

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

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	2
2	Grundlagen und Stand der Technik	5
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

3	Charakterisierung der betrachteten Anwendung	55
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
4	Instrumente zur Systemanalyse	75
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
5	Konzeptentwicklung für Hybridisierung und Regelung	111
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 Reglertopologien	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
6	Auswahl und Charakterisierung des Energiespeichers	145
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
7	Systemanalyse des Gesamtsystems.....	169
7.1	Überblick Gesamtsystem	169

7.2	Systemanalyse	169
8	Zusammenfassung und Ausblick	175
9	Anhang	181
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