

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
Symbolverzeichnis .....	XIX
Kurzfassung .....	XXV
Abstract .....	XXVII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
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
<b>3 Zielsetzung der Arbeit .....</b>	<b>37</b>
3.1 Forschungslücken .....	37
3.2 Aufgabenstellung .....	38
3.3 Aufbau der Arbeit .....	40
<b>4 Modellbildung .....</b>	<b>41</b>
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 Luftsysten .....	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
<b>5</b>	<b>Wechselwirkungsanalyse betriebsrelevanter Parameter .....</b>	<b>71</b>
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 Betriebspa- rameter.....	93
<b>6</b>	<b>Entwicklungsmethodik der Betriebsstrategie .....</b>	<b>97</b>
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
<b>7</b>	<b>Funktionsnachweis und Bewertung der Methodik .....</b>	<b>123</b>
7.1	Vergleich der Betriebsstrategien .....	123
7.2	Diskussion der Ergebnisse .....	125
7.3	Bewertung der Methodik .....	128
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>

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