

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>	<i>34</i>
2.3.8.2	<i>Batteriemanagementsysteme</i>	<i>36</i>
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>	<i>39</i>
2.4.3.2	<i>Hochsetzsteller.....</i>	<i>41</i>
2.4.3.3	<i>Tiefsetz-/Hochsetzsteller</i>	<i>42</i>
2.4.3.4	<i>Bidirektionaler DC/DC-Wandler.....</i>	<i>43</i>
2.4.4	Technik- und Literaturübersicht.....	45
2.4.4.1	<i>Literaturübersicht Hybridisierungskonzepte</i>	<i>45</i>
2.4.4.2	<i>Technikübersicht Brennstoffzellenhybride</i>	<i>47</i>
2.4.4.3	<i>Technikübersicht Flurförderfahrzeuge mit Brennstoffzellen</i>	<i>49</i>
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>	<i>53</i>
2.5.3.2	<i>Kennfeldregler.....</i>	<i>53</i>
2.5.3.3	<i>Vergleich PID-Regler und Kennfeldregler.....</i>	<i>54</i>

3	Charakterisierung der betrachteten Anwendung	55
3.1	Motivation	55
3.2	Fahrtests	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	Spannung	140
5.5.2.2	Energiemenge	140
5.5.2.3	Leistungsfähigkeit	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	Kapazitätstest	148
6.3.2.2	Spannungsgrenzen	149
6.3.2.3	Leerfahren	152
6.3.2.4	Thermisches Verhalten	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	Kapazitätstest	162
6.6.1.2	Spannungsgrenzen	163
6.6.1.3	Leerfahren	165
6.6.1.4	Thermisches Verhalten	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