
Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Abstract	iii
Kurzfassung	v
Inhaltsverzeichnis.....	vii
Abbildungsverzeichnis.....	xii
Tabellenverzeichnis	xvi
Formelverzeichnis	xviii
Abkürzungsverzeichnis.....	xxi
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Konkretisierung der Problemstellung.....	2
1.3 Gliederung der Arbeit	4
2 Stand der Technik für die Entwicklung prädiktiver Betriebsstrategien	6
2.1 Hybridantriebsstränge	6
2.1.1 Hybridstrukturen	6
2.1.2 Antriebskonzepte	9
2.1.3 Hybridfunktionen	11
2.1.4 Betriebsstrategien	13
2.1.5 Fahrstrategien.....	17
2.2 Simulation	17
2.2.1 Axiomatische Modellierung	18
2.2.2 Vorwärts-/Rückwärtssimulation	20
2.2.3 Zielstellung	21
2.3 Optimierung	21

2.3.1	Analytische Lösungsmethoden	22
2.3.2	Numerische Lösungsmethoden.....	24
2.3.3	Optimalsteuerung.....	27
2.4	Vernetzung.....	29
2.4.1	OnBoard Sensorik	30
2.4.2	Digitale Karten	31
2.5	Entwicklungsprozess prädiktiver Betriebsstrategien	31
3	Randbedingungen zur Entwicklung prädiktiver Betriebsstrategien	35
3.1	Optimierungsansatz P-ECMS.....	36
3.1.1	Energy-Management-Problem	36
3.1.2	Lösung des Optimalsteuerungsansatzes mittels PMP	37
3.1.3	Funktionsweise.....	38
3.1.4	Eingangsgrößen für die P-ECMS.....	38
3.2	Bereitstellung der Eingangsgrößen.....	39
3.3	Hybrider Antriebsstrang/Antriebsstrangkomponenten	40
3.3.1	Kraftstoff-Kennfeldapproximation über Polynome.....	40
3.3.2	Approximation des elektrischen Energieverbrauchs/Batteriestrom.....	45
3.3.3	Schaltlogik	47
3.4	Fahrszenarien (WLTC/RDE).....	49
3.5	Erstellung des Prädiktionshorizonts	51
3.6	Echtzeitfähigkeit	53
3.6.1	Echtzeitsystem.....	53
3.6.2	Simulationslatenz.....	54
3.7	Fahrermodellierung.....	55
3.7.1	Parametrierung in der Geschwindigkeitsprädiktion.....	56
3.7.2	Berechnung der Fahrerparameter.....	57
3.8	Einfluss der Geschwindigkeitsvorhersage	59
4	Aufbau der modellbasierten Entwicklungsumgebung	60
4.1	Co-Simulationsumgebung	60

4.1.1	Advanced Simulation Technologies Suite	61
4.1.2	Matlab/Simulink.....	63
4.2	Vorwärtsmodell des Gesamtfahrzeugs	63
4.2.1	Modellparameter	64
4.2.2	Fahrer- und Fahrzeugmodell.....	65
4.3	Validierung der Gesamtfahrzeugsimulation	71
4.3.1	Vergleich Fahrversuch vs. MiL-Simulation vs. HiL-Simulation	71
4.3.2	Übertrag zur Gesamtfahrzeugsimulation (MiL).....	72
4.3.3	Vergleich mit HiL-Simulation.....	75
4.4	Aufbau des prädiktiven Betriebsstrategiemodells.....	79
4.4.1	Prädiktion der Lastanforderung	79
4.4.2	Instantane Optimierung.....	80
4.4.3	Kostenfunktion	81
4.4.4	Äquivalenzfaktoroptimierung	82
4.4.5	Zustandswechselkosten.....	85
5	Verknüpfung der prädiktiven Modelle und Integration in die Entwicklungsumgebung.....	88
5.1	Integration in die Co-Simulationsumgebung.....	88
5.2	Datenabruf der digitalen Karten	89
5.2.1	Geo-Data-Service Modul	89
5.2.2	Grafisches User Interface	90
5.2.3	Datentransfer über CAN.....	91
5.2.4	Abgerufene Daten.....	94
5.2.5	Krümmungsberechnung.....	96
5.3	Fahrstrategie (Geschwindigkeitsprädiktion)	97
5.3.1	Beispielhafte Geschwindigkeitsprädiktion.....	97
5.3.2	Optimierung der Prädiktionsgeschwindigkeit	101
5.4	Umsetzung der Schnittstellen zur prädiktiven Betriebsstrategie.....	106
5.5	Validierung des prädiktiven Betriebsstrategiemodells.....	106
5.5.1	Simulation mit perfekter Prädiktion.....	107

5.5.2	Prädiktionsvektor vs. Simulationswerte.....	110
5.6	HiL-Simulation mit P-ECMS	112
6	Weiterführende Untersuchungen	115
6.1	Parametervariation der Funktionen der P-ECMS	115
6.1.1	Variation der Zustandswechselkosten.....	115
6.1.2	Variation der Prädiktionslänge	117
6.1.3	Intuitiver Regler zu Festlegung der Prädiktionslänge	119
6.2	Validierung anhand weiterer Fahrsczenarien.....	122
6.2.1	Vergleich Fahrzeugmessung - Simulation.....	124
6.2.2	Vergleich der Basissimulation mit der prädiktiven Strategie (perfekte Prädiktion)	125
6.2.3	Vergleich mit berechneter Prädiktion	126
6.3	Sensitivitätsanalyse	129
6.3.1	Untersuchungen zur Geschwindigkeitsprädiktion.....	129
6.3.2	Robustheitsanalyse für Simulation mit falscher Prädiktion.....	133
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	136
Anhang.....		139
A	Simulationsmodell in Model.Connect.....	139
B	Simulationsmodell in Cruise M	140
Literatur.....		141