

Innovationsreport 2018

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 18941 N

Schnellstart: Entwicklung eines Verfahrens zum gezielten Vorheizen einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle mit minimalem Energieaufwand

Laufzeit: 01.01.2016 – 30.09.2018

Beteiligte Forschungsstelle(n): Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH, Duisburg

Universität der Bundeswehr Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik München

iuta.de



Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18941 N

Thema

"Schnellstart": Entwicklung eines Verfahrens zum gezielten Vorheizen einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle mit minimalem Energieaufwand

Berichtszeitraum

01.01.2016 - 30.09.2018

Forschungsvereinigung

Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) e.V.

Forschungsstelle(n)

1. Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT), Carl-Benz-Str. 201, 47057 Duisburg

2. Universität der Bundeswehr München (UniBw), Strömungsmechanik und Aerodynamik, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Duisburg, 05.02.2019	Nadine v. d. Schoot		
Ort, Datum	Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der		
	Forschungseinrichtung(en)		
München, 25.01.2019	Christian J. Kähler,		
Ort, Datum	Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der		
	Forschungseinrichtung(en)		



Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

1.	Dur	chgeführte Arbeiten und Ergebnisse	;
	1.1	Arbeitspaket 1: Auslegung und Konstruktion der Si-μDMFC-Membran mit Flowfield auf der Anode (ZBT)4	ł
	1.2	Arbeitspaket 2: Herstellung von Si-μDMFC-Membranen (ZBT)	5
	1.3	Arbeitspaket 3: Aufbau einer Test-Zelle mit optischem Anodenzugang (ZBT)	3
	1.4	Arbeitspaket 4: Entwicklung der Fluoreszenzmesstechnik (UniBw))
	1.5	Arbeitspaket 5: Aufbau Kalibrierkammer und Qualifizierung Messtechnik (UniBw) 10)
	1.6	Arbeitspaket 6: Auswerte-/Kalibrieralgorithmus zur Temperaturkalibrierung & Partikelbildanalyse (UniBw)	,
	1.7	Arbeitspaket 7: Erweiterung der kombinierten Messmethode auf Fernmikroskop (UniBw) 13	}
	1.8	Arbeitspaket 8: Auslegung / Aufbau eines mobilen Teststands zur Vermessung von μDMFC (ZBT)14	ł
	1.9	Arbeitspaket 9: Vermessung der Kennlinien der μDMFC (ZBT)14	ŀ
	1.10	Arbeitspaket 10: Detailcharakterisierung der Vorgänge beim DMFC-Betrieb (ZBT) 16	5
	1.11	Arbeitspaket 11: Implementierung in das Temperaturmesssystem und Charakterisierung der DMFC (UniBw)	5
	1.12	Arbeitspaket 12: Erarbeitung einer geeigneten Heizstrategie basierend auf den Experimenten (ZBT)	3
	1.13	Arbeitspaket 13: Aufbau Heizelektronik (ZBT) 19)
	1.14	Arbeitspaket 14: Test des Heizverfahrens an der Si-µDMFC im Teststand (ZBT, UniBw) 20)
2.	Ver	wendung der Zuwendung	L
	2.1	Personalausgaben (Einzelansatz A des Finanzierungsplans):21	L
	2.2	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): 21	L
	2.3	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):	L
3.	Not	wendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	L
4.	Wis KM	ssenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesodere für U21	Ļ
5.	Dur	chführende Forschungsstellen 22	<u>,</u>
6.	För	derhinweis und Danksagung22	<u>,</u>
7.	Pla	n zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft23	3
	7.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen 23	;
	7.2	Geplante Transfermaßnahmen 24	ŀ
	7.3	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts 24	ł

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung einer energieeffizienten, elektrischen Vorheizung für Mikro Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (µDMFC), um eine Startzeit unter 5 Minuten zu erreichen. Dazu ist es notwendig, eine nicht-invasive Temperatur- und Geschwindigkeitsmesstechnik zu entwickeln, um Erkenntnisse über die Mechanismen der Mikrowärmeübertragung in den kleinen Kanälen einer µDMFC zu gewinnen und so gezielt eine energieeffiziente Vorheizung auszulegen und aufzubauen. Durch die simultane Temperatur- und Geschwindigkeitsmessung kann ein vollständiges Bild für den stark konvektionsdominierten Wärmeübergang in Mikrokanälen gewonnen werden. Die neue Messtechnik soll dabei so weit entwickelt werden, dass diese nach Abschluss des Projektes von Fachkollegen anderer wissenschaftlicher Disziplinen und der Industrie ohne messtechnisches Expertenwissen eingesetzt werden kann.

Der ursprüngliche Plan ein Heizverfahren auf Basis der im Rahmen des IGF-Projektes 17033N hergestellten Si-Membranen für Wasserstoffbetrieb zu entwickeln, wurde innerhalb der Projektlaufzeit verworfen. Die Si-Membranen zeigten nur geringe Leerlaufspannungen (0,28 V) und geringe Leistungsdichten (maximal 0,22 mW/cm²). Zur Erzielung akzeptabler Leistungsdichten war es notwendig, die Si-µDMFC umzukonstruieren. Die Möglichkeit, wie bei Antragstellung geplant eine Chrom-Heizschicht in der Halbleiterstruktur unterzubringen, ist durch das neue Design nicht mehr gegeben (Vergleich hierzu Arbeitspaket 3).

Es wurde als sinnvoll erachtet, die Problematik der Entwicklung einer leistungsfähigeren Si-Membran getrennt von der Realisierung einer Vorheizung für eine optisch zugängliche Mikro-DMFC zu bearbeiten. Das Heizverfahren wurde auf Basis einer optisch zugänglichen Mikro Direkt-Methanol-Brennstoffzelle mit halbleitender Indiumzinnoxid (ITO)-Heizschicht aufgebaut und untersucht. Dieses Heizverfahren ist universell einsetzbar und funktioniert auch mit anderen Brennstoffzellentypen.

Die Gegenüberstellung der im Antrag aufgestellten Projektziele mit den erreichten Zielen ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die durchgeführten Arbeiten werden explizit in den anschließenden Unterkapiteln erläutert.

