierte Plot der Geschwindigkeitsprofile weist diese Gleichverteilung des Volumenstroms nach. Bei dem U-Kanal-Design wird die unterschiedliche Volumenstromverteilung in den Kanälen über den Farbverlauf der Geschwindigkeitsvektoren deutlich. Der Vergleich zwischen den zugehörigen Geschwindigkeitsprofilen aus der Rechnung und der Messung zeigt jedoch, dass der gewünschte und in der numerischen Simulation auch berechnete Volumenstrom in den jeweiligen Kanälen sich im Experiment nicht eingestellt hat. Diese einfache Überprüfung der CFD-Rechnung zeigt an dieser Stelle exemplarisch, dass eine experimentelle Validierung einer numerischen Kanalstruktur-Auslegung für Brennstoffzellen ein notweniger Schritt bei der Entwicklung einer optimierten Bipolarplatten-Kanalstruktur ist. Die PIV-Messtechnik stellt hier ein geeignetes Tool dar.



Abbildung 25: Ergebnisse der PIV-Messung für zwei verschiedene Kanalstrukturen einer Bipolarplatte; die Farbkodierung repräsentiert den Betrag der lokalen Geschwindigkeit. Oben: Multi-Serpentinen-Design, unten: U-Kanal-Design (inkl. Vergleich der berechneten (schwarz) und gemessenen (rot) Geschwindigkeitsprofile)

Zusätzlich zu den oben dargestellten Untersuchungen wurden Versuche mit der PIV-Technik durchgeführt, um das Phänomen der Querströmung unter den Stegen von Kanal zu Kanal zu untersuchen. Die in Abbildung 24 gezeigte Druckverteilung des Multiserpentinen-Designs zeigt, dass in benachbarten Kanälen Druckunterschiede in der Größenordnung von 100 Pa auftreten können. Die poröse Gas-Diffusionslage (GDL), die zwischen der Bipolarplatte und der Membran eingebaut ist, ermöglicht dabei eine Querströmung zwischen diesen Kanälen. Unter solchen Umständen besteht die Gefahr, dass sich unterversorgte Gebiete auf der Fläche der Bipolarplatte bilden. In den in Abbildung 23 gezeigten Rahmen wurde daher ein Paket aus zwei gefrästen Bipolarplatten aus Plexiglas eingebaut, zwischen die eine MEA (d.h. Membran plus GDL) eingesetzt wurde.



Abbildung 26: Ergebnisse der PIV-Messung für die Strömung in der Kanalstruktur einer Bipolarplatte und an der GDL-Oberseite unterhalb der Stege; oben: Kanalströmung, unten: GDL-Strömung in identischem Messausschnitt; oben links: CFD-Ergebnis der Druckverteilung mit markiertem Messausschnitt

Durch diesen Aufbau konnte über die Reynoldsanalogie in Wasser die Strömung in den Kanälen und unterhalb der Stege mittels PIV untersucht werden. Unter den Stegen konnte die Partikelbewegung in den obersten Poren der GDL detektiert werden. Diese "Oberflächenströmung" kann Aufschluss geben über den Strömungsanteil, welcher unter den Stegen quer zur Hauptströmungsrichtung der Kanäle fließt. Abbildung 26 zeigt die Strömungsverteilung in einem Krümmer der Kanalstruktur einer Standard-Bipolarplatte und im Bereich der Stege. Man erkennt, dass die Strömungsgeschwindigkeiten unter den Stegen um die Größenordnung 1000 kleiner sind, als die Strömungsgeschwindigkeiten im Kanal. Interessanterweise treten bei der GDL-Strömung die größten detektierten Geschwindigkeiten nicht in dem Bereich auf, wo die größten Druckgradienten vorliegen. Vielmehr scheint die Strömungsverteilung eine Funktion des lokalen Anpressdrucks bzw. der lokalen Steghöhe zu sein. Die gefräste Plexiglas-Bipolarplatte kann hier leicht unterschiedliche Steghöhen aufweisen, da das Material beim Fräsen dazu neigt, sich zu verformen. Mit diesen Tests konnten jedoch grundsätzliche Fragestellungen bzgl. der Größenverhältnisse zwischen Stegund Kanalströmung geklärt werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Partikelablagerungen in der GDL (in diesem Falle 8 µm große fluoreszierende MF-Partikel) bei Flüssigkeitsströmungen ein Problem für die Partikeldetektion darstellen können: mit zunehmender Messzeit lagerte sich vermehrt Partikelmaterial ab, so dass ein lokales Überstrahlen der Messregion mit Fluoreszenzsignal auftrat. Flüssigkeitströpfchen in Gasströmungen führen nicht in diesem Maße zu Ablagerungen und können darüber hinaus auch wieder ausgespült werden, wie die folgenden Untersuchungen zeigen.

## 2.2) Durchführung von Gasströmungsuntersuchungen mit der µPIV-Technik in Brennstoffzellenmodellen

Basierend auf den dargestellten Maßnahmen und Ergebnissen aus 1.2 und 1.3 wurde ein Brennstoffzellenmodell (AP8) aufgebaut, welches aus einem PMMA-Mikrokanal besteht, bei dem eine Bewandung aus einer in Brennstoffzellen verwendeten Gasdiffusionslage (GDL) besteht. Da die Durchströmung einer porösen Schicht in Wechselwirkung tritt mit der Durchströmung des gasführenden Mikrokanals, wurde hier erstmals in einer Gasströmung die Ausbildung einer Dean-Wirbelstruktur über einer porösen Schicht mittels µPIV vermessen. Es zeigt sich, dass der Deanwirbel deutlich deformiert wird (Abbildung 27), was Rückwirkung auf eine Vermischung haben kann. Die Ergebnisse fließen in aktuelle Arbeiten zu Simulation von Brennstoffzellen-Prozessen an der Forschungsstelle 1 ein. Darüber hinaus zeigten die Messungen, dass bei Verwendung der in den Punkten 1.2 und 1.3 dargestellten Verfahren zur Partikelbereitstellung und –Versorgung des Mikrokanals keine Partikelablagerungen auftreten, die eine Messung verhindern. Partikelablagerungen sind nicht gänzlich zu vermeiden, dennoch ist das Ausmaß nicht so, dass sich ein Fluoreszenzfilm bilden könnte. Auch Ablagerungen an der GDL-Oberseite sind nur mäßig. Zudem konnte gezeigt werden, dass Tröpfchenablagerungen über ein längeres Spülen des Kanals mit ungeseedeter Luft abgebaut werden können.



Abbildung 27; links:zwei Ansichten des Stromlinienbildes eines Dean-Wirbels über einer porösen Bewandung in einem Brennstoffzellenmodell bei *Re* = 200; jeweils gemessen in einer Gasströmung mit einem ScanningµPIV-Verfahrens mit fluoreszierenden Ethylenglykol-Partikeln; rechts: Vergleich der detektierten Wirbelstrukturen an einer ausgewählten Stelle des Kanals in der Gasströmung (oben) und in einer Wasserströmung (unten) bei gleicher Reynoldszahl)

In Abbildung 27 ist das Stromlinienbild des gemessenen Dean-Wirbels dargestellt. Man erkennt deutlich die Deformation des Doppelwirbels infolge der einseitigen porösen Bewandung des Kanals. Eine Vergleichsmessung in einer Wasserströmung bei gleicher Reynoldszahl zeigte dieselben Strömungsphänomene. Wie in Abbildung 27 zu erkennen sind auch die (normierten) gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen identisch. Man kann daher davon ausgehen, dass Messungen mit der µPIV-Technik in brennstoffzellenähnlichen Kanalstrukturen in Gasströmungen zu belastbaren Ergebnissen führen.

