

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Angenommene technologische Rahmenbedingungen dieser Arbeit . . . . .	2
1.3 Ziele und Aufbau dieser Arbeit . . . . .	4
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>7</b>
2.1 Elektrisches Energiemanagement für Hybridfahrzeuge . . . . .	7
2.1.1 Klassifikation von Ansätzen des Energiemanagements . . . . .	7
2.1.2 Heuristisches Energiemanagement . . . . .	8
2.1.3 Optimierungsba siertes Energiemanagement . . . . .	11
2.1.4 Lernbasiertes Energiemanagement . . . . .	13
2.1.5 Prädiktives Energiemanagement . . . . .	13
2.1.6 Zwischenfazit und Bewertung . . . . .	16
2.2 Zielführung und Bahnplanung in digital vernetzten Verkehrssystemen	17
2.2.1 Vernetzte Verkehrssysteme . . . . .	17
2.2.2 Klassifikation von Ansätzen zur Zielführung und Bahnplanung	20
2.2.3 Zielführung ohne Zwischenziele . . . . .	20
2.2.4 Zielführung mit Zwischenzielen . . . . .	25
2.2.5 Bahnplanung . . . . .	27
2.2.6 Zwischenfazit und Bewertung . . . . .	29
2.3 Mechatronische Entwicklungsmethodik . . . . .	30
2.3.1 Mechatronische Strukturierung . . . . .	30
2.3.2 Mechatronischer Entwicklungskreislauf . . . . .	31
2.3.3 Modellbildung und Systemidentifikation . . . . .	32
2.3.4 Anwendung der Methodik in dieser Arbeit . . . . .	34
2.4 Bewertung des „Stand des Wissens“ im Hinblick auf diese Arbeit . . . . .	34
<b>3 Konzeption der Funktionen für den energieoptimierten Fahrbetrieb</b>	<b>37</b>
3.1 Definition von Anforderungen . . . . .	37
3.1.1 Anforderungen auf Bordnetzebene . . . . .	37
3.1.2 Anforderungen im Kontext digital vernetzter Verkehrssysteme	39
3.2 Konzeption einer modularen und hierarchisch angeordneten Systemstruktur	40
3.2.1 Modulare und hierarchisch angeordnete Systemstruktur des Gesamtfahrzeugs im vernetzten Verkehrssystem . . . . .	41
3.2.2 Funktionsstruktur auf AMS-Ebene . . . . .	42
3.2.3 Funktionsstruktur der MFG des prädiktiven Energiemanagements	44

