

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energieforschung (IEF)  
Brennstoffzellen (IEF-3)

# **Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems**

Jörg Christoph Wilhelm

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

Band / Volume 73

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-642-2

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Hybridisierung	5
2.1.1	Der Begriff Hybrid	5
2.1.2	Hybridisierungsarten	6
2.1.3	Brennstoffzellenhybrid	7
2.1.4	Hybridisierungsgrad	9
2.2	DMFC	10
2.2.1	Funktionsweise der DMFC	11
2.2.2	U-I-Kennlinie und Wirkungsgrade	11
2.2.3	DMFC-Systemtechnik	14
2.3	Energiespeicher	15
2.3.1	Definitionen	15
2.3.2	Bleibatterie	17
2.3.3	Lithiumbatterie	21
2.3.4	NiCd- und NiMH-Batterie	26
2.3.5	Superkondensator	29
2.3.6	Vergleich der Energiespeichertechnologien	31
2.3.7	Batteriemanagementsysteme	33
2.3.8	Technikübersicht	34
2.3.8.1	<i>Energiespeicher</i>	34
2.3.8.2	<i>Batteriemanagementsysteme</i>	36
2.4	Kopplungsverfahren von Brennstoffzelle und Energiespeicher	37
2.4.1	Kopplungsarten	37
2.4.2	Direkte Kopplung	38
2.4.3	Indirekte Kopplung	38
2.4.3.1	<i>Tiefsetzsteller</i>	39
2.4.3.2	<i>Hochsetzsteller</i>	41
2.4.3.3	<i>Tiefsetz-/Hochsetzsteller</i>	42
2.4.3.4	<i>Bidirektionaler DC/DC-Wandler</i>	43
2.4.4	Technik- und Literaturübersicht	45
2.4.4.1	<i>Literaturübersicht Hybridisierungskonzepte</i>	45
2.4.4.2	<i>Technikübersicht Brennstoffzellenhybride</i>	47
2.4.4.3	<i>Technikübersicht Flurförderfahrzeuge mit Brennstoffzellen</i>	49
2.5	Regelung	51
2.5.1	Regelung und Steuerung	51
2.5.2	Regleransätze für eine nichtlineare Regelstrecke	52
2.5.3	PID-Regler und Kennfeldregler	53
2.5.3.1	<i>PID-Regler</i>	53
2.5.3.2	<i>Kennfeldregler</i>	53
2.5.3.3	<i>Vergleich PID-Regler und Kennfeldregler</i>	54

<b>3</b>	<b>Charakterisierung der betrachteten Anwendung</b>	<b>55</b>
3.1	Motivation	55
3.2	Fahrttests	55
3.2.1	Versuchsbeschreibung	55
3.2.2	Anfahren, Konstantfahrt und Bremsen	55
3.2.3	Heben	56
3.3	Standardzyklus	57
3.3.1	Definition	57
3.3.2	Näherung und Parametervariation	58
3.4	Langzeitmessungen	61
3.4.1	Motivation und Vorbemerkungen	61
3.4.2	Beschreibung Einsatzfall	61
3.4.3	Werkzeug zur Auswertung der Langzeitmessungen	62
3.4.4	Ergebnisse der Auswertung	62
3.4.5	Diskussion der Ergebnisse	68
3.5	Angenäherter charakteristischer Fahrzyklus	70
3.5.1	Näherung	70
3.5.2	Vergleich mit Standardzyklus und Langzeitmessungen	71
3.6	Zusammenfassung	73
<b>4</b>	<b>Instrumente zur Systemanalyse</b>	<b>75</b>
4.1	Motivation	75
4.2	Teststand	75
4.2.1	Ziel und Anforderungen	75
4.2.2	Realisierung	76
4.3	Modellierung	79
4.3.1	Ziel und Anforderungen	79
4.3.2	Aufbau Gesamtsystemmodell	79
4.3.3	Arten der Modellierung	81
4.3.4	Modellierung der DMFC	82
4.3.4.1	Stationäres Modell	82
4.3.4.2	Dynamisches Modell	88
4.3.5	Modellierung des DC/DC-Wandlers	94
4.3.5.1	Stationäres Modell	94
4.3.5.2	Dynamisches Modell	97
4.3.6	Modellierung der Energiespeicher	103
4.3.6.1	Stationäres Modell	103
4.3.6.2	Dynamisches Modell	108
4.3.7	Modellierung des Fahrprofils	110
4.4	Zusammenfassung	110
<b>5</b>	<b>Konzeptentwicklung für Hybridisierung und Regelung</b>	<b>111</b>
5.1	Motivation	111
5.2	Hybridisierung	111
5.2.1	Überblick	111
5.2.2	Herleitung möglicher Schaltungsvarianten	112