Trotz dieser ermutigenden Ergebnisse bzgl. der Durchführbarkeit von µPIV-Messungen in Brennstoffzellenmodellen, sind bezüglich der Partikelmaterialien weitere Untersuchungen erforderlich, um sicherzustellen, dass die Tracerpartikel die elektrochemischen Abläufe in einer Brennstoffzelle nicht stören. Wie erwähnt, können Partikelablagerungen nicht gänzlich vermieden werden. Hier muss gewährleistet sein, dass das Partikelmaterial nicht oder kaum elektrochemisch reagiert. Wie erwähnt, zeigte Ethylenglykol (vermischt mit dem Fluoreszenzfarbstoff Rhodamin-B) sehr gute Eigenschaften hinsichtlich Detektierbarkeit, Partikelgröße und erzielbarer Partikelanzahl. Daher wurde dieses Partikelmaterial für die µPIV-Versuche ausgewählt und hinsichtlich seiner Auswirkungen auf die elektro-chemischen Prozesse untersucht.





Ethylenglykol wurde mit Hilfe der zyklischen Voltametrie hinsichtlich möglicher Reaktionen vermessen. Abbildung 28 zeigt in Dunkelblau den typischen Verlauf der Stromdichte über dem Potential für 0.5 molare Schwefelsäure als Elektrolyt mit einer Platin-Messelektrode. Bei Zugabe von Ethylenglykol (hellblaue Kurve) verändert sich die Kurve dahingehend, dass bei etwa 0.75 V ein zusätzlicher Peak entsteht, welcher auf die Bildung eines Mischpotentials hinweist. Darüber hinaus nimmt die Stromdichte im Bereich von 0-0.2 V ab, was auf eine Blockierung des Katalysators hinweist. Man kann vermuten, dass Ethylenglykol bei brennstoffzellentypischen Spannungen (0.7 V) zu Glykolaldehyd und Glyoxal reagiert. Deren Aldehydgruppen könnten durch CO-Bildung den Katalysator blockieren. Die Messung zeigt jedoch, dass keine dauerhafte Schädigung des Katalysators auftritt, da die Kurve für

Potentiale über 0.9 V nicht ansteigt (gestrichelte hellblaue Kurve). Da für die genannten Reaktionen Ethylenglykol jedoch in direktem Kontakt mit dem Katalysator kommen muss und die Gasdiffusionslage (GDL) als Zwischenschicht diesen Kontakt verhindert oder zumindest erschwert, kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von Ethylenglykol als Partikelmaterial bei µPIV-Messungen in Brennstoffzellen möglich ist.





Abbildung 29: Spannungsverlauf beim Betrieb eines 5-Zellers. Links oben: Spannungsverlauf bei Betrieb mit reiner Luft; rechts oben: Spannungsverlauf nach übermäßiger Einleitung von partikelgesättigter Luft; links unten: Spannungsverlauf nach Spülen des 5-Zellers mit reiner Luft

Um in einem Extremversuch zu überprüfen, ob Ethylenglykol zu einer Schädigung des Katalysators oder der Membran führt, wurde ein PEM-5-Zeller getestet, in welchen übermäßig stark partikelgesättigte Luft eingeleitet wurde. D.h. es wurde so viel Ethylenglykol eingebracht, dass sich Fluidablagerungen in den Mikrokanälen der einzelnen Zellen ergaben. Das Spannungsniveau des 5-Zellers wurde vor und nach der Einleitung von Ethylenglykol bei einem Betrieb mit reiner Luft vermessen. Es zeigt sich (Abb. 29), dass bei Ablagerungen von Ethylenglykol in den Zellen, wie nach dem Ergebnis der zyklischen Voltametrie zu erwarten, keine hohen Zellleistungen erzielt werden können. Wird der 5-Zeller jedoch einige Zeit mit reiner Luft gespült, wird dasselbe Spannungsniveau erreicht, wie vor der Beaufschlagung mit Ethylenglykol (Abb. 29). Um abschließend beurteilen zu können, ob sich bei Einleitung von Ethylenglykolpartikeln ein für den Betrieb einer Zelle ungünstiges Mischpotential ergibt, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Dazu wurde eine einzelne Einkanal-DMFC aus dem IGF-Projekt 16337 genutzt, die bei 1500mA bei 60°C betrieben wurde. Der Luft-Volumenstrom der Kathode wurde auf 125 ml/min eingestellt und mit dem in Abbildung 15 gezeigten Aufbau mit Ethylenglykol-Partikeln beaufschlagt. Der Spannungsverlauf der Zelle wurde mehrmals über einen Zeitraum von mehreren Minuten gemessen. Es wurde keine signifikante Degradation der Zelle festgestellt. Die gemessenen Spannungsschwankungen bewegen sich in dem üblicherweise vorherrschenden Spannungskorridor von +/- 5% des mittleren Spannungswertes.



Abbildung 30: Spannungsverlauf eines 1-Zellers mit Einkanal-Flow-Field bei kontinuierlichem Betrieb mit partikelbeladener Luft für zwei Testreihen unter Angabe eines Fehlerbalkens mit Betrag von 5%. Blaue Linie: temporäres Niveau eines Spannungsabfalls; vermutlich infolge eines Wassertropfens.

#### 2.3) Durchführung von µPIV-Messungen in betriebenen Brennstoffzellen

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen bezüglich der Nutzbarkeit von Partikeln in der Strömung für Brennstoffzellenuntersuchungen, wurde eine spezielle Zelle aufgebaut, die µPIV-Messungen auf der Anode und der Kathode erlauben. Gleichzeitig zu den Messungen der lokalen Geschwindigkeitsverteilung in der Zelle war die Aufzeichnung des temporären Spannungsverlaufs vorgesehen, um eine Korrelation zwischen strömungsmechanischen Vorgängen und der Zellleistung herstellen zu können. Dazu wurde ein spezieller Versuchsstand aufgebaut, in den das System zur Partikelbereitstellung aus dem ersten Projektschwerpunkt integriert wurde (siehe Abb. 31). Dieser Versuchsstand beinhaltet alle notwendigen Komponenten zum Betrieb und zur Überwachung einer Brennstoffzelle. In diesem Falle wurde eine Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) ausgewählt, da bei diesem Typ auch µPIV-Messungen auf der Anodenseite durchführbar sind. Bei wasserstoffbetriebenen PEM-Zellen ist die Gasdichte auf der Anode so gering, dass es kein Partikelmaterial gibt, welches erlaubt, dass die Partikel der Strömung schlupffrei folgen könnten. Um aber mittels der µPIV-Technik gewonnene Erkenntnisse auf der Kathodenseite in den Kontext des Brennstoffzellenbetriebs einordnen zu können, erscheinen µPIV-Messungen auf der Brennstoffseite sinnvoll. Hier bietet sich die DMFC an, da hier zum einen ein flüssiger Brennstoff vorliegt, der leicht mit Partikeln versetzt werden kann, zum anderen auch zusätzlich noch eine Mehrphasenströmung vorliegt, deren Charakteristik sich besonders gut mittels der µPIV-Technik analysieren lässt.