Tabelle 1. Status del Flojektziele			
AP	Zielsetzung gemäß Forschungsantrag	Status	
AP 1	Auslegung und Konstruktion der Si-µDMFC-Membran mit Flowfield auf der Anode (ZBT)	geändert abgeschossen	
AP 2	Herstellung von Si-µDMFC-Membranen (ZBT)	abgeschossen	
AP 3	Aufbau einer Test-Zelle mit optischem Anodenzugang (ZBT)	geändert abgeschossen	
AP 4	Entwicklung der Fluoreszenzmesstechnik (UniBw)	abgeschlossen	
AP 5	Aufbau Kalibrierkammer und Qualifizierung Messtechnik (UniBw)	abgeschlossen	
AP 6	Auswerte-/Kalibrieralgorithmus zur Temperaturkalibrierung & Partikelbildanalyse (UniBw)	abgeschlossen	

Tabelle 1: Status der Projektziele

AP 7	Erweiterung der kombinierten Messmethode auf ein Fernmikroskop (UniBw)	abgeschossen
AP 8	Auslegung/Aufbau eines mobilen Teststands zur Vermessung von µDMFC (ZBT)	abgeschlossen
AP 9	Vermessung der Kennlinien der µDMFC (ZBT)	abgeschlossen
AP 10	Detailcharakterisierung der Vorgänge beim DMFC-Betrieb (ZBT)	abgeschlossen
AP 11	Implementierung in das Temperaturmesssystem und Charakterisierung der DMFC (UniBw)	abgeschlossen
AP 12	Erarbeitung einer geeigneten Heizstrategie basierend auf den Experimenten (ZBT)	abgeschlossen
AP 13	Aufbau Heizelektronik (ZBT)	abgeschlossen
AP 14	Test des Heizverfahrens an der µDMFC im Teststand (ZBT, UniBw)	abgeschlossen

1.1 <u>Arbeitspaket 1: Auslegung und Konstruktion der Si-µDMFC-Membran mit Flowfield auf der</u> <u>Anode (ZBT)</u>

Aufgrund der Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 und dem grundlegenden Entwicklungsbedarf der Si-µDMFC-Membran, wurde in diesem Arbeitspaket statt einer Si-µDMFC-Membran mit Chrom-Heizschicht, ein Indiumzinnoxid (ITO)-Heizelement für eine optisch zugängliche Mikro-DMFC aufgebaut und getestet.

Indiumzinnoxid wurde wegen der geeigneten optischen und elektrischen Eigenschaften als transparente, halbleitende Heizschicht ausgewählt. Zinnoxid erzeugt als Dotiermittel die notwendigen Störstellen im Kristallgefüge des Indiumoxids für eine gute elektrische Leitfähigkeit. Die Schnellstartphase wurde an ITO-Schichten auf Glassubstrat getestet, welche Schichtdicken von 40 nm und einen spezifischen Flächenwiderstand von < 50 Ω aufweisen. Die elektr. Kontakte wurden mit elektrisch leitfähigem Silber Polyamid EPO-TEK P-1011S (0,00017 Ω cm) realisiert. In Abb. 1 ist der Verlauf der mittleren Temperatur und der elektr. Leistung der Schicht über der Zeit aufgetragen. Die Wärmeentwicklung der ITO-Heizschicht wurde bei verschiedenen Leistungen getestet. Je höher die aufgewendete elektrische Leistung, desto schneller ist die Betriebstemperatur 80°C der Zelle erreicht und desto kürzer ist die Schnellstartphase. Bei Erreichen einer mittleren Temperatur von ca. 80°C wurde das Netzteil jeweils auf 17 W gedrosselt, so dass 80°C gehalten werden. Bei einer elektrisch aufgewendeten Leistung von 35 W wird die mittlere Tempertur von 80°C schon nach 6,8 s Schnellstartphase erreicht, bei 32 W sind es 8,4 s, bei 26 W sind es 27 s.



Abb. 1: Elektrische Leistung und Verlauf der mittl. Temperatur des ITO-Heizelements bei verschiedenen Ausgangsleistungen

Das Wärmebild (s. Abb. 2) zeigt am Ende der Schnellstartphase ein inhomogenes Temperaturprofil über die aktive Fläche der Zelle. Nach ca. 5 Minuten hat sich die Temperaturverteilung relativ homogen über die aktive Fläche ausgebildet.



Abb. 2: Wärmebild des ITO-Heizelements 8s nach Schnellstart (links) und 5 Minuten nach Schnellstart (rechts)

Zur Kontaktierung des ITO-Heizelements werden mehrere Möglichkeiten zur Realisierung des elektrischen Kontaktes getestet. Die Kontaktierung mit Silber Polymid EPO-TEK P-1011S erwies sich als nicht ausreichend mechanisch stabil. Es gab mehrfach Probleme mit abgelösten Drähten und Wackelkontakten. Es wurde außerdem leitfähiges Kupferklebeband zur Kontaktierung getestet. Hier zeigten sich zu hohe Kontaktwiderstände, so dass die Wärmeentwicklung der Heizschicht kaum messbar war. Es wurden noch zwei weitere leitfähige Epoxid-Klebstoffe (Soltabond SB 1227 und Polytec EC 244) auf ihre Eignung getestet. Beide Leitklebstoffe bieten gute Festigkeit, allerdings erwies sich der Polytec EC 244 als nicht gut zu verarbeiten. Die Tropfzeit liegt bei 15 Minuten und die Viskosität des Klebstoffs nimmt schnell zu. Aus diesem Grunde wurde der SB 1227 ausgewählt, um die Kontaktierung des Heizelements zu realisieren.

1.2 Arbeitspaket 2: Herstellung von Si-µDMFC-Membranen (ZBT)

Die im Rahmen des IGF-Projektes 17033N hergestellten Si-Membranen für Wasserstoffbetrieb mit definierten, regelmäßigen Lochstrukturen, wurden mit Methanol getestet.



Abb. 3: (oben, links) Si-Membran mit definierter regelmäßiger Lochstruktur, (oben, rechts) Skizze des Schichtenaufbaus, (unten) Leistungs-/Stromdichte der Si-Membran

Es wurden sehr geringe Leerlaufspannungen (0,28 V) und Leistungsdichten (max. 0,22mW/cm²) erzielt, s. Abb. 3, unten. Gründe hierfür sind der hohe Innenwiderstand der Zelle (geringe elektische Leitfähigkeit der Elektrodenschicht) und ein hoher "Methanol-Crossover".

Zur Erzielung akzeptabler Leistungsdichten werden eine Weiterentwicklung der Elektrodenschicht und ein neues Design der Si-µDMFC-Membran angestrebt, wobei die Lochstruktur der Membran durch eine protonen-leitende (p-dotierte) Silizium-Schicht ersetzt wird. Diese Feststoffschicht fungiert als Methanol-Sperrschicht. Durch die Vermeidung des "Methanol-Crossovers" sind signifikant höhere Leistungsdichten zu erwarten.

Aufgrund der Notwendigkeit die Lochstruktur der Membran durch eine durchgängige Protonenleitende Schicht zu ersetzen, ist die Möglichkeit eine Chrom-Heizschicht in der Halbleiterstruktur unterzubringen nicht mehr gegeben, da die Protonenleitung durch diese Schicht ebenfalls möglich sein muss (Abbildung 3 oben, rechts).

