

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XIX
Kurzfassung	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Aufbau und Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle	5
2.1.1 Zellspannung und Verluste	8
2.1.2 Alterung von Brennstoffzellen	12
2.1.3 Brennstoffzellen-Stack	13
2.2 PEM-Brennstoffzellensysteme	15
2.2.1 Aufbau eines PEM-Brennstoffzellensystems	15
2.2.2 Betriebsführung	20
2.3 Brennstoffzellenfahrzeuge	21
2.3.1 Strategien zur Leistungsaufteilung	23
2.3.2 Lösung von Optimalsteuerungsproblemen	26
2.3.3 Serienfahrzeuge	34
3 Zielsetzung der Arbeit	37
3.1 Forschungslücken	37
3.2 Aufgabenstellung	38
3.3 Aufbau der Arbeit	40
4 Modellbildung	41
4.1 Simulationsmodell der Brennstoffzelle	41
4.1.1 Strom-Spannungs-Charakteristik	42
4.1.2 Alterungscharakteristik	51
4.2 Modellierung der Subsysteme	53
4.2.1 Luftsystem	54

4.2.2	Verbleibende Subsysteme	58
4.2.3	Systembetrieb	60
4.3	Fahrzeugmodell	62
4.3.1	Antriebsstrang	62
4.3.2	Batterie	64
4.3.3	Kühlsystem	66
4.3.4	Leistungsaufteilung	68
5	Wechselwirkungsanalyse betriebsrelevanter Parameter	71
5.1	Wechselwirkungen im Brennstoffzellensystem	71
5.2	Analyse der Energiesystemebene	73
5.2.1	Verwendung von Degradationsdaten	74
5.2.2	Wasserstoffverbrauch und Degradationsrate	75
5.2.3	Einfluss der Stack-Alterung auf die Leistungsaufteilung	80
5.3	Analyse der Brennstoffzellensystemebene	85
5.3.1	Systemeffizienz und Degradationsrate	85
5.3.2	Einfluss der Umgebungsbedingungen	91
5.3.3	Einfluss der Stack-Alterung auf die optimalen Betriebsparameter	93
6	Entwicklungsmethodik der Betriebsstrategie	97
6.1	Ganzheitliche Entwicklungsmethodik	98
6.2	Modellbasierter Ansatz für die interne Betriebsführung	102
6.2.1	Allgemeine Beschreibung des dynamischen Systems	104
6.2.2	Linearisierung und Diskretisierung des Modells	105
6.2.3	Formulierung des Optimierungsproblems	106
6.2.4	Betriebsverhalten des BZS	109
6.3	Modellbasierter Ansatz für die externe Betriebsführung	115
6.3.1	ECMS mit Berücksichtigung der Betriebstemperatur	116
6.3.2	Vergleich mit optimaler Betriebsführung	118
7	Funktionsnachweis und Bewertung der Methodik	123
7.1	Vergleich der Betriebsstrategien	123
7.2	Diskussion der Ergebnisse	125
7.3	Bewertung der Methodik	128
8	Zusammenfassung und Ausblick	133

Literaturverzeichnis	139
Anhang	149
A.1 Übersicht verwendeter Konstanten und Stoffdaten	149
A.2 Übersicht der angenommenen Parameter des Simulationsmodells	151