

**„Untersuchungen zur Entwicklung eines Mikrobrennstoffzellensystems  
basierend auf der Dampfreformierung von Methanol und einer HT-PEM  
Brennstoffzelle“**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

**Daniel Wichmann**

aus Köln

**Berichter:** Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Heinrich Köhne  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Februar 2010



Berichte aus der Verbrennungstechnik

Band 30

**Daniel Wichmann**

**Untersuchungen zur Entwicklung eines  
Mikrobrennstoffzellensystems basierend  
auf der Dampfreformierung von Methanol  
und einer HT-PEM Brennstoffzelle**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2010)

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9059-7

ISSN 1430-9629

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Projektingenieur am Oel-Waerme-Institut (OWI) im Rahmen der Bearbeitung des Verbundprojektes MIMEMIZ, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und dem Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Köhne für die Förderung und Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer und Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer danke ich für die Übernahme der Korreferate und das Interesse an dieser Arbeit.

Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Klaus Lucka danke ich für seine Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit und die motivierenden und fördernden Gespräche, die oft über das Fachliche hinausgingen.

Ich bedanke mich bei meinen Kollegen am OWI, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich meinen Eltern für ihre jahrelange Förderung und Unterstützung aussprechen. Meiner Frau danke ich sehr für ihre Unterstützung und ihr Verständnis.

Aachen, September 2009

Daniel Wichmann



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Brenngaserzeugung aus Methanol für Brennstoffzellensysteme</b>	<b>5</b>
2.1	Methanol als Energieträger für portable und kleine mobile Brennstoffzellensysteme	5
2.2	Verfahrenstechnische Grundlagen der Brenngaserzeugung aus Methanol	8
2.2.1	Dampfreformierung von Methanol	9
2.2.2	Partielle Oxidation von Methanol	16
2.2.3	Autotherme Reformierung von Methanol	17
2.3	CO-Gasreinigungsverfahren	19
2.4	Restgasverbrennung	20
2.5	Reaktorkonzepte für die Reformierung von Methanol	21
2.6	Zusammenfassung der Reformierungsverfahren, Reaktorkonzepte und anwendungsnahen Mikrokanalreaktoren	32
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Stand der Brennstoffzellen</b>	<b>33</b>
3.1	Funktionsprinzip, Komponenten von Brennstoffzellen und thermodynamische Grundlagen	33
3.2	Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Brennstoffzelle	38
3.3	Brennstoffzellentypen	41
3.4	Brennstoffzellen des Typs PEM und HT-PEM	44
3.5	Die Bedeutung der Bipolarplatte als Brennstoffzellenkomponente	46
3.6	DMFC-basierte Brennstoffzellensysteme	48
3.7	PEM-basierte Brennstoffzellensysteme	50
3.8	HT-PEM-basierte Brennstoffzellensysteme	52

<b>4</b>	<b>Konzeption eines Mikrobrennstoffzellensystems mit einer Brennstoffzelle des Typs HT-PEM und einer Dampfreformierung von Methanol</b>	<b>54</b>
4.1	Zielsetzung für die Entwicklung des Brennstoffzellensystems und Schwerpunkte bei der Untersuchung der technischen Machbarkeit	54
4.2	Thermodynamische Bilanzierung und Systemauslegung	57
4.3	Konzeption der Wärmeübertragergeometrie und strömungstechnische Charakterisierung	66
4.4	Konzept zur Integration des Brenngaserzeugers in ein Bauteil	69
4.5	Konzept der Mikrobrennstoffzelle	71
<b>5</b>	<b>Versuchsapparaturen und Versuchsdurchführung</b>	<b>74</b>
5.1	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Dampfreformierung von Methanol	74
5.2	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Mikrobrennstoffzelle	76
5.3	Messtechnik	78
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zur Dampfreformierung von Methanol in einem strukturierten beschichteten Wärmeübertrager</b>	<b>81</b>
6.1	Katalysatoruntersuchungen	81
6.1.1	Reformerauslegung und Versuchsplan	81
6.1.2	Kupferbasierter Katalysator (Katalysator A)	87
6.1.3	Edelmetallbasierter Katalysator (Katalysator B)	91
6.2	Integration einer Shift-Stufe zur CO-Reinigung in die Brenngaserzeugung	101
6.3	Bestimmung von Betriebspunkten des Reformers für die Kopplung mit einer HT-PEM Brennstoffzelle	104
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zur Entwicklung der Mikrobrennstoffzelle</b>	<b>111</b>
7.1	Verifikation des Brennstoffzellenkonzeptes an einer Einzelzelle	111
7.2	Untersuchungen an einem Brennstoffzellenstapel mit 20 Zellen	115
7.3	Untersuchungen zur Korrosionsstabilität von metallischen Bipolarplatten in einer HT-PEM Brennstoffzelle	119

7.4 Dauerlauf eines 20-Zellen-Stapels	124
<b>8 Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>127</b>
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
<b>Anhang</b>	<b>A1</b>