Abbildung 31: Versuchsstand für µPIV-Messungen an betriebenen Brennstoffzellen

Der notwendige Versuchsstand muss über alle Komponenten zum Betrieb einer Brennstoffzelle verfügen. Darüber hinaus müssen alle notwendigen Systeme für eine  $\mu$ PIV-Messung integriert werden. Für die  $\mu$ PIV-Messung werden folgende Einzelposten benötigt:

- Zeiss Axio-Observer Z1 Epi-Fluoreszenz Microskop
- 12 bit PCO Sensicam QE
- frequenzverdoppelter Newave Pegasus Nd:YLF laser
- Lichtarm für Einkopplung des Laserlichts
- PC für Aufnahme und Auswertung der Doppelbilder
- Partikelerzeugungssystem mit Kopplung an die DMFC

Darüber hinaus beinhaltet der Versuchsstand folgende Komponenten (vgl. Abb. 31):

- Spritzenpumpe (Nemesys) für Wasser-/Methanolversorgung
- Heizschlauch und Regler für Wasser-/Methanolversorgung
- Druckluftsystem mit Durchflussmesser und Filter für Luftversorgung
- Source-Measure-Einheit (Keithley) für stromgesteuerten Betrieb der DMFC
- Spannungsquellen zur Versorgung der Heizfolien und des Field-Point
- Field-Point mit Anschluss für Pt100-Widerstandsthermometer
- PC mit Labview-Programm für Temperaturmessung und Auslesen des Spannungsmessgeräts

Für die μPIV-Messungen wurde eine spezielle Einkanal-DMFC konstruiert und gefertigt. Diese ist so ausgelegt, dass die Effekte von CO<sub>2</sub>-Blasen auf der Anode bzw. von Wassertropfen auf der Kathode auf die Momentanleistung der Zelle zurückgeführt werden können. D.h. es wurde eine Zelle aufgebaut, die auf der Kathode und der Anode jeweils über einen relativ kurzen geraden Kanal verfügt. Die Gasdiffusionslage ist auf beiden Seiten nur ein wenig breiter als der Kanal. Dadurch ist die aktive Fläche klein (2.75 cm<sup>2</sup>) und es kann keine parasitäre Querströmung unter Stegen erfolgen. Unter diesen Bedingungen sind Spannungsänderungen der Zelle auf die lokal begrenzten Strömungsphänomene zurückführbar. Die Zelle wird mit Heizfolien auf Temperatur gebracht. Die Temperatur wiederum wird mittels integrierten Pt100 Sensoren überwacht. Nach einer vom Hersteller der Membran vorgegebenen Einfahrprozedur kann die Zelle für Messungen genutzt werden. Das Design der Zelle ist in Abbildung 32 als Explosionsansicht dargestellt.





Abbildung 32: Explosionsansicht der Einkanal-DMFC mit Anordnung der Pt100-Sensoren und Heizfolien (links) und Ansicht der ersten gefertigten Zelle auf dem Traversiertisch des Mikroskops.

Es wurde eine erste Einkanal-Brennstoffzelle gefertigt. Diese Zelle wurde mit einer BASF-E-TEK Series 12D-W (5-layer)-MEA aufgebaut, die eine gewebte GDL-Struktur mit hydrophober Oberfläche aufweist. Es wurde die notwendige Einfahrprozedur für die Aktivierung der Membran durchgeführt und anschließend der Verlauf der Zellspannung für verschiedene Betriebsbedingungen (Volumenströme der Medien, Zelltemperatur, etc.) untersucht. Es zeigten sich unglücklicherweise erhebliche Probleme bei der Aufrechterhaltung der elektrochemischen Prozesse dieser Einkanal-Brennstoffzelle, welche auf Kontaktierungsprobleme und eine defekte Membran zurückzuführen sind. Es wurde daher in einer zweiten Generation eine neue Zelle aufgebaut, die zusätzlich noch einen optischen Zugang auf der Kathode aufweist. Dennoch konnten mit der ersten Zell-Generation belastbare Messungen durchgeführt werden, die durch die synchrone Messung von Anoden-Strömung und Zellleistung neue Erkenntnisse über das Verhalten von DMFC erlaubten. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.



Abbildung 33: typische Ansicht der Anodenströmung bei betriebener Brennstoffzelle mit wachsenden CO<sub>2</sub>-Blasen an der Kanalwand und 1.22μm Fluoreszenzpartikeln in der Strömung für μPIV-Messungen (links) und Illustration der μPIV-Messung im Mikrokanal (rechts)

Es konnten erfolgreich μPIV-Messungen auf der Anodenseite der Einkanal-DMFC durchgeführt werden. Bei der elektrochemischen Reaktion entstehen hier CO<sub>2</sub>-Bläschen, welche die Strömungsbedingungen im Kanal und in der GDL beeinflussen. Abbildung 33 zeigt eine typische Situation in dem Strömungskanal: zu sehen sind mehrere CO<sub>2</sub>-Bläschen, die an der Kanalwand haften sowie die Fluorenszenzpartikel in der Strömung. Es handelt sich hierbei um ein Rohdaten-Bild, d.h. um eine μPIV-Auswertung vornehmen zu können, müssen die Bilder entsprechend nachbearbeitet werden, so dass lediglich die Partikelabbilder verbleiben. Mit der aufgebauten Zelle konnten grundsätzliche Phänomene der DMFC analysiert werden. So bilden sich von Zeit zu Zeit im Anodenkanal große CO<sub>2</sub>-Blasen, die als Gaspfropfen durch den Kanal wandern und dabei den Kanal von festsitzenden CO<sub>2</sub>-Blasen reinigen. In Abbildung 34 ist ein solcher Pfropfen zu sehen. Man erkennt deutlich die "reinigende Wirkung" des Pfropfens. Mit zunehmender Aktivität der Zelle, d.h. zunehmender Leistung, wird vermehrt CO<sub>2</sub> produziert. Dadurch entstehen mehr und größere Gaspfropfen. Der Zusammenhang zwischen Zellleistung und Austrag von CO<sub>2</sub>-Gasvolumen infolge der Gaspfropfenwanderung ist in Abbildung 35 dargestellt.



Abbildung 34: typische Ansicht der Anodenströmung bei betriebener Brennstoffzelle mit Ausbildung und Wanderung eines CO<sub>2</sub>-Gaspfropfens



Abbildung 35: Spannungs- und Leistungskurve der ersten Zell-Generation für 0.5 ml/min 2M/l Methanollösung bei 70°C und 150 ml/min Luftvolumenstrom

Es ist zu vermuten, dass dieser Prozess der Gaspfropfenwanderung bzw. die Ausbildung von kanalfüllenden Blasen messbare Auswirkungen auf die Zellleistung hat. Daher wurden synchronisiert μPIV-Messungen und Spannungsmessungen im Anodenkanal vorgenommen. In Abbildung 36 ist eine typische Sequenz für das kontinuierliche Blasenwachstum auf der Anodenseite und dessen Auswirkungen auf das Strömungsfeld dargestellt. Man erkennt deutlich, dass die CO<sub>2</sub>-Blasen zu einer fast vollständigen Versperrung des Kanalquerschnitts führen. Obwohl der freie Querschnitt auf etwa 10% abnimmt, ist eine gleichartige Geschwindigkeitserhöhung, wie sie nach dem Kontinuitätsgesetz erforderlich ist, nicht zu erkennen. Da mit der μPIV-Technik in dem hier genutzten Aufbau lediglich die Geschwindigkeitsverteilung in der Ebene messbar ist, ist diese Beobachtung ein Hinweis auf eine ausgeprägte 3-dimensionale Strömung.