<b>4 CAE-Entwicklungswerkzeuge</b>	<b>46</b>
4.1 Virtueller MiL- und SiL-Prüfstand . . . . .	46
4.1.1 Konzept des virtuellen Prüfstands . . . . .	46
4.1.2 Modellkomponenten . . . . .	48
4.2 Flexibel konfigurierbarer HiL-Prüfstand . . . . .	50
4.2.1 Konzept des HiL-Prüfstands . . . . .	50
4.2.2 Realisierung des flexibel konfigurierbaren HiL-Prüfstands . . .	52
4.3 Mobiler V2X-HiL-Prüfstand . . . . .	55
4.3.1 Konzept des mobilen V2X-HiL-Prüfstands . . . . .	55
4.3.2 Realisierung des mobilen V2X-HiL-Prüfstands . . . . .	56
4.4 Einsatz der CAE-Werkzeuge in dieser Arbeit und Zwischenfazit . . . . .	58
<b>5 Entwurf von Zielführung und Bahnplanung in vernetzten Verkehrssystemen</b>	<b>59</b>
5.1 Konzept der Zielführung und Bahnplanung in vernetzten Verkehrssystemen	59
5.2 Entwurf der Zielführung . . . . .	61
5.2.1 Aufbereitung und Bereitstellung des statischen Kartenmaterials	61
5.2.2 Kartenaktualisierung durch dynamische Verkehrsinformationen	71
5.2.3 Auslegung der zeit-, distanz- und energieoptimierten Zielführung	72
5.2.4 Erweiterung zur infrastrukturoptimierten Zielführung . . . . .	76
5.3 Entwurf der Bahnplanung . . . . .	85
5.3.1 Definition des Optimierungsproblems und des Lösungsraums	85
5.3.2 Entwurf des Optimierungsverfahrens zur Bahnplanung . . . . .	90
5.4 Zwischenfazit . . . . .	92
<b>6 Entwurf des prädiktiven Energiemanagements</b>	<b>93</b>
6.1 Konzept des prädiktiven Energiemanagements . . . . .	93
6.2 Brennstoffzellenmanagement . . . . .	95
6.2.1 Elektrochemische Grundlagen von PEM-Brennstoffzellen . . .	95
6.2.2 Funktionen des Brennstoffzellenmanagements . . . . .	96
6.3 Batteriemanagement . . . . .	98
6.3.1 Funktionsprinzip und Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien	98
6.3.2 Funktionen des Batteriemanagements . . . . .	99
6.4 Bordnetzmanagement . . . . .	100
6.4.1 Modellbildung des Bordnetzes . . . . .	100
6.4.2 Funktion des Bordnetzmanagements . . . . .	103
6.5 Entwurf der Leistungsprädiktion . . . . .	105
6.5.1 Konzept der Leistungsprädiktion . . . . .	106
6.5.2 Prädiktion der Antriebsleistung . . . . .	107
6.5.3 Prädiktion der Leistungen im Bordnetz . . . . .	108
6.5.4 Prädiktion der Gesamtleistung . . . . .	109
6.6 Entwurf der modellprädiktiven Leistungsbereitstellung . . . . .	109
6.6.1 Modellbildung der Brennstoffzelle . . . . .	109
6.6.2 Modellbildung der Lithium-Ionen-Batterie . . . . .	116
6.6.3 Methode der Modellprädiktiven Regelung . . . . .	121
6.6.4 Systembeschreibung im zeitdiskreten Zustandsraum . . . . .	125
6.6.5 Auslegung einer nichtlinearen, zeitlich kaskadierten Regelung	126
6.7 Zwischenfazit . . . . .	134

---

<b>7 Verifikation der Funktionen für den energieoptimierten Fahrbetrieb</b>	<b>135</b>
7.1 Verifikation mittels MiL- und SiL-Simulation . . . . .	135
7.1.1 Definition der Pilotanwendung . . . . .	135
7.1.2 Verifikation der Zielführung . . . . .	136
7.1.3 Verifikation der Bahnplanung . . . . .	138
7.1.4 Verifikation des prädiktiven Energiemanagements . . . . .	140
7.2 Verifikation unter Echtzeitbedingungen mittels HiL-Simulation . . . . .	143
7.2.1 Verifikation der Zielführung unter Echtzeitbedingungen . . . . .	143
7.2.2 Verifikation des prädiktiven Energiemanagements . . . . .	147
7.3 Zwischenfazit . . . . .	149
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
8.1 Zusammenfassung . . . . .	151
8.2 Ausblick . . . . .	153
<b>A Referenzen</b>	<b>156</b>
A.1 Literaturverzeichnis . . . . .	156
A.2 Eigene Publikationen . . . . .	167
<b>B Anhang</b>	<b>171</b>
B.1 Zielführung und Bahnplanung in vernetzten Verkehrssystemen . . . . .	171
B.1.1 Bellman-Ford-Algorithmus . . . . .	171
B.1.2 Funktionsarchitektur zur Realisierung der dynamischen Karten aktualisierung . . . . .	175
B.1.3 Funktionsarchitektur zur Realisierung der Zielführung . . . . .	176
B.1.4 Funktionsarchitektur zur Realisierung der Ermittlung eines Infrastrukturgraphen . . . . .	179
B.1.5 Funktionsarchitektur zur Realisierung der infrastrukturoptimierten Zielführung . . . . .	180
B.2 Entwurf des prädiktiven Energiemanagements . . . . .	182
B.2.1 Brennstoffzellentypen . . . . .	182
B.2.2 Bordnetzkomponenten . . . . .	183
B.2.3 Leistungsmatrix des NV-Leistungskoordinators . . . . .	183