

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Elektrifizierter Antriebsstrang eines Lkw mit Brennstoffzellentechnologie . . . .	5
2.1.1 Energiewandlung mit einem PEM-Brennstoffzellensystem . . . . .	7
2.1.2 Energiespeicher als wesentlicher Bestandteil des Antriebsstrangs . . . . .	12
2.1.3 Herausforderungen beim Betrieb . . . . .	14
2.2 Potential zur Effizienzsteigerung mit Prädiktion . . . . .	16
2.2.1 Vorkonditionierung des Batterie-Ladezustands . . . . .	16
2.2.2 Prädiktion und Optimierung des Leistungsbedarfs . . . . .	17
2.3 Grundlagen der dynamischen Optimierung . . . . .	18
2.3.1 Allgemeine Problemformulierung . . . . .	19
2.3.2 Numerische Lösungsverfahren . . . . .	20
2.3.3 Modellprädiktive Regelung . . . . .	23
2.4 Methoden für Energiemanagement-Strategien . . . . .	24
2.4.1 Regelbasiert . . . . .	25
2.4.2 Optimierungsbasiert . . . . .	27
2.4.3 Lernbasiert . . . . .	29
2.4.4 Zusammenfassung der Verfahren . . . . .	30
<b>3 Forschungsfragen und Rahmenbedingungen</b>	<b>33</b>
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>37</b>
4.1 Vorgehensweise bei der Beantwortung der Forschungsfrage . . . . .	37
4.2 Konfiguration des betrachteten Brennstoffzellen-Lkw . . . . .	39
4.3 Algorithmus zur Lösung von nichtlinearen Optimalsteuerungsproblemen . . . . .	42
4.4 Energiemanagement-Strategie als Referenz für die Validierung . . . . .	43
<b>5 Entwicklung innovativer Betriebsstrategien</b>	<b>45</b>
5.1 Verfahren 1: Regelbasierte Energiemanagement-Strategie ohne Vorausschau . . .	45
5.2 Vorbereitung der prädiktiven Betriebsstrategie . . . . .	51
5.2.1 Regelungskonzept . . . . .	51

5.2.2	Stetig differenzierbares Brennstoffzellen-Lkw-Modell . . . . .	53
5.2.3	Aufbereitung der Streckeninformationen . . . . .	63
5.3	Holistische Optimalsteuerung zur Berechnung von Referenztrajektorien . . . . .	65
5.3.1	Definition der Optimierungsvariablen . . . . .	65
5.3.2	Kostenfunktion der optimalen Steuerung . . . . .	67
5.3.3	Nebenbedingungen der optimalen Steuerung . . . . .	68
5.4	Verfahren 2: Prädiktive Betriebsstrategie mit modellprädiktiver Regelung . . . . .	71
5.4.1	Überblick über das Funktionsprinzip des Verfahrens 2 . . . . .	71
5.4.2	Synchronisation der Prädiktionshorizonte . . . . .	73
5.4.3	Prädiktive Geschwindigkeitsregelung . . . . .	74
5.4.4	Prädiktives Energiemanagement . . . . .	76
5.5	Verfahren 3: Regelbasierte Betriebsstrategie mit Prädiktion . . . . .	78
5.5.1	Überblick über das Funktionsprinzip des Verfahrens 3 . . . . .	78
5.5.2	Geschwindigkeitsregelung mit PI-Regler . . . . .	79
5.5.3	Adaption des regelbasierten Energiemanagements . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Simulationsbasierte Bewertung der Betriebsstrategien</b>	<b>83</b>
6.1	Bestimmung der Bewertungskriterien . . . . .	84
6.2	Definitionen der verschiedenen Simulationsszenarien . . . . .	85
6.3	Analyse des regelbasierten Energiemanagements ohne Vorausschau (Verfahren 1)	86
6.4	Analyse der prädiktiven Betriebsstrategien . . . . .	88
6.4.1	Plausibilisierung und Bewertung der Referenztrajektorien . . . . .	89
6.4.2	Prädiktive Betriebsstrategie mit modellprädiktiver Regelung (Verfahren 2)	94
6.4.3	Prädiktive, regelbasierte Betriebsstrategie (Verfahren 3) . . . . .	95
6.4.4	Regelgüte und Unsicherheiten bei der Identifikation von Parametern . . . . .	97
6.5	Vergleich der entwickelten Verfahren für verschiedene Höhentopologien . . . . .	99
6.6	Quantifizierte Bewertung der entwickelten Betriebsstrategien . . . . .	103
6.6.1	Ergebnisse für eine standardisierte Strecke . . . . .	103
6.6.2	Auswahl des Verfahrens anhand der Nutzwertanalyse . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Fazit und praktischer Nutzen</b>	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>117</b>
	<b>Anhang</b>	
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>131</b>