Aus diesem Grunde wurde das in diesem Projekt entwickelte Heizverfahren nicht wie ursprünglich geplant auf Basis der im Rahmen des IGF-Projektes 17033N hergestellten SiµDMFC-Membran mit Chrom-Heizschicht realisiert. Stattdessen wurde ein transparentes ITO-Heizelement entwickelt und an einer Mikro-DMFC mit metallischen Leiterplatten getestet.

Die Si-µDMFC Membranen sollten ursprünglich als Leistungen Dritter hergestellt werden. Sie wurden durch diese Änderung des Lösungswegs nicht benötigt. Die Mikro-DMFC-Testzellen mit ITO-Heizelement wurden am ZBT gefertigt und aufgebaut (s. Arbeitspaket 3).

Mikro-DMFC-Testzelle mit ITO-Heizelement wurde Parallel zum Aufbau der die Katalysatorschicht der Si-µDMFC Membranen weiterentwickelt. Zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit der Katalysatorschicht, die auch als Stromableiter dienen soll, wurden Proben mit verschiedenen Gewichtsanteilen an Carbon Nano Tubes (CNTs) hergestellt. Diese führen bei geringen Gewichtsanteilen zu einer signifikanten Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit. Elektrochemische Abscheidung von Platin auf den Schichten soll zu einer weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit der Elektrodenschicht führen. Die minimalen erzielten spezifischen elektrischen Widerstände mit 15 wt% liegen bei 0,07 Ωcm. Die Charakterisierung der Verteilung der CNTs mittels REM-Aufnahmen zeigt, dass die Schicht weiterhin die für eine Katalysatorschicht notwendige Porosität aufweist. Die CNTs sind gut verteilt und bilden keine Agglomerate. Eine Vermessung der katalytischen Aktivität mittels zyklischer Voltametrie ergab allerdings, dass die elektrochemisch aktive Oberfläche signifikant sinkt, je weiter der CNT-Gewichtsanteil steigt.



Potential [V] Abb. 4: katalytische Aktivität der Katalysatorschicht

Die Abscheidung von Platin auf den Schichten führte zu einer deutlichen Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit. So konnten spezifische elektrische Widerstände von $1,8x10^{-3}$ Ω cm erzielt werden. REM-Aufnahmen zeigen, dass das Platin jedoch hauptsächlich auf der Oberfläche der Schicht abgeschieden wurde, was zu einer deutlichen Reduzierung der Porosität führt.

1.3 Arbeitspaket 3: Aufbau einer Test-Zelle mit optischem Anodenzugang (ZBT)

Ein Foto der optisch zugänglichen Mikro-Direkt-Methanol-Brennstoffzelle und der Einzelteile wird in Abb. 5 gezeigt. Die Konstruktion der Messzelle wurde an die Anforderungen der optischen Messtechnik angepasst. Der Arbeitsabstand des Objektivs wurde berücksichtigt und die Größe des Fensters festgelegt. Beim Aufbau der Zellen wurde Glas mit ITO-Beschichtung verwendet, das im Bereich der Anregungswellenlänge des Lasers (355 nm) und im Bereich der Emissionswellenlänge des fluoreszierenden Farbstoffes (620 nm) optisch durchlässig ist. Die Messzellen verfügen über Medienanschlüsse, Stromabnehmer an den Bipolarhalbplatten, Dichtungen und elektrischen Anschlüsse für die ITO-Heizschicht in z-Konfiguration (für eine homogene Verteilung des Heizstromes über die zu heizende Fläche). Anode und Kathode sind optisch zugänglich. Die Bipolarplatte besteht aus 1.4571 Edelstahl, ist wasserstrahlgeschnitten, oberflächenbehandelt und goldbeschichtet (5,3 μm). Die Membran ist aus Nafion 115 mit 2,0 mg/cm² Anodenkatalysatorbeschichtung (70 wt% Pt/C, GDL: Sigracet 29AA) und 2,0 mg/cm² Kathodenkatalysatorbeschichtung (70 wt% Pt/C, GDL: Sigracet 29BC). Die aktive Fläche beträgt 5 cm². Es wurden insgesamt vier Zellen gefertigt.



Abb. 5: Mikro-Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (μDMFC) mit ITO-Heizelement, (oben) Einzelteile, (unten links) Draufsicht, (unten rechts) von oben

Durch den neuartigen Aufbau der Zelle mit Heizelementen und die notwendige optische Zugänglichkeit für die geplanten Untersuchungen ergaben sich Fertigungsprobleme. Es wurden drei Dichtungskonzepte geprüft, um den Aufbau mit Glassubstrat und die Medienversorgung durch Zugänge im Glas zu realisieren. Hochpräzisions-Silikonfolien (Elastosil Film, Wacker) mit

angepassten Dicken zur Dichtung der Brennstoffzellenmembran erwiesen sich als ungeeignet. Die nötigen Drehmomente zum Verspannen (0,5 Nm) führten mehrmals zum Brechen des Glassubstrats. Selbstklebende Dichtungen (Lohmann), die häufig Anwendung in Wasserstoffbrennstoffzellen finden, erfüllen die Dichtungsaufgabe schon mit kleinen Drehmomenten (0,1 Nm), allerdings ist die Langzeitstabilität nicht gegeben. Die Klebeschicht löst sich bei Betrieb der Zelle auf und scheint zudem zu Korrosionseffekten zu führen, so dass kein stabiler Zellbetrieb möglich ist. Dispenste Dichtungsbahnen mit definierter Höhe, die direkt auf die Bipolarplatte aufgebracht werden, scheinen als Dichtungsansatz bisher als am erfolgversprechendsten. Um eine optimale Anpressung der Gasdiffusionslage zu erreichen, die zwischen Bipolarplatte und Katalysator für die Elektronenleitung und bei optimaler Anpressung für einen möglichst geringen Innenwiderstand der Zelle sorgt, wird die Höhe der Dichtung optimiert, s. Abb. 6.



