

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
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
3 Forschungsfragen und Rahmenbedingungen	33
4 Material und Methoden	37
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
5 Entwicklung innovativer Betriebsstrategien	45
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
6	Simulationsbasierte Bewertung der Betriebsstrategien	83
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
7	Fazit und praktischer Nutzen	111
8	Zusammenfassung	115
Literaturverzeichnis		117
Anhang		
A Anhang		131