



# Alterungs- und fehlertolerante optimale Betriebsführung eines Direktmethanol-Brennstoffzellensystems

Roger Keller

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 435

ISBN 978-3-95806-355-6

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

# **Alterungs- und fehlertolerante optimale Betriebsführung eines Direktmethanol-Brennstoffzellensystems**

Roger Keller

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 435

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-355-6

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung und Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	3
1.3	Gliederung der Arbeit	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen Direktmethanol-Brennstoffzelle</b>	<b>7</b>
2.1	Funktionsprinzip	7
2.2	Zellstapel	9
2.3	Elektrisches Betriebsverhalten und Wirkungsgrade	9
2.4	Betriebsparameter	11
2.5	DMFC-System	13
2.6	Stand der Technik Betriebsführung	14
2.6.1	Wirkungsgradmaximierung	15
2.6.2	Fehlertoleranz	17
2.6.3	Alterung	19
<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>23</b>
3.1	DMFC-Shortstack	23
3.2	DMFC-Teststand	23
3.3	Simulations- und Steuerungssoftware	26
<b>4</b>	<b>Betriebsführungskonzepte</b>	<b>27</b>
4.1	Modellierung des DMFC-Systems	27
4.1.1	Anforderungen	28
4.1.2	Regressionsanalyse	29
4.1.3	Empirische Modelle	31
4.1.4	Bilanzräume	35
4.1.5	Darstellung des DMFC-Systems im Zustandsraum	42
4.2	Modellbasierte prädiktive Regelung bei DMFC-Systemen	44
4.2.1	Funktionsweise der modellbasierten prädiktiven Regelung	45
4.2.2	Lineare modellbasierte prädiktive Regelung	48
4.2.3	Arbeitspunkt-abhängige modellbasierte prädiktive Regelung	51
4.2.4	Leistungsregelung mittels MPR	52
4.2.5	Robuste modellbasierte prädiktive Regelung	53
4.2.6	Reglerapplikation und Resultate	53

4.3 Maximierung des Stackwirkungsgrads .....	58
4.3.1 Einsparpotenzial .....	59
4.3.2 Statisch-ökonomische Optimierung.....	60
4.3.3 Betriebsführung .....	61
4.3.4 Kritische Betriebszustände.....	68
4.3.5 Optimierung des Stackwirkungsgrads .....	74
4.4 Zusammenfassung .....	81
<b>5 Langzeitcharakterisierung der Alterung der DMFC.....</b>	<b>83</b>
5.1 Auswertung des Langzeitversuchs.....	83
5.2 Alterungsabhängige Modelle der DMFC.....	92
5.3 Zusammenfassung und Fazit .....	97
<b>6 Langzeitstabilität von Betriebsführungskonzepten .....</b>	<b>99</b>
6.1 Einflüsse auf Betriebsführungskonzepte .....	99
6.1.1 Bewertung der Alterung .....	100
6.1.2 Bewertung von Sensorfehlern.....	103
6.1.3 Zusammenfassung .....	112
6.2 Konzept der fehler- und alterungstoleranten Betriebsführung.....	113
6.2.1 Anforderungen.....	113
6.2.2 Fehlertolerante Regelung und Betriebsführung.....	113
6.2.3 Fehlerdiagnose der Sensoren.....	115
6.2.4 Fehlerdiagnose Systemfehler Alterung .....	130
6.2.5 Rekonfiguration der optimalen Betriebsführung .....	134
6.3 Experimentelle Ergebnisse.....	139
6.3.1 Experimentelle Untersuchung der Alterung als Systemfehler.....	139
6.3.2 Experimentelle Untersuchung von Sensorfehlern.....	142
6.3.3 Grenzen der optimalen Betriebsführung.....	150
6.3.4 Zusammenfassung .....	151
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>153</b>
7.1 Zusammenfassung .....	153
7.2 Ausblick .....	155
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>157</b>
<b>A Anhang .....</b>	<b>165</b>
A.1 Sukzessive Linearisierung .....	165
A.2 Abtastzeit der Messgrößen im DMFC-System .....	166

A.3 Parameter der MPR.....	168
A.4 Parameter der statisch-ökonomischen Optimierung .....	169
A.5 Kalibrierkurve der Methanolpumpe .....	170
A.6 Grenzfrequenz berechneter Residuen aus den Messwerten.....	171
A.7 Grenzfrequenz Stationarität des 25.000-Stunden-Versuchs .....	173
A.8 Verwendete Messstellen im Fließbild.....	175
A.9 Abbildungsverzeichnis .....	176
A.10 Tabellenverzeichnis.....	180
A.11 Akronyme .....	181
A.12 Symbolverzeichnis.....	182

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 435  
ISBN 978-3-95806-355-6