Abb. 6: 3D Oberflächenmesstechnik zur Bestimmung der Dichtungshöhe

1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung der Fluoreszenzmesstechnik (UniBw)

In Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden KMU Surflay Nanotec GmbH wurden neuartige Mikropartikel entwickelt, die erstmalig die simultane Messung der Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes in mikrofluidischen Systemen ermöglichen. Dazu wurden zunächst Polymer verschiedene Kombinationen aus und Farbstoff auf ihre Eianuna als temperatursensitive Tracer untersucht. Als polymere wurden Polystyrol (PS), Melaminharz (MF), Polymethymehtracylat (PMMA) und Silica untersucht. Die getesteten Farbstoffe waren Rhodamin B, Fluorescein, Hydroxypyrene trisulfonic acid, Perylen und Europium (III) thenoyltrifluoroacetonate (EuTTa). Dabei erwies sich die Kombination aus PMMA mit EuTTa und Perylen als am besten geeignet. Die Signalintensität und die Abklingzeit von EuTTa ist stark temperatursensitiv, während Perylen eine vernachlässigbare Temperatursensitivität aufweist und somit als Intensitätsmonitor verwendet werden kann (s. Abb. 7). Dabei sind die Emissionsspektren der beiden Farbstoffe weit voneinander entfernt und lassen sich einfach mit der im Projekt beschafften PCO Edge 5.5 Kamera (2D FlowMaster sCMOS Kamera-System) getrennt abbilden (s. Abb. 7). Die Temperatur wird aus dem Verhältnis der Signalintensitäten der EuTTa- und der Perylenemission bestimmt. Dies ermöglicht erstmals eine Temperaturmessung in Mikrokanälen mit nur einer Kamera. Um eine sehr genaue Messung zu ermöglichen, wurden verschiedene Konzentrationsverhältnisse von EuTTa und Perylen getestet und hinsichtlich einer hohen Signalintensität beider Farbstoffe und einer hohen Temperatursensitivität optimiert.

Darüber hinaus wurde ein weiterer Ansatz zur Temperaturmessung basierend auf der temperaturabhängigen Phosphoreszenzlebensdauer von EuTTa entwickelt (s. 7c). Mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera werden dabei zwei Bilder innerhalb der Abklingzeit der EuTTa

Emission aufgenommen. Aus dem Verhältnis der Intensitäten in beiden Bildern kann die Temperatur berechnet werden. Da die Abklingzeit eine intrinsische Eigenschaft des phosphoreszenten Moleküls ist, wird dieser Ansatz im Gegensatz zur intensitätsbasierten Messmethode nicht von der Anregungsintensität, optischen Aberrationen oder von Photobleaching beeinflusst. Somit ist er sehr viel robuster gegenüber Variationen im experimentellen Aufbau und damit für den industriellen Einsatz besser geeignet.



Abb. 7: (a) Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum von Perylen/EuTTa partikeln und Quanteneffizienz der Farbkanäle der PCO Edge 5.5 Kamera. (b) Intensitätsverhältnis der EuTTa und Perylen Emision in Abhängigkeit von der Temperatur. (c) Phosphroeszenzlebensdauer der EuTTa Emission in Abhängigkeit von der Temperatur.

1.5 Arbeitspaket 5: Aufbau Kalibrierkammer und Qualifizierung Messtechnik (UniBw)

Zur Kalibrierung der Temperaturmessung wurde ein Messaufbau entwickelt, mit dem ein Tropfen der Partikellösung mit einem Peltierelement auf eine konstante Temperatur geregelt werden kann (s. Abb. 8). Der Aufbau ermöglicht die Regelung der Temperatur im Tropfen auf Temperaturen von unterhalb Raumtemperatur bis über 100 °C mit einer Genauigkeit von ±0.1 K. Somit kann eine Temperaturkalibration für verschiedenste Temperaturbereiche durchgeführt werden. Darüber hinaus ist eine Kalibration für verschiedene Fluide (z.B. Wasser, Wasser/Methanol Gemisch) möglich.



Abb. 8: Schematische Abbildung des Aufbaus zur ex situ Kalibration der Temperaturmesstechnik.

Zur Qualifizierung der Messtechnik wurde ein gerader temperierter Mikrokanal konstruiert und gefertigt (s. Abb. 9). Der Querschnitt des Kanals beträgt 2 × 2 mm². Der Kupferblock wird mit warmem Fluid aus einem thermostatischen Bad auf die gewünschte Temperatur gebracht. Zur Überprüfung der Wandtemperatur während der Messung sind an mehreren Positionen im Block Pt100 Widerstandsthermometer eingebracht. Die Messtechnik wurde mit der astigmatismus particle tracking velocimetry (APTV) Methode kombiniert und so zu einer volumetrischen Temperatur- und Geschwindigkeitsmesstechnik erweitert. Um die Messmethode experimentell zu qualifizieren wurde der Kupferblock auf eine Temperatur von 50 °C erhitzt und mit Partikeln versetztes Wasser mit einer Temperatur von 20 °C durch den Mikrokanal geströmt. Zur Qualifizierung der intensitätsbasierten Messtechnik wurde die Fluoreszenz durch eine UV-LED angeregt und über ein Zeiss Axio Observer Z1 Mikroskop mittels der beschafften sCMOS Farbkamera aufgenommen. Für die abklingzeitbasierte Messmethode wurde die Fluoreszenz mit einem UV-Laser (Wellenlänge 355 nm) angeregt und mittels einer PCO Dimax HS4 Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Zum Vergleich wurden numerische Simulationen in Fluent durchgeführt.



Abb. 9: (links) Schema und (rechts) Foto des untersuchten Mikrokanals.

Seite 12 des Abschlussberichts zu IGF-Vorhaben 18941 N



Abb. 10: Vergleich des numerisch und experimentell ermittelten Temperaturfeldes im Kupferkanal (links) intensitätsbasiertes Verfahren und (rechts) abklingzeitbasiertes Verfahren.

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich zwischen dem numerisch und experimentell ermittelten Temperaturfeld im Kupferkanal. Für beide Messmethoden ist eine hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und Numerik zu erkennen. Die Messunsicherheit für die intensitätsbasierte Methode liegt bei ±1.1 °C, während die Messunsicherheit mittels dem abklingzeitbasierten Verfahren auf ±0.4 °C reduziert werden konnte. Damit stehen mit dem intensitätsbasierten Verfahren eine einfache und genaue Messtechnik zur volumetrischen Temperaturmessung in Mikrokanälen zur Verfügung, während Anwender bei denen eine sehr hohe Genauigkeit benötigt wird auf die abklingzeitbasierte Messtechnik zurückgreifen können. Beide Messtechniken ermöglichen simultan zur Temperaturmessung eine hochgenaue Messung des dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes in Mikrokanälen, wie in Abbildung 11 deutlich zu sehen ist.



(a)

Abb. 11: Vergleich des numerisch und experimentell ermittelten Geschwindigkeitsfeldes im Kupferkanal (a) intensitätsbasiertes Verfahren und (b) abklingzeitbasiertes Verfahren.