Abbildung 36: Sequenz der Anoden-Strömung mit wachsenden Gasblasen und zugehöriger Geschwindigkeitsverteilung





Weitere Detailuntersuchungen des Strömungsbildes in verschiedenen Messbenen über die Kanalhöhe lassen vermuten, dass es beim Auftreten von kanalfüllenden Blasen zu einer vermehrten Strömung durch die GDL kommt. Sitzt eine große Blase im Kanal kommt es zu ausgeprägten Eckenströmungen (siehe Abbildung 37). Da diese freien schmalen Kanäle zwischen der Blase und den Kanalwänden relativ gering sind und der Gesamtvolumenstrom konstant bleibt, wird die GDL in erhöhtem Maße durchströmt. Dies erkennt man deutlich in Abbildung 37 (unten); hier ist eine signifikante Geschwindigkeitserhöhung unterhalb der (abgeschrägten) Blase zu sehen. Eine solche Blase wird typischerweise zu einem wandernden Gaspfropfen. Treten solche Gaspfropfen auf und wandern durch den Kanal, ist eine Spannungsänderung messbar. Bei Auftreten des Pfropfens ist ein Spannungsabfall messbar. Signifikant ist außerdem ein Spannungsanstieg vor dem Auftreten eines Gaspfropfens. Exemplarisch ist dieses Phänomen in Abbildung 38 dargestellt. Da in diesem Fall ein Leistungsbereich der Zelle untersucht wurde, bei dem immer nur ein großer Gaspfropfen im Kanal ist, kann diese Spannungsänderung eindeutig diesem strömungsmechanischen Effekt zugeordnet werden. In Abbildung 39 ist der Zusammenhang zwischen der Spannungsänderung und dem Auftreten eines Gaspfropfens und dem dadurch bedingten Reinigen des Kanals noch einmal im Detail dargestellt.



Abbildung 38: typischer Spannungsverlauf bei Auftreten und Wanderung eines Gaspfropfens



Abbildung 39: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spannungsverlauf und Strömungsfeld

Man erkennt ein Blasenwachstum in dem Bereich des Spannungsanstiegs, welcher zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten führt. Passiert der Gaspfropfen den Messausschnitt (No. 5) kann keine Geschwindigkeitsinformation gewonnen werden, da der Gaspfropfen keine Fluoreszenzpartikel enthält. Die Gaspfropfen entstehen im ersten Viertel der gesamten Kanallänge und wandern durch den Kanal. Sie bewegen sich mit bis zu 8 mm/s durch den Kanal, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Gaspfropfen sich 1-2 Sekunden vor dem passieren durch den Messausschnitt losgerissen hat. Wie bereits erwähnt, reinigt der Pfropfen den Kanal auf seinem Weg stromab von festsitzenden Gasblasen. Der Spannungsabfall und das niedrigere Spannungsplateau lassen sich mit diesem Effekt in Verbindung bringen.



In Abbildung 40 ist ein Erklärungsversuch für die beobachteten Phänomene dargestellt. Die wachsenden Blasen führen zu einer Verdrängungswirkung auf das Fluid. Haben die Blasen eine kritische Größe erreicht, kommt es infolge der Verschiebung der jeweiligen Strömungswiderstandsniveaus in Kanal und GDL zu einer verstärkten Durchströmung der GDL. D.h. zu dem normalerweise diffusiven Stofftransport in der GDL kommt es verstärkt zu einem konvektiven Stofftransport. Die Katalysatorschicht zwischen GDL und Membran wird effektiver mit Methanol versorgt, so dass es zu einer verstärkten elektro-chemischen Reaktion kommt, so dass ein Spannungsanstieg messbar ist. Bildet sich ein Gaspfropfen aus, wird der Kanal gereinigt, d.h. die Verdrängungswirkung durch die Blasen wird aufgehoben. Eine Strömung in die GDL wird nicht weiter erzwungen, das in der GDL verbleibende Methanol reagiert ab und wird nicht ersetzt. Es kommt zu einem Spannungsabfall. Da die Reaktion durch die diffusiven Prozesse nicht vollständig zum Erliegen kommt, wird weiterhin CO<sub>2</sub> produziert. Es bilden sich wieder Blasen und der oben beschriebene Prozess beginnt von vorne. Diese Ergebnisse wurden auf der *"Fuel Cells 2012"*-Konferenz in Berlin vorgetragen und mit dem anwesenden Fachpublikum diskutiert. Sie werden auf Einladung der Konferenzveranstalter in einer Sonderausgabe der Zeitschrift *"Energy Procedia"* publiziert werden. Darüber hinaus werden die Ergebnisse dieser Arbeiten unter messtechnischen und strömungsmechanischen Aspekten auf der Fachkonferenz *"16th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics"* in Lissabon vorgetragen werden.





Abbildung 41: Ansicht der Anodenseite (links) und der Kathodenseite (rechts) der zweiten Generation der Einkanal-DMFC mit Temperatur- und Spannungsüberwachung.

Wie bereits erwähnt, wurde eine zweite Generation der optisch zugänglichen DMFC aufgebaut, die auch eine Beobachtung der Strömungsvorgänge auf der Kathode erlaubt. Diese Zelle ist prinzipiell genauso gestaltet wie die Zelle in Abb. 32., d.h. sie verfügt über entsprechende Temperatursensoren und einen vollständig optisch zugänglichen Anodenkanal. Auf der Kathodenseite ist ein Glasfenster eingelassen (Abb. 41). Aus konstruktiven und Stabilitätsgründen, konnte dieses Fenster nicht größer gestaltet werden, da sonst der notwendige Anpressdruck und damit der elektrische Kontakt nicht gewährleistet sind.

Diese neue Zelle wurde mit einer Solvicore D300E 5-layer MEA ausgestattet. Außerdem wurde das Problem der Kontaktierung gelöst. Es zeigte sich, dass mit dieser Zelle erheblich bessere Leistungsdichten selbst bei niedrigerer Betriebstemperatur erzielt werden konnten. Es wurden die folgenden Betriebsparameter eingestellt:

- Temperatur: 50°C
- Kathodenvolumenstrom: 100ml/min Luft
- Anodenvolumenstrom: 0.5 ml/min 2 molare Wasser-Methanol-Lösung

Eine Flüssigwasserbildung wurde in dem Bereich des Kathodenfensters nur für Temperaturen unter 70°C beobachtet. Daher wurde eine niedrige Betriebstemperatur von 50°C gewählt.

Abbildung 42 zeigt die U/I-Kennlinien, die sich für die beiden möglichen Lagen der Zelle ergeben. Man erkennt den deutlichen Gravitationseinfluss auf die Zellleistung. Dies könnte mit dem Auftreten und Herauslösen der CO<sub>2</sub>-Blasen aus der GDL der Anodenseite bzw. dem Wasseraustrag aus der Kathoden-GDL erklärt werden. Die Beobachtung, dass eine bessere Zellleistung erzielt werden kann, wenn die Anodenseite nach unten weist, ist gegensätzlich zu den Erkenntnissen aus den wenigen verfügbaren Publikationen zu diesem Thema. Hier besteht weiterer erhöhter Forschungsbedarf.