5.2.3	Ermittlung favorisierter Schaltungsvarianten .....	115
5.3	Regelung.....	121
5.3.1	Herleitung eines Basiskonzeptes .....	121
5.3.2	Variation des Basiskonzeptes .....	124
5.4	Systemanalyse zur Konzeptentwicklung .....	124
5.4.1	Vergleich der Regelgrößen .....	124
5.4.2	Vergleich der Regler topologien .....	127
5.4.3	Vergleich direkte und indirekte Kopplung .....	134
5.4.4	Einfluss DC/DC-Wandler.....	137
5.4.5	Zusammenfassung.....	138
5.5	Auslegung der Hybridsystemkomponenten.....	139
5.5.1	Auslegung DMFC.....	139
5.5.2	Auslegung Energiespeicher .....	140
5.5.2.1	<i>Spannung</i> .....	140
5.5.2.2	<i>Energiemenge</i> .....	140
5.5.2.3	<i>Leistungsfähigkeit</i> .....	143
5.5.3	Auslegung DC/DC-Wandler .....	144
5.6	Zusammenfassung.....	144
<b>6</b>	<b>Auswahl und Charakterisierung des Energiespeichers .....</b>	<b>145</b>
6.1	Motivation.....	145
6.2	Versuchsprogramm zur Charakterisierung.....	145
6.3	Bleibatterie als Energiespeicher.....	147
6.3.1	Ausgangspunkt .....	147
6.3.2	Experimentelle Batterieuntersuchungen.....	148
6.3.2.1	<i>Kapazitätstest</i> .....	148
6.3.2.2	<i>Spannungsgrenzen</i> .....	149
6.3.2.3	<i>Leerfahren</i> .....	152
6.3.2.4	<i>Thermisches Verhalten</i> .....	152
6.3.3	Alterungsuntersuchungen .....	154
6.3.4	Unterstützende Simulation .....	156
6.3.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	156
6.4	Bewertung alternativer Technologien.....	157
6.5	Auswahl und Beschaffung favorisierter Energiespeicher .....	160
6.5.1	Überblick.....	160
6.5.2	Vergleich mit der Bleibatterie .....	161
6.6	Charakterisierung der favorisierten Energiespeicher.....	162
6.6.1	Experimentelle Batterieuntersuchungen.....	162
6.6.1.1	<i>Kapazitätstest</i> .....	162
6.6.1.2	<i>Spannungsgrenzen</i> .....	163
6.6.1.3	<i>Leerfahren</i> .....	165
6.6.1.4	<i>Thermisches Verhalten</i> .....	166
6.6.2	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	167
6.7	Zusammenfassung.....	167
<b>7</b>	<b>Systemanalyse des Gesamtsystems.....</b>	<b>169</b>
7.1	Überblick Gesamtsystem .....	169

7.2	Systemanalyse.....	169
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>175</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>181</b>
9.1	Berechnungen zur Auswertung der Langzeitmessungen.....	181
9.2	Simulinkmodelle.....	184
9.3	Schaltungsvarianten Brennstoffzellenhybride.....	186
9.4	Verzeichnisse.....	189
9.4.1	Literaturverzeichnis.....	189
9.4.2	Abkürzungen, Formelzeichen und Indices.....	208
9.4.2.1	<i>Abkürzungen</i> .....	208
9.4.2.2	<i>Formelzeichen</i> .....	209
9.4.2.3	<i>Indizes</i> .....	212
9.4.3	Tabellenverzeichnis.....	213
9.4.4	Abbildungsverzeichnis.....	215
9.5	Danksagung.....	219
9.6	Lebenslauf.....	220