Auswerte-/Kalibrieralgorithmus 1.6 Arbeitspaket 6: zur Temperaturkalibrierung & Partikelbildanalvse (UniBw)

Es wurden verschiedene Algorithmen zur Intensitätsauswertung einzelner Partikelbilder entwickelt und anhand von synthetischen Partikelbildern untersucht. Dabei war vor allem der Einfluss des Signal-zu-Rauschverhältnis und des Partikelbilddurchmessers auf die

Messunsicherheit von Interesse. Synthetische Partikelbilder bieten den Vorteil, dass einzelne Parameter gezielt und unabhängig gesteuert und untersucht werden können, über den möglichen Parameterraum eines tatsächlichen Experimentes hinaus. Die Ergebnisse wurden experimentell validiert. Darüber hinaus wurde der Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsquellen (LED oder Laser) auf die Messunsicherheit des intensitätsbasierten Verfahrens untersucht. Beim Vergleich verschiedener Algorithmen zeigte sich, dass eine Intensitätsauswertung auf Grundlage eines Gaussfits der Intensitätsverteilung einzelner Partikelbilder die geringste Messunsicherheit aller untersuchten Methoden bietet. Die Standardabweichung ist stark vom Partikelbilddurchmesser, sowie vom SNR abhängig. Insbesondere für SNRs < 10 steigt die Messunsicherheit exponentiell an, weshalb dieser Bereich im Experiment vermieden werden sollte (vgl. Abb. 12). Der Vergleich zwischen Laser und LED Beleuchtung zeigt eine geringere Messunsicherheit bei der LED, da diese Lichtquelle nur minimale zeitliche Schwankung aufweist.



Abb. 12: Messunsicherheit in Abhängigkeit vom SNR.

1.7 Arbeitspaket 7: Erweiterung der kombinierten Messmethode auf Fernmikroskop (UniBw)

Das abklingzeitbasierte Messverfahren wurde auf ein Fernmikroskop erweitert. Zunächst wurde das an der FS 2 vorhandene Fernmikroskop getestet. Damit konnten allerdings nur eine relativ hohe Messunsicherheit von ca. 8 °C erreicht werden, da das Signal zu Rauschverhältnis sehr niedrig war. Aus diesem Grund wurde ein Aufbau entwickelt, mit dem ein Mikroskopobjektiv vor eine Highspeed-Kamera platziert werden konnte. Dies ermöglicht es, Experimente außerhalb des Mikroskops mit einem relativ hohen Arbeitsabstand durchzuführen. Mit dem entwickelten experimentellen Aufbau wurde das Geschwindigkeits- und Strömungsfeld an der Grenzfläche einer Wasserstoffblase bei der Wasserstoffelektrolyse an einer Mikroelektrode vermessen. Das Messfeld und der Arbeitsabstand wurden dabei so gewählt, dass diese den zu erwartenden Randbedingungen der DMFC entsprechen. Das Ziel des Experimentes war neben der den Einfluss des Temperaturgradienten Qualifizierung der Messtechnik, der an Wasserstoffblase auf die bei der Elektrolyse entstehende Marangoniströmung zu klären und somit das Verständnis dieses bisher wenig erforschten Phänomens zu vertiefen.



Abb. 13: a) Temperaturfeld in Blasennähe und b) Geschwindigkeitsfeld in Blasennähe. Die Blasenkontur ist in Grau dargestellt.

Mit dem entwickelten System konnte eine Temperaturunsicherheit von weniger als 1 °C erreicht werden. Dadurch konnte simultan das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld an der Grenzfläche eine Wasserstoffblase bei der Wasserstoffelektrolyse an einer Mikroelektrode bestimmt werden. Beim untersuchten Fall ergaben sich eine Temperaturerhöhung von ca. 5 °C und eine starke Marangoniströmung entlang der Blase (s. Abb. 13). Die gemessenen Geschwindigkeiten entsprechen guantitativ der zu erwartenden Marangoniströmung bei dieser Temperaturerhöhung. signifikanter Somit konnte erstmalig ein Einfluss des Temperaturgradientens auf die Marangoniströmung bei der Wasserstoffelektrolyse gezeigt werden.

1.8 <u>Arbeitspaket 8: Auslegung / Aufbau eines mobilen Teststands zur Vermessung von</u> <u>µDMFC (ZBT)</u>

Ein mobiler Teststand, basierend auf dem Teststand in Abbildung 14, wurde entwickelt und aufgebaut. Die benötigten Einzelkomponenten wurden ausgewählt und beschafft. Die Heizelektronik zur Ansteuerung der Heizelemente (s. AP 13) wurde aufgebaut, angepasst und anschließend in den Teststand implementiert. Eine LabView-Steuerung wurde für die speziellen Anforderungen programmiert. Der fertige Teststand wurde an Forschungsstelle 2 aufgebaut und es wurden Messungen (s. Arbeitspaket 11 und 14) durchgeführt.

1.9 Arbeitspaket 9: Vermessung der Kennlinien der µDMFC (ZBT)

Die vier aufgebauten Zellen wurden nacheinander in den Teststand eingebaut und eingefahren und unter verschiedenen Betriebsbedingungen charakterisiert. Um eine konstante Betriebstemperatur sicherzustellen, wurde die Beheizung zunächst durch Heißluftzufuhr in einer Kammer (s. Abb. 14) geregelt.



Abb. 14: Teststand zum Einfahren und zur Charakterisierung der µDMFC (links), Vergrößerung der Zelle in beheizbarer Kammer (rechts)

Die höchste Leistungsdichte wurde für niedrige Methanol-Wasser-Massenströme (20g/h) erreicht, s. Abb. 15. Ein Grund ist der bei größeren Massenströmen zu erwartende zunehmende Methanolcrossover, der in Einbußen der Zellleistung resultiert. Außerdem wurde das 1 molare Methanol-Wassergemisch nicht vorgeheizt, das heißt, es hat bei Eintritt in die Zelle Zimmertemperatur und wird beim Durchlaufen auf Zelltemperatur aufgeheizt. Dies führt besonders für große Massenströme zu einer Reduzierung der Betriebstemperatur zumindest auf Teilen der aktiven Fläche der Membran und somit zu einer Einschränkung der Zellaktivität. Die Nennleistungen der Zellen sind bedingt durch die Optimierung der Zellkonstruktion auf optische Zugänglichkeit sehr niedrig, sie betragen maximal 140 mW (28 mW/cm²).



Abb. 15: Polarisations- und Leistungsdichtekurven

1.10 Arbeitspaket 10: Detailcharakterisierung der Vorgänge beim DMFC-Betrieb (ZBT)

Die Entstehung von CO₂-Blasen wird über eine Kamera und den optischen Zugang auf der Anode visualisiert. In Abbildung 16 ist eine Momentaufnahme der Zweiphasenströmung im Anodenkanal zu sehen. Die Pfeile geben die Strömungsrichtung des 1 molaren Methanol-Wassergemisches an. Über die ganze aktive Fläche entstehen CO₂-Gasblasen am Boden des Kanals. Am Kanaleingang liegt noch reine Blasenströmung vor. Über die Lauflänge des Kanals koagulieren die Gasblasen zu "Gas-Slugs" und werden mit der Medienströmung ausgetragen. Der Einfluss festsitzender Gasblasen auf die Kühlwirkung der Anodenströmung wird als sehr die Gasblasen relativ schnell mit der klein eingeschätzt. da Medienströmung (Strömungsgeschwindigkeit etwa 6 mm/s) ausgetragen werden und keine festsitzende Blasen beobachtet werden können. Die Umströmung der Blasen wird mittels zeitaufgelöster Strömungsmessungen analysiert, s. hierzu Arbeitspaket 11. Aufgrund der geringen Leistungsdichten konnte kathodenseitig kein Produktwasser beobachtet werden.