Abbildung 42: Kennlinien der zweiten Einkanal-DMFC-Generation für Spannung und Leistung bei unterschiedlicher Orientierung der Anode und Kathode jeweils bei 50° C und 100 ml/min Luft und 0.5 ml/min Wasser-Methanol

Für die Untersuchung der Kathodenseite wurde die Zelle über den in Abbildung 15 gezeigten Aufbau mit Luft und Fluoreszenzpartikeln versorgt. In Abbildung 43 oben rechts ist ein entsprechendes aufsummiertes Partikelbild dargestellt. Man erkennt, dass zum einen eine





Abbildung 43: Weißlichtbild des Kathodenkanals mit Wasserbildung an den Kanalwänden (oben links); summiertes Partikelbild der Kathodenkanalströmung mit Wassertropfen an den Wänden (oben rechts); zugehöriges mit der µPIV-Technik gemessenes Geschwindigkeitsfeld (unten links)

ausreichende Partikeldichte erzeugt werden kann, zum anderen aber auch, dass das Partikelmaterial sich nicht an dem offensichtlich an der Kanalwand haftenden Wassertropfen anlagert oder mit diesem vermengt. Das zugehörige Weißlichtbild ist in Abbildung 43 oben links zu sehen. Man erkennt die Wasserablagerung auf beiden Seiten den Kanals. Die entsprechende Verengung des freien Querschnitts führt zu einer deutlichen Geschwindigkeitserhöhung, wie durch die µPIV-Analyse nachgewiesen werden kann. Aus den Daten der Kathodenmessung zeigt sich, dass die Wassertropfenbildung sich phänomenologisch von der CO<sub>2</sub>-Blasenbildung auf der Anodenseite unterscheidet. Während CO<sub>2</sub>-Blasen aus der GDL aufsteigen und sich an den Kanalwänden anlagern oder als runde Blasen in der Kanalmitte bilden, sickert das flüssige Wasser unter den oben genannten Betriebsbedingungen unter den Stegen in den Kanal hervor und bildet flache Tropfen an der Kanalwand. Diese Tropfen können wachsen, so dass eine relativ große Kanalversperrung auftritt. Viel eher tritt aber ein oszillieren des Tropfens auf, so wie es in Abbildung 44 gezeigt wird: der Tropfen wächst und schrumpft mit sehr großen Zeitskalen von mehreren dutzend Sekunden. Ein Fortreißen der Tropfen durch die Strömung wurde nicht beobachtet.



In Abbildung 45 ist der gemessene zeitlich Spannungsverlauf für die Zelle bei den oben genannten Betriebsbedingungen zu sehen. Man erkennt über die dargestellte Messzeit von etwa 20 Minuten eine leicht abnehmende Drift der Spannung, diese pendelt sich jedoch bei

etwa 0.225 V ein. Weiterhin ist eine gewisse Welligkeit des Spannungsverlaufs zu sehen. Diese leichten Spannungserhöhungen und –abfälle konnten jedoch nicht eindeutig den oszillierenden Tropfen, bzw. der Tropfengröße und Kanalversperrung zugeordnet werden. Darüber hinaus sind stark ausgeprägte Zacken im Spannungsverlauf zu erkennen. Es kann vermutet werden, dass zu den Zeitpunkten des Spannungsabfalls ein Wassertropfen ausgetragen wird. Im Bereich des optischen Zugangs ist aber ein kanalfüllender Wassertropfen oder ein Transport von Wasser zu keinem Zeitpunkt zu erkennen. Deutlich wird zudem, dass die Spannung innerhalb von Sekunden wieder auf das ursprüngliche Niveau (z.T. mit einem Überschwingen) zurückkehrt.



Abbildung 45: Ausschnitt aus dem gemessenen zeitlichen Spannungsverlauf für 50 °C und 125 mA

Beobachtet wurde aber, dass die Bildung von Wassertropfen im Kanal oder an den Kanalwänden ein Prozess von mehreren Minuten ist. Es bestehen daher Zweifel, dass die Spannungseinbrüche durch einen Wassertropfenaustrag entstehen. Wassertropfen, die den Kanal zu einem großen Teil versperren, erzeugen einen Druckverlust und damit eine Druckerhöhung vor dem Tropfen. Dadurch erhöht sich der Sauerstoffpartialdruck auf der Kathodenseite, was mit einer verbesserten Reaktion und höherer Leistung einhergeht. Es müsste daher vor dem Spannungsabfall stets ein Spannungsanstieg erfolgen, wenn die Zacken infolge eines Wassertropfenaustrags entstünden. Möglicherweise muss der Grund für die Spannungsausschläge auf der Anodenseite gesucht werden. Bei den eingestellten Betriebsbedingungen nahe dem Leistungsmaximum entstehen auf der Anodenseite so viele

51

Blasen, dass hier keine eindeutigen Zusammenhänge und Korrelationen hergestellt werden können. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf. Die µPIV-Methode kann es hier ermöglichen, die Strömungsmechanik in Zusammenhang mit der erzeugten Leistung der Brennstoffzelle zu bringen. Die beobachteten Phänomene sind hochkomplex und lassen die Ausbildung einer dreidimensionalen Strömung im Kanal hin zur GDL vermuten. Diese ließe sich mittels der µPIV-Technik untersuchen. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts waren solche detaillierten und zeitaufwendigen Messungen nicht in der notwendigen Tiefe durchführbar. Eine Optimierung des Flowfields der Bipolarplatte ausschließlich auf Basis der µPIV-Messungen ist unter diesen Bedingungen nicht möglich gewesen. Die Ergebnisse und Methoden aus Abschnitt 2.1 lassen jedoch eine grundsätzliche Flow-Field-Optimierung z.B. hinsichtlich des Druckverlustes und der Gleichverteilung zu. Ein druckverlust-optimiertes Design wurde entwickelt (Abbildung 24).

### Erläuterungen zur Verwendung der Zuwendung

#### Forschungsstelle 1 (ZBT)

Die durchgeführten Arbeiten wurden im vorherigen Kapitel in Schwerpunkten zusammengefasst. Die einzelnen vom ZBT gemäß Antrag bearbeiteten Arbeitspakete und die eingesetzten Mannmonate sind in folgender Tabelle dargestellt:

		HPA- A	HPA-C
AP 3	Vergleichsuntersuchungen von Flüssigkeitsströmungen ver-	3 5 MM	1 5 MM
	schiedener Bipolarplattendesigns	3,3 101101	1,5 101101
AP 4	Fertigung von Messzellen mit realen Bipolarplatten und		
	Partikeltests	0,75 101101	1,5 101101
AP 5	Fertigung von Einkanal-Messzellen und Untersuchung des	2 0 1 4 1 4	1 0 8484
	Partikelfolgeverhaltens in Mikrokanälen	2,0 101101	1,0 101101
AP 6	Kopplung des Partikelerzeugungssystems an das		2.0.1414
	Messsystem	0,5 101101	2,0 101101
AP 7	Realisierung von µPIV in der Gasphase	3,0 MM	
AP 8	Untersuchung von Gasströmungen in	2 0 1414	
	Brennstoffzellenmodellen	2,0 101101	1,5 101101
AP 9	Untersuchung von betriebenen Brennstoffzellen	1,25 MM	1,5 MM
AP 10	Fertigung und Untersuchung von Einkanal-PEM-		1.0.5454
	Brennstoffzellen	2,25 101101	1,0 101101
AP 11	Konstruktion, Fertigung und Untersuchung eines PEM-	2 75 8484	1.0.5454
	Brennstoffzellen-Einzellers mit optischem Zugang	2,75 101101	1,0 101101
AP 12	Berechnung von Strömungsprofilen	2,0 MM	
AP 13	Auswertung der Strömungsprofile	2,0 MM	
AP 14	Konstruktion einer Brennstoffzelle mit optimierter Leistung	0 5 1 41 4	0 5 5 45 4
	durch den Einsatz der Mikro-PIV-Technik	0,5 101101	0,5 101101
	Koordination und Berichterstattung / Veröffentlichung	2,0 MM	
	Summe	24,5 MM	11,5 MM

Die wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter wurden jeweils mit 100 % der regulären Arbeitszeit eingesetzt. Dieser Mitarbeitereinsatz entspricht mit geringen Abweichungen dem bewilligten Einzelfinanzierungsplan der Forschungsstelle und wurde in den Erläuterungen zum Einzelfinanzierungsplan ausführlich begründet.