Abb. 16: Foto des Anodenflowfields während des Zellbetriebs am optimalen Betriebspunkt, die Pfeile geben die Flussrichtung der Medienströmung an

1.11 <u>Arbeitspaket 11: Implementierung in das Temperaturmesssystem und Charakterisierung</u> <u>der DMFC (UniBw)</u>

Die an FS 1 entwickelte DMFC wurde mit Hilfe des mobilen Versuchsstands aus Arbeitspaket 8 in das an der FS 2 aufgebaute Messsystem integriert. Das Strömungsfeld und das Temperaturfeld der DMFC wurden mittels des abklingzeitbasierten Messverfahrens charakterisiert. Ohne Zellbetrieb bildet sich im Flowfield der Anode eine poiseuilleartige Strömung aus (s. Abb. 17).



Abb. 17: Mittleres Geschwindigkeitsfeld im Flowfield der DMFC ohne Zellbetrieb.

Durch die CO₂ Blasen, die sich beim Zellbetrieb ausbilden, wird das Strömungsfeld jedoch signifikant gestört und es entsteht eine stark dreidimensionale Strömung (s. Abb. 18). Da die Blasen kurz nach dem Entstehen von der Methanol/Wasser Strömung wieder abtransportiert werden, woraufhin neue Blasen entstehen, ist das Strömungsfeld hoch instationär und der konvektive Wärmetransport mit sehr kleinen Zeitskalen in der Größenordnung von wenigen Millisekunden verbunden. Zur detaillierten Analyse des instationären Wärmeübergangs wäre somit eine sehr hohe Zeitliche Auflösung der Temperaturmesstechnik nötig, die mit dem vorhandenen Laser aufgrund der maximalen Pulsrate von 10 Hz jedoch nicht gewährleistet werden konnte. Die mittlere Aufheizung der DMFC ist jedoch mit Zeitskalen von mehreren Sekunden verbunden, welche mittels der Messtechnik aufgelöst werden können. Somit kann die Heizstrategie detailliert untersucht werden.



Abb. 18: Strömungsfeld im Anodenkanal der DMFC stromab eines Kanalfüllenden Slugs mit einer anschließenden Blase.

In Abbildung 19 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur am Flowfield Einlass, in der Flowfield Mitte und am Flowfield Auslass in der Nähe der Membran dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine sehr schnelle Aufheizung der Zelle nach Einschalten der Heizung mit einer Leistung von 32 W auf bis zu 80 °C innerhalb von 25 s realisiert werden konnte. Nach etwa 100 s hat sich eine konstante Temperatur in der Zelle eingestellt, die näherungsweise der Betriebstemperatur der Zelle entspricht. Darüber hinaus ist die simultan gemessen Zellleistung dargestellt. Bereits nach 180 s konnte eine Leistung von 79 mW erreicht werden.



Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der Temperatur in der DMFC am Flowfield Einlass, Mitte und Auslass.

1.12 <u>Arbeitspaket 12: Erarbeitung einer geeigneten Heizstrategie basierend auf den</u> <u>Experimenten (ZBT)</u>

Nach der Charakterisierung der Zellen (s. AP 9) wurde das Schnellstartverhalten der Zellen an FS 1 durch Beheizung mit dem entwickelten ITO-Heizelement getestet und mit der Beheizung in einer Kammer mit Heißluft verglichen.

Abbildung 20 zeigt den zeitlichen Ablauf der Vorgänge. Die beiden Test: Schnellstart mit ITO-Heizelement und Beheizung mit Heißluft wurden mit zeitlicher Verzögerung getrennt voneinander getestet, aber in einem Diagramm dargestellt. Die Heizungen wurden jeweils zeitgleich zum Einschalten der Brennstoffzelle gestartet. Im Falle der Beheizung mit Heißluft steigt die Betriebstemperatur der Zelle (gemessen durch PT100 auf der Kathodenoberfläche) und die Zellleistung langsam an. Die maximale Zellleistung ist erst nach 750s erreicht.

Das ITO-Heizelement heizt für den Schnellstart zunächst mit 37 W, wird nach wenigen Sekunden auf 8 W runtergeregelt, um die Zelle auf Betriebstemperatur zu halten. In Abbildung 20 ist der sprunghafte Anstieg der Betriebstemperatur zu sehen. Die Zellleistung wird innerhalb von wenigen Sekunden auf das Maximum hochgeregelt. 92 % der Maximalleistung der Zelle sind innerhalb von 19s Sekunden verfügbar. Somit konnte die Schnellstartfähigkeit der DMFC mit der verwendeten Heizstrategie demonstriert werden. Beschleunigen lässt sich die Aufheizphase noch durch einen Stopp der Medienversorgung, vor dem Einschaltmoment der Zelle, um die Kühlwirkung der Medienströme auszuschließen.

Die Heizleistung ist in den ersten Sekunden nach Start des Heizelements nur inhomogen verteilt, siehe hierzu Abbildung 2. Eine homogene Verteilung der Heizleistung über die gesamte aktive Fläche ist mit dem ITO-Heizelement erst nach 5 Minuten gegeben. Die mit der Temperaturmesstechnik (FS 2) im Kanal nahe der Membran aufgenommen Temperaturwerte bestätigen die inhomogene Aufheizung der aktiven Fläche. Das Heizelement lässt sich durch eine optimierte Stromführung verbessern. Dies ließe sich zum Beispiel durch Kontaktierung mit mehreren Kontakten statt der angewandten z-Konfiguration realisieren. Dies würde eine schnellere homogene Verteilung der Heizleistung über die aktive Fläche erzielen.



Abb. 20: Leistungs- /Temperaturentwicklung Vergleich: Schnellstart mit Heizelement / Beheizung mit Heißluft bei 20 g/h (1M) Anodenmassenstrom, (oben) Zeitspanne 2.500 s, (unten)Vergrößerung der ersten 500 s

1.13 Arbeitspaket 13: Aufbau Heizelektronik (ZBT)

Eine mobile Heizelektronik wurde aufgebaut, die die Spannungsversorgung der Heizelemente auf Kathode und Anode bereitstellt und zeitgleich regelt, so dass die Betriebstemperatur der µDMFC innerhalb von wenigen Sekunden erreicht wird und anschließend möglichst konstant gehalten wird. So wird außerdem sichergestellt, dass 85°C Zelltemperatur nicht überschritten werden. Die Heizleistung wird anhand des Innenwiderstands der fertiggestellten Zellen eingestellt und die Temperatur kalibriert und in den Teststand implementiert, s. AP 8.

1.14 Arbeitspaket 14: Test des Heizverfahrens an der Si-µDMFC im Teststand (ZBT, UniBw)

Um eine geeignete Strategie zur Steigerung der Effizienz des Heizsystems zu finden wurde zunächst der Einfluss der konvektiven Kühlung durch die relativ kalte Anoden- und Kathodenströmung auf die Zelltemperatur untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen sehr großen Einfluss der Anodenströmung, während der Effekt der Kathodenströmung vernachlässigbar ist (s. Abb. 21).



Abb. 21: Zeitliche Temperaturverläufe in der Mitte des Anoden Flowfields in der Nähe der Membran für verschieden Volumenströme auf der (a) Anodenseite und (b) Kathodenseite.

Darüber hinaus wurde eine Heizstrategie getestet, bei der eine geringere Heizleistung von nur 8 W verwendet wurde. In Abbildung 22. ist zu erkennen, dass mit der geringeren Leistung die gleiche Temperatur wie bei einer Heizleistung von 37 W mit einer Verzögerung von lediglich 50 s erreicht werden konnte. Mit einer ähnlichen Verzögerung konnte auch die gleiche Zellleistung erreicht werden. Indem der Volumenstrom auf der Anodenseite auf 5 g/h verringert wurde, konnte die Verzögerung weiter reduziert werden ohne die Zellleistung signifikant zu verringern. Somit ist es möglich eine Heizstrategie mit einer geringeren Heizleistung zu verfolgen, bei der in der Startphase der Volumenstrom auf der Anodenseite zunächst reduziert wird und nach dem Schnellstart wieder auf den nominellen Volumenstrom erhöht wird. Damit lässt sich ein Schnellstart mit einem geringeren Energiebedarf des Heizsystems gewährleisten.



Abb. 22: Vergleich der zeitlichen Verläufe der Temperatur und Zelleistung bei einer Heizleistung von 32 W und 8W bei unterschiedlichen Anodenvolumenströmen.

2. Verwendung der Zuwendung

Die konkrete Angabe der Personenmonate, Nutzung von Geräten bzw. Leistungen Dritter erfolgt wie nachfolgend dargestellt nach dem Finanzierungsplan.

2.1 <u>Personalausgaben (Einzelansatz A des Finanzierungsplans):</u>

- Forschungsstelle 1 (ZBT): Für die Arbeiten im Rahmen des Projekts wurden im Berichtszeitraum von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (HPA-A) insgesamt 25,61 PM, von einem technischen Mitarbeiter (HPA-C) 6 PM und von einer studentischen Hilfskraft (HPA-F) 8,1 PM aufgewendet.
- Für Forschungsstelle 2 (UniBw): Für die Arbeiten im Rahmen des Projektes wurden im Berichtszeitraum von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (HPA-A) insgesamt 30 PM aufgewendet.
- 2.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):
 - Im Rahmen des Projektes wurde von Forschungsstelle 2 (UniBw) ein 2D FlowMaster sCMOS Kamera-System f
 ür einen Betrag von 47.040,70 € angeschafft.
- 2.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):
 - Es wurden keine Projektmittel f
 ür Leistungen Dritter aufgewendet. Die beantragten Mittel (17.100 € f
 ür Silizium-Tr
 ägerstrukturen) wurden durch die Änderung des L
 ösungswegs im Projektverlauf nicht ben
 ötigt und die Realisierung der Testzellen durch kosteng
 ünstige Eigenherstellung realisiert.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten der Forschungsstellen entsprechen innerhalb des Zeitraums dieser Berichterstattung den Plänen des Forschungsantrags und waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig. Wegen der Einbindung der Projektbearbeiter in andere, noch laufende Fördervorhaben konnte mit den Arbeiten des Projektes der Forschungsstelle 1 "Zentrum für Brennstoffzellentechnik" nur mit Verzögerung begonnen werden. In Abstimmung mit der zweiten Forschungsstelle "Universität der Bundeswehr München" wurde daher eine kostenneutrale Verlängerung um drei Monate beantragt. Die Projektlaufzeit hat sich aus diesem Grund bis zum 30.09.2018 verlängert.

4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Der wissenschaftlich-technische Nutzen der erzielten und zuvor vorgestellten Forschungsergebnisse besteht zum einen in der Auslegung und Demonstration des Schnellstartkonzepts und zum anderen in der Entwicklung der Messtechnik zur simultanen volumetrischen Bestimmung des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes in mikrofluidischen Kanälen.

Das Schnellstartkonzept ermöglicht die Aufheizung von Mikro-DMFC auf Starttemperatur in wenigen Sekunden. Dadurch erschließen sich für die Brennstoffzellentechnologie neue Anwendungsbereiche. Kürzere Startphasen machen Mikro-DMFCs attraktiver für die Anwendung als portable Energieversorgung.

Am Beispiel einer Mikro-Direkt-Methanol-Brennstoff-Einzelzellers mit metallischen Bipolarplatten und optischem Zugang wird die Funktionalität des neuen Konzepts demonstriert.

Die Übertragung der Entwicklung auf leistungsoptimierte oder größere Stacks sowie andere Brennstoffzellentypen ist möglich.

Die Ergebnisse liefern die Grundlage für weitere aufbauende Projekte und bilden die Basis für ein portables Energieversorgungssystem. Die im Projektverlauf gefertigten Bauteile dienen als Funktionsmuster, mit denen die Entwicklung und die Markteinführung zukünftiger Produkte abgeschätzt und beschleunigt werden kann. Die Beschleunigung der Schnellstartphase stärkt die Brennstoffzelle im Wettbewerb mit konkurrierenden Technologien und erschließt neue Anwendungsfelder.

Die neu entwickelte Messtechnik zur simultanen volumetrischen Bestimmung des Temperaturermöglicht Geschwindigkeitsfeldes hochgenaue simultane Temperaturund und Geschwindigkeitsmessungen in verschiedensten mikrofluidischen Anwendungen. Am Beispiel eines geraden Kupferkanals wurde die Messtechnik qualifiziert und die hohe räumliche Auflösung und Genauigkeit demonstriert. Mit Hilfe der neu entwickelten Messtechnik können zukünftig verschiedene industrielle und wissenschaftliche Fragestellungen untersucht werden, die bisher experimentell nicht zugänglich waren. Bisher in der Mikrofluidik verwendete Wärmeübertragungsmodelle können mittels der experimentell gewonnen Daten validiert und weiterentwickelt werden. Das somit verbesserte Verständnis der Wärmeübertragung in mikrofluidischen Kanälen ermöglicht die Entwicklung effizienterer, kostengünstigerer und sichererer Produkte.