Alle zur Durchführung der Arbeiten bzw. zum Erreichen der Forschungsziele beschafften Geräte, Bauteile und Verbrauchsmaterialien besitzen Beschaffungswerte von jeweils unter 2500 Euro außer den hier aufgelisteten Geräten:

- Kreuztisch 6.230,00 €
- optische Bank 8.900,00 €

Die Ausgaben zur Beschaffung dieser Geräte, die für die Durchführung der Arbeiten aus AP 9 notwendig waren, entsprechen in vollem Umfang dem bewilligten Einzelfinanzierungsplan der Forschungsstelle.

#### Forschungsstelle 2 (IUTA)

Die einzelnen vom IUTA gemäß Antrag bearbeiteten Arbeitspakete und die eingesetzten Mannmonate sind in folgender Tabelle dargestellt:

		HPA- A	HPA-B
AP 1	Partikelauswahl durch Modellierung	2,0 MM	
AP 2	Konstruktion und Aufbau des Partikelerzeugungssystems	2,0 MM	2,0 MM
AP 4	Fertigung von Messzellen mit realen Bipolarplatten und	2.0 MANA	
	Partikeltests	5,0 101101	2,5 101101
AP 5	Fertigung von Einkanal-Messzellen und Untersuchung des		
	Partikelfolgeverhaltens in Mikrokanälen	0,5 101101	
AP 6	Kopplung des Partikelerzeugungssystems an das		1 5 5 45 4
	Messsystem	2,5 101101	1,5 101101
AP 7	Realisierung von µPIV in der Gasphase	1,25 MM	
	Berichterstattung / Veröffentlichung	0,75 MM	
		12,0 MM	6,0 MM

Die wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter wurden jeweils mit 100 % der regulären Arbeitszeit eingesetzt. Dieser Mitarbeitereinsatz entspricht in vollen Umfang dem bewilligten Einzelfinanzierungsplan der Forschungsstelle und wurde in den Erläuterungen zum Einzelfinanzierungsplan ausführlich begründet. Alle zur Durchführung der Arbeiten bzw. zum Erreichen der Forschungsziele beschafften Geräte, Bauteile und Verbrauchsmaterialien besitzen Beschaffungswerte von jeweils unter 2500 Euro außer den hier aufgelisteten Geräten:

•	Aerosolgenerator (Electrospray)	18.535,00€
•	Aerosolgenerator (Atomizer)	3.208,80€
•	Aerosolneutralisierer	7.300,00€

Die Ausgaben zur Beschaffung dieser Geräte, die für die Durchführung der Arbeiten aus AP 2 notwendig waren, überschreiten auf Grund von Preisanpassungen seitens der Hersteller geringfügig den Umfang im bewilligten Einzelfinanzierungsplan der Forschungsstelle. Die entstandenen Mehrkosten wurden vom IUTA übernommen.

#### Erläuterungen zur Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die geleisteten Arbeiten der beiden beteiligten Forschungsstellen entsprechen innerhalb des Projektzeitraums (01.12.2009-30.04.2012) weitgehend den Plänen des Forschungsantrags und waren für die Durchführung des Vorhabens und zum Erreichen der Projektziele notwendig.

Durch neue Erkenntnisse hinsichtlich der Partikelmaterialien infolge der kontinuierlich durchgeführten Sichtung der aktuellen Literatur und Diskussionen auf der zweiten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 09.03.2011, wurden die Arbeiten in AP 4 (Partikeltests) in größerem Umfang als ursprünglich vorgesehen fortgeführt, so dass schließlich, wie im Forschungsantrag vorgesehen, ein Partikelerzeugungssystem für µPIV-Messungen in gasführenden Mikrokanälen aufgebaut und in Betrieb genommen werden konnte.

Die ersten durchgeführten Arbeiten in AP 10 und 11 (Fertigung und Untersuchung einer Brennstoffzelle mit optischem Zugang) konnten nicht mit hinreichender Wiederholbarkeit und Aussagekraft ausgeführt werden, da sich erhebliche Probleme bei der Aufrechterhaltung der elektrochemischen Prozesse ergaben. Dies wurde auf eine defekte MEA (membrane electrode assembly) zurückgeführt. Daher musste eine neue Zelle aufgebaut werden, für deren Komponenten (insbesondere der MEA) sich erhebliche Lieferverzögerungen ergaben. Für die Modifikation und den Neuaufbau der Zelle sowie für die Durchführung der sich daraus ergebenden abschließenden Messungen wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um insgesamt 5 Monate bis zum 30.04.2012 erforderlich. Die erforderlichen Projektmittel waren zum Zeitpunkt des Antrages auf kostenneutrale Verlängerung noch nicht verausgabt, bzw. sind aus Eigenmitteln der Forschungsstellen 1 und 2 zur Verfügung gestellt worden.

Die im Forschungsantrag geplanten  $\mu$ PIV-Messungen sowohl auf der Anode als auch auf der Kathode der Zelle konnten erfolgreich durchgeführt werden. Neue Erkenntnisse bezüglich der Zusammenhänge von Strömungsmechanik und elektrischer Leistung der Brennstoffzelle konnten gewonnen werden. Es zeigten sich jedoch unerwartete komplexe Phänomene und Zusammenhänge. Um diese Mechanismen vollständig zu durchdringen, ist ein erheblicher zusätzlicher Forschungsaufwand nötig, welcher innerhalb dieses Forschungsprojekts nicht durchgeführt werden konnte. Daher ist die geplante Optimierung des Flow-Field Designs auf Basis der  $\mu$ PIV-Messungen unvollständig. Es wurde ein druckverlust-optimiertes Design entwickelt. Die  $\mu$ PIV-Messungen zeigen jedoch, dass ein weiteres Optimierungsbedarf und ein weiteres Optimierungspotential besteht. Weitere Forschungen auf diesem Gebiet sind notwendig, um die entsprechenden Stellgrößen für die Optimierung zu identifizieren.

### Darstellung des wissenschaftlich/technischen und wirtschaftlichen Nutzens

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines Mikro-PIV-Systems für Anwendungen in Gasströmungen. Mikrogasströmungen spielen in zunehmendem Maße eine Rolle bei einer Vielzahl von technischen Anwendungen. Im Fokus dieses Projekts stand als spezieller Anwendungsfall die Brennstoffzellentechnik. Bei Brennstoffzellen werden die Gase über Mikrokanalstrukturen über die Bipolarplatten verteilt. Die Gleichverteilungsproblematik bzw. strömungsmechanische Detailprobleme wie die Entstehung von Totwassergebieten oder Mehrphasenströmungen können mit der in diesem Projekt entwickelten Mikro-PIV-Methodik analysiert werden. Eine Vielzahl strömungsmechanischer Prozesse innerhalb von Brennstoffzellen ist noch nicht vollständig verstanden. Auch in den Messungen und Analysen dieses Projektes traten neue Phänomene und Zusammenhänge auf, die noch weiterer Erforschung bedürfen. Mit der in diesem Projekt entwickelten µPIV-Technik für Gasströmungen in Mikrokanälen steht ein qualifiziertes Tool zur Verfügung, um diese Forschungen zielgerichtet durchführen zu können. Finales Ziel solcher Forschungen kann dann die gezielte Optimierungen der jeweiligen Flow-Field-Strukturen sein, um eine Performancesteigerung der Brennstoffzelle zu ermöglichen. Um eine solche Optimierung durchführen zu können, ist ein System notwendig, welches synchron zu den Strömungsmessungen eine Leistungs-

56

messung der Zelle ermöglicht. Ein solches System wurde in diesem Projekt entwickelt. Es steht somit für die Brennstoffzellentechnik eine Methodik zur Verfügung, die eine gezielte Analyse von Strömung und Leistung einer Brennstoffzelle ermöglicht. Dies ist eine Grundvoraussetzung dafür, dass (Mikro-) Brennstoffzellen als Energiewandlungssysteme entwickelt werden können, die sich gegenüber den bestehenden Akkumulatoren z.B. bei portablen Elektronikanwendungen behaupten sollen. Ein nachhaltiger Markteintritt kann so mittelfristig erreicht werden.

Die Anwendung des entwickelten Messsystems ist wie oben erwähnt nicht nur auf Brennstoffzellensysteme beschränkt. Mikrofluidische Systeme werden beispielsweise in der Mikroverfahrenstechnik, der Biotechnologie, der Medizintechnik, der Prozesstechnik oder der Analytik und Diagnostik eingesetzt. Speziell zu nennen sind hier z.B. Mikropumpen, Mikroventile, Mikromischer, Mikrowärmetauscher, Mikroreaktoren und Lab-On-A-Chip-Systeme. In allen diesen Anwendungen ist die gezielte Manipulation der strömungsmechanischen Prozesse von Interesse. Dazu ist eine Methode erforderlich, mit dem diese Strömungsvorgänge auch in Gasströmungen beobachtet und analysiert werden können. Diese Methode wird mit dem entwickelten System bereitgestellt. In den genannten Bereichen sind eine Vielzahl von KMU aktiv, die eine Weiterentwicklung oder Neuentwicklung ihrer mikrofluidischen Systeme mit der µPIV-Technik (für Mikrogasströmungen) durchführen können, um sich so neue Marktanteile zu erschließen, oder bestehende Marktsegmente zu erweitern.

Im Bereich der PIV-Technik sind deutschlandweit einige KMU aktiv, die Strömungsmessungen mit der PIV bzw. µPIV-Methode als Dienstleistung anbieten. Für diese Firmen eröffnen sich durch die Aufnahme eines wie in diesem Projekt entwickelten µPIV-Systems in ihr Dienstleistungsportfolio auf den oben genannten Gebieten neue Anwendungsmöglichkeiten. Darüber hinaus sind viele dieser Dienstleister auch in der Entwicklung von PIV-Systemen selbst tätig. Das in diesem Projekt entwickelte und aufgebaute System stellt lediglich ein Funktionsmuster dar, welches durch weitere Entwicklungsschritte in einen Prototypen überführt werden kann. Dies ist z.B. in einem ZIM-Projekt mit der Firma LaVision GmbH geplant, welche sich in diesem Projekt durch Teilnahme am projektbegleitenden Ausschuss und Bereitstellung von vAW aktiv beteiligt hat.

Das System zur Partikelerzeugung selbst, als Teilkomponente des Gesamtsystems, bietet die Möglichkeit, Partikel bestimmter Größe und Konzentration bei niedrigem Volumenstrom für

57

verschiedenste Anwendungen, wie z.B. der Filtrationstechnik oder für die Kalibrierung von Messgeräten, zu erzeugen. Aus den Überlegungen und Vorversuchen mit dem bestehenden System hinsichtlich einer verbesserten Abscheidung zu großer Partikel mittels Impaktoren und virtueller Impaktoren ist das ZIM-Kooperationsprojekt "Entwicklung eines Aerosolgenerators für hohe Aerosolkonzentration bei niedrigem Trägergasvolumenstrom" zwischen den Forschungsstellen 1 und 2 und der Firma Palas GmbH (Mitglied des PA) entstanden. Dieses Projekt konnte noch während der Laufzeit dieses IGF-Projektes am 01.12.2011 gestartet werden.

## Zusammenstellung aller vorhabensbezogener Veröffentlichungen Konferenzen und Workshops:

- Burgmann S., van der Schoot N., Asbach C., Wartmann J., Heinzel A., Lindken R.: Untersuchung von Transportprozessen in Brennstoffzellen, 3. Workshop AIF-Brennstoffzellenallianz, Duisburg, 04.-05.05.2010
- van der Schoot N., Asbach C., Wartmann J., Heinzel H., Lindken R.: *Development of gasphase micro-particle image velocimetry for fuel cell investigations*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> GasMEMS Workshop, Les Embiez, 09.-10.07.2010
- Lindken R., Miessner U., van der Schoot N.: *On the flow structure of two-phase flows in rectangular micro channels for lab on a chip and fuel cell applications*, International Conference on Nanoc., Microchannels and Minic., Montral, 01.-05.08.2010
- van der Schoot N., Burgmann S., Asbach C., Wartmann J., Heinzel A., Lindken R.: *Entwicklung der Micro Particle Image Velocimetry für Gasphasenströmungen in Mikrokanälen*, Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik GALA, Cottbus, 07.-09.09.2010
- Burgmann S., van der Schoot N., Asbach C., Wartmann J., Lindken R.: Analysis of Tracer Particle Characteristics for Micro PIV in Wall-bounded Flows, Proceedings of the 2nd European Conference on Microfluidics, Toulouse, 8.-10. Dezember 2010
- Asbach C., Kaminski H., von Barany D., Monz C., Dziurowitz N., Pelzer J., Berlin K., Dietrich S., Götz U., Kiesling H.-J., Schierl R.: *Vergleich tragbarer Monitore für luftgetragene Nanopartikel*, ProcessNet Fachausschuss Partikelmesstechnik, Clausthal, 02.-03.03.2011
- Asbach C., Kuhlbusch T.A.J., Fissan H., Stahlmecke B., Horn H.G., Kaminski H.: *Evaluation of an improved unipolar diffusion charger for size distribution measurements*, European Aerosol Conference, Manchester, 05.-09.09.2011