Von den erzielten Ergebnissen profitieren besonders KMU aus den Bereichen Elektrochemie, Chemie, Erneuerbare Energien, Portable Systeme, Verfahrenstechnik, Partikelsynthese, Biotechnologie, Medizintechnik, Lab-on-a-chip Systeme, Messtechnik und Wärmeübertragung.

5. Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH Carl-Benz-Str. 201 47057 Duisburg		
	Leiter:	Prof. Dr. A. Heinzel	
	Projektleiterin:	Nadine van der Schoot	
Forschungsstelle 2:	Universität der Br Werner-Heisenbe 85577 Neubiberg	Universität der Bundeswehr München Werner-Heisenberg-Weg 39 85577 Neubiberg	
	Leiter: Projektleiterin:	Prof. Dr. C. J. Kähler Prof. Dr. C. J. Kähler	

6. Förderhinweis und Danksagung

Das in diesem Schlussbericht geschilderte Forschungsvorhaben Nr. 18941N der Forschungsvereinigung IUTA wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert. Ein besonderer Dank gilt den Firmen, die dem Projekt unterstützend zur Seite gestanden haben: LaVision GmbH, AVL Deutschland GmbH, Gramm Technik und Surflay Nanotec GmbH.

7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

7.1 <u>Durchgeführte Transfermaßnahmen</u>

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik	jährl. Fachtagung der deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie	Sep. 2016 & Sep. 2017
wissenschaftliche Publikation	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Fachveröffentlichung in Zusammenarbeit mit Dennis Kaden (Surflay Nanotec GmbH) in: Meas. Sci. Technol.	Sept. 2016
Workshop "AiF- Brennstoffzellen- Allianz"	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen (bes. kmU) zum Projekt	Poster und Vorträge zu den laufenden Projektarbeiten	Mai 2016, Juni 2017, Juni 2018
Hannover-Messe	Info eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Informationsmaterial zum Projekt auf dem Messestand des ZBT	April 2016, 2017, 2018
Akademische Lehrveranstaltungen	Information von Studierenden zur Brennstoffzellentechnik vor Ihrem Eintritt ins Berufsleben	Akademische Lehre: Prof. Heinzel, Univ. Duisburg-Essen, Prof. Kähler, UniBw München	fortlaufend, ab SS 2016
Veröffentlichung von Projektinformationen	Informationen der Öffentlichkeit	Internetseiten und Jahresberichte der Forschungsvereinigung und der FS	fortlaufend
Innovationstag Mittelstand (BMWi, AiF)	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen zum Projekt (bes. kmU)	Poster bzw. Informationsmaterial zu den laufenden Projektarbeiten	Juli 2016, Mai 2017, 2018
Information und Beratung interessierter Unternehmen, Entwicklung von Folgeprojekten	Direkter Know-How-Transfer zu Unternehmen, vornehmlich kmU; Information zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Gezieltes Ansprechen und Information von interessierten Unternehmen außerhalb und innerhalb des PA, Nutzung des ZIM-Kooperations- netzwerk ("BisNet: Brennstoffzelle in Serie")	fortlaufend
Veröffentlichung von Projektinformationen	Informationen der Öffentlichkeit	Tag der offenen Tür an der TU Ilmenau	April 2017, April 2018
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	Workshop am Helmholtzzentrum Dresden Rossendorf ECMAG	April 2017
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics	Juni 2017
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	German Japanese Joint Seminar	Sept. 2017
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Kontinuierliche Diskussion von Ausrichtung, Stand der Arbeiten und Detailergebnissen durch die Mitglieder des PA	Vorstellung des Projektes und der Ziele; Diskussion der geplanten Arbeiten und Ergebnisse, Festlegung des weiteren Vorgehens	Sept. 2017
wissenschaftliche Publikation	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Fachveröffentlichung in: tm - Technisches Messen.	Okt. 2017
wissenschaftliche Vorträge	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Wissenschaftliches Symposium 25 Jahre Forschung im HZDR, Dresden	Okt. 2017
wissenschaftliche Vorträge	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	VDI-Arbeitskreis Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb, Ilmenau	Jan. 2018
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	9th Workshop of Chemical and Biological Micro Laboratory Technology	Feb. 2018
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Optik und Messtechnik	jährl. Fachtagung der deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie	Sept. 2018

7.2 Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum
Workshop "AiF- Brennstoffzellen- Allianz"	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen (bes. kmU) zum Projekt	Poster und Vorträge zu den laufenden Projektarbeiten	Juni 2019
Hannover-Messe	Info eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Informationsmaterial zum Projekt auf dem Messestand des ZBT	April 2019
Akademische Lehrveranstaltungen	Information von Studierenden zur Brennstoffzellentechnik vor Ihrem Eintritt ins Berufsleben	Akademische Lehre: Prof. Heinzel, Univ. Duisburg-Essen, Prof. Kähler, UniBw München	fortlaufend
Veröffentlichung von Projektinformationen	Informationen der Öffentlichkeit	Internetseiten und Jahresberichte der Forschungsvereinigung und der FS	fortlaufend
Innovationstag Mittelstand (BMWi, AiF)	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen zum Projekt (bes. kmU)	Poster bzw. Informationsmaterial zu den laufenden Projektarbeiten	Juli 2019
Information und Beratung interessierter Unternehmen, Entwicklung von Folgeprojekten	Direkter Know-How-Transfer zu Unternehmen, vornehmlich kmU; Information zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Gezieltes Ansprechen und Information von interessierten Unternehmen außerhalb und innerhalb des PA, Nutzung des ZIM-Kooperations- netzwerk ("BisNet: Brennstoffzelle in Serie")	fortlaufend
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	13 th International Symposium on Particle Image Velocimetry	Juli 2019
wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	jährl. Fachtagung der deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie	Sept. 2019
wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Fachveröffentlichungen zum Projekt: in Journal of Power Sources,	2019
wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Dissertation Julian Massing	2019

7.3 <u>Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts</u>

Die in der obigen Tabelle aufgeführten Maßnahmen dienen der Verbreitung der Ergebnisse sowohl in wissenschaftlichen Bereichen als auch innerhalb der Wirtschaft. Dies geschah während der Projektlaufzeit vor allem über die Veröffentlichung der Ergebnisse auf verschiedenen Workshops und Tagungen. Die Vorträge der Ergebnisse bei den oben aufgeführten Veranstaltungen sowie Einbindung der Ergebnisse in den Tagungsbänden der besuchten Veranstaltungen trägt dazu bei, die erzielten Erkenntnisse einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen. Es sind ebenso weitere Publikationen und Präsentationen der aktuellen Ergebnisse im Anschluss an das Projekt geplant (siehe Kapitel 7.2). Der Schlussbericht des Projektes wird auf der Plattform der Forschungsvereinigung IUTA öffentlich zugänglich gemacht.