- Fissan H., Stahlmecke B., Asbach C., Kuhlbusch T., Wegner K.: *Strategies for Nanoparticle Release Assessment from Powders, Liquid and Solid Materials into the Environment,* European Aerosol Conference, Manchester, 05.-09.09.2011
- C. Asbach, T.A.J. Kuhlbusch, H. Fissan, B. Stahlmecke, H.G. Horn, H. Kaminski: *Mathematical Description of Experimentally Determined Charge Distributions of a Unipolar Diffusion Charger*, Ann. Meeting of the Am. Assoc. for Aerosol Research, Orlando, 03.-07.10.2011
- Burgmann, S.; Blank, M.; Wartmann, J., Heinzel, A.: *Investigation of the effect of CO*<sub>2</sub>-bubbles and slugs on the performance of a DMFC by means of laser-optical flow measurements, Fuel Cells Science and Technology, A Grove Fuel Cell Event, Berlin, 11.-12.04.2012
- Burgmann S., König J.: *Laseroptische Strömungsmessungen in Brennstoffzellen*, 5. Workshop AIF-Brennstoffzellenallianz, Duisburg, 23.05.2012
- Blank, M., Burgmann, S., Wartmann, J.: μ*PIV measurements of the CO*<sub>2</sub>-bubble evolution in the anode flow of an operated direct methanol fuel cell, 16<sup>th</sup> Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, 09.-12.07.2012
- Mölter, L., Burgmann, S., Lindenthal, G.: *Fluoreszenzmarkierte Tracerpartikel für PIV-Messungen in Mikrokanälen*, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", GALA12, Rostock, 04.-06.09.2012

#### Journal- und Buchpublikationen:

- Burgmann S., van der Schoot N., Wartmann J., Lindken R. (2011): *Micro Particle-Image-Velocimetry für Gasströmungen in Mikrokanälen*, TM Technisches Messen, Vol. 78 (5), pp. 253-259
- Burgmann S., van der Schoot N., Asbach C., Wartmann J., Lindken R. (2011): Analysis of Tracer Particle Characteristics for Micro-PIV in Wall-bounded Gas Flows, La Houille Blanche – International Journal of Water, Vol. 4, pp. 55-61
- Burgmann, S., Blank, M., Wartmann, J., Heinzel, A. (2012) Investigation of the effect of CO<sub>2</sub>bubbles and slugs on the performance of a DMFC by means of laser-optical flow measurements, Energy Procedia, im Druck
- Lindken, R. & Burgmann, S.: Laser-optical methods for transport studies in low temperature fuel cells, in: Hartnig, C. & Roth, C. (Eds.) 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, 2012, 425– 461

	umgesetzte Maßnahmen	Datum	Erläuterung
Α	Projektbegleitender Ausschuss (PA)		
1	1. Sitzung des PA	25.02.2010	Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten
2	2. Sitzung des PA	09.03.2011	Vorstellung der ersten erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens
3	3. Sitzung des PA	20.01.2012	Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Ausblick auf abschließende Maßnahmen
В	Messen		
1	Messe HMI 2010	19.04 23.04.2010	Präsentation der Ergebnisse auf Messestand der FS 1 (ZBT)
2	Messe WHEC 2010	16.05 21.05.2010	Präsentation der Ergebnisse auf Messestand der FS 1 (ZBT)
3	Messe HMI 2011	04.04 08.04.2011	Präsentation der Ergebnisse auf Messestand der FS 1 (ZBT)
4	Messe HMI 2012	23.04 27.04.2012	Präsentation der Ergebnisse auf Messestand der FS 1 (ZBT)
С	akademische Lehre		
1	studentische Hilfskräfte	laufend	
2	Bachelorarbeit	Dez. 2010	am Lehrstuhl für Energietechnik der Universität Duisburg-Essen
3	Diplomarbeit	Feb. 2012	Institut für Thermo- und Fluid- dynamik, Lehrstuhl für Strömungs- mechanik der Ruhr-Universität Bochum
D	Konferenzen und Workshops		
1	AIF-Brennstoffzellenallianz, Duisburg	04.05 05.05.2010	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Posterbeitrag
2	GasMEMS Workshop, Les Embiez	05.07 10.07.2010	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag und Paper
3	International Conference on Nanoc., Microchannels and Minic., Montral	01.08 05.08.2010	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag
4	Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Cottbus	07.09 09.09.2010	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag und Paper

## Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

5	European Conference on Micro- fluidics, Toulouse	08.12 10.12.2010	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag und Paper
6	Processnet Fachausschuss Partikelmesstechnik, Clausthal	02.03 03.03. 2011	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag
7	European Aerosol Conference, Manchester	05.09 09.09.2011	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag
8	Annual Meeting of the American Association for Aerosol Research, Orlando	03.10 07.10. 2011	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag
9	Fuel Cells 2012 Science & Technology, Berlin	11 12.04.2012	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag
10	AIF-Brennstoffzellenallianz, Duisburg	23.05.2012	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag
E	wissenschaftliche Publikationen in internationalen Zeitschriften		
1	tm - Technisches Messen 78:253-258, 2011	Mai 2011	wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung
2	International Journal of Water 4:55- 61, 2011	Sep. 2011	wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung
3	Woodhead Publishing - Polymer electrolyte membrane and direct methanol fuel cell technology: In situ characterization techniques for low temperature fuel cells (Volume 2), 425–461	April 2012	wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung
4	Energy Procedia, in press	April 2012	wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung
F	Entwicklung eines ZIM-Vorhabens		
1	ZIM-Kooperationsprojekt zwischen den Forschungsstellen 1 und 2 und Palas GmbH	01.12. 2011 bis 30.11. 2013	Entwicklung eines Aerosolgenera- tors für hohe Aerosolkonzentration bei niedrigem Trägergasvolumen- strom
G	Berichte		
1	Zwischenbericht	28.02.2011	Zusammenstellung der Forschungs- ergebnisse
2	Zwischenbericht	29.02.2012	Zusammenstellung der Forschungs- ergebnisse

	geplante Maßnahmen	Datum	Erläuterung
D	Konferenzen und Workshops		
10	16th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics	09.07 12.07.2012	Umfassende Bekanntmachung der Projektarbeiten und Ergebnisse durch Vortrag und Paper
	wissenschaftliche Publikationen in		
E	internationalen Zeitschriften		
5	Journal of Power Sources, Fuel Cells, Chemical Engineering Science, Chemical Engineering Plus, etc.	nach Projektab- schluss	wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung
ı	wissenschaftliche Publikationen in anwendungsnahen Medien		
1	Internetseiten der Forschungsstellen	nach Projektab- schluss	wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung
J	Übernahme der Forschungsergeb- nisse in die akademische Lehre		
1	Die Forschungsergebnisse werden in d ZBT zusammenarbeitenden "Lehrstuh (Campus Duisburg) übernommen.	lie akademische I für Energiete	e Lehre in Duisburg über den mit dem chnik" der Universität Duisburg-Essen

K Entwicklung eines ZIM-Vorhabens

1 geplantes ZIM-Kooperationsprojekt zwischen der Forschungsstelle 1 LaVision GmbH

## Förderungshinweis

Das Forschungsvorhaben 16338 N "Weiterentwicklung des Mikro-Particle Image Velocimetry Analyseverfahrens zur Charakterisierung von Gasströmungen als neuartige Entwicklungsmethodik für Brennstoffzellen" (01.12.2009 – 30.04.2012) wurde im Programm zur Förderung der "Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)" vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die AiF gefördert.

## Unterschriften

Forschungsstelle 1 (ZBT)

Projektleiter FS1:

Zentrum für Brennstoffzellen Technik

ZBT GmbH

Forschungsstelle 2 (IUTA)

Projektleiter FS2:

Institut für Energie- und Umwelttechnik

IUTA e.V.