

## II

### *Inhaltsverzeichnis*

1.	<i>Einleitung</i>	1
1.1	Primärenergie - Bestandsaufnahme und Prognosen	1
1.2	Der Straßenverkehr - Bestandsaufnahme und Prognosen	2
1.3	Die Auswirkungen des Straßenverkehrs und Lösungsansätze	3
1.3.1	Kohlendioxid-Ausstoß	3
1.3.2	Schadstoff-Emissionen	4
1.3.3	Natürliche Limitierung der konventionellen Kraftstoffe auf Erdöl- und Erdgasbasis	4
1.3.4	Lösungsansätze	4
1.4	Abgrenzung und Ziel der Arbeit	5
2.	<i>Analyse des Kraftfahrzeugspektrums</i>	7
2.1	Klassifizierung der Schadstoffe	7
2.1.1	Kohlendioxid-Emissionen	7
2.1.2	Andere Schadstoff-Emissionen	7
2.1.3	Gesetzgeberische Vorgaben und Maßnahmen	8
2.1.3.1	Der europäische und US-amerikanische Prüfzyklus	8
2.1.3.2	Gesetzgebung zur Limitierung der Kohlendioxid-Emissionen	11
2.1.3.3	Gesetzgebung zur Limitierung der Schadstoff-Emissionen	12
2.2	Analyse des Kraftfahrzeug-Spektrums	13
2.2.1	Klassifikation nach Karosserie-Größe und technischen Daten	13
2.2.2	Klassifikation nach Einsatzzweck	14
2.2.3	Klassifikation nach Antriebssystem	14
2.3	Bewertung der Antriebssysteme: Aktueller Stand und Prognosen	16
2.3.1	Konventionell angetriebene Fahrzeuge	16
2.3.2	Elektrofahrzeuge	17
2.3.3	Hybridfahrzeuge	17
2.3.3.1	Parallelhybride	18
2.3.3.2	Serienhybride	18
2.3.3.3	Leistungsverzweigende Hybride	18
2.4	Analyse geeigneter Komponenten für Hybridfahrzeuge	19
2.4.1	Brennstoffzellen	19
2.4.2	Verbrennungsmotoren	20
2.4.2.1	Hubkolben-Ottomotor nach Viertakt- und Zweitaktverfahren	21
2.4.2.1.1	Kohlendioxid-Emissionen	21
2.4.2.1.2	Schadstoff-Emissionen	22
2.4.2.2	Hubkolben-Dieselmotor nach dem Viertaktverfahren	23
2.4.2.2.1	Kohlendioxid-Emissionen	24
2.4.2.2.2	Schadstoff-Emissionen	26
2.4.2.3	Wankelmotor, Stirlingmotor, Gasturbine	26
2.4.2.4	Zusammenfassung	28
2.4.3	Elektromotoren	29
2.4.3.1	Asynchronmaschine mit Kurzschlußläufer	29

2.4.3.2	Permanentterregte Synchronmaschine / bürstenlose Gleichstrommaschine	30
2.4.3.3	Reluktanzmaschine	30
2.4.3.4	Geschaltete Reluktanzmaschine	30
2.4.3.5	Transversalflußmaschine	30
2.4.3.6	Zusammenfassung	31
2.4.4	Speichersysteme	31
3.	<i>Modellbasierte Entwicklung des seriellen Hybridantriebsstrangs: Dimensionierung der Komponenten</i>	33
3.1	Modellbasierte Entwicklung	33
3.1.1	Softwaretools	34
3.1.2	Prüfstand	35
3.2	Die Dimensionierung der Komponenten des seriellen Hybridantriebs	36
3.2.1	Fahrwiderstandsgleichung	36
3.2.1.1	Steigungswiderstand	37
3.2.1.2	Beschleunigungswiderstand	37
3.2.1.3	Rollwiderstand	38
3.2.1.4	Luftwiderstand	38
3.2.2	Drehmoment und Leistung	39
3.2.3	Simulation von Längsdynamik und Energiebedarf	40
3.2.3.1	Abschätzung des Fahrzeuggewichts	40
3.2.3.2	Mechanische Leistung und Energie im Fahrzyklus	41
3.2.3.3	Dimensionierung des Elektrotraktionsmotors: Längsdynamik, elektrische Leistung und Energie	45
3.2.3.4	Dimensionierung der Motor-Generator-Einheit MGU	50
3.2.3.5	Dimensionierung des Speichersystems	51
3.2.3.6	Modellierung der elektrischen Nebenverbraucher	55
4.	<i>Wirkungsgradoptimierte Offline-Strategie von MGU und Speichersystem bei einem seriellen Hybridfahrzeug</i>	57
4.1	Beschreibung des Optimierungsproblems	58
4.1.1	Das Optimalsteuerungsproblem des seriellen Hybridfahrzeuges	59
4.1.2	Allgemeine Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen	62
4.2	Dimensionierung und Betriebsstrategien zum Laden der Batterie	63
4.3	Betriebsstrategien der MGU	69
4.4	Zusammenfassung der Vorüberlegungen und erste Bewertung	72
4.5	Mathematisch optimale Offline-Strategie, berechnet mit dem direkten Kollokationsverfahren DIRCOL	74
4.5.1	Numerische Lösungsverfahren	74
4.5.2	Das direkte Kollokationsverfahren DIRCOL	75

4.5.2.1	Diskretisierung, Interpolation und Verfahrensgenauigkeit: Erfahrungen mit DIRCOL	75
4.5.3	Ergebnisse der Offline-Simulation	77
4.5.3.1	ECE-Zyklus	77
4.5.3.2	EUDC-Zyklus	79
4.5.3.3	MVEG-Zyklus	81
4.5.3.4	FTP-Zyklus (Ausschnitt)	84
4.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	86
5.	<i>Online-Betriebsstrategie des seriellen Hybridfahrzeugs: Optimierung hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Dynamik und Komfort mit Fuzzy-Logic</i>	89
5.1	Online-Strategie: Anforderungen und Unterschiede zur Offline-Strategie	89
5.1.1	Vergleich der Simulationsmodelle für Offline- und Online- Betriebsstrategie	91
5.2	Modellierung der Komponenten unter SIMULINK	91
5.2.1	Verbrennungsmotor	92
5.2.1.1	Kreisprozeß, Momentenbildung und Kraftstoffverbrauch	93
5.2.1.2	Turbolader	95
5.2.1.3	Betriebszustände: Start, Hochlauf, Leerlauf, Last, Stop	95
5.2.2	Generator	98
5.2.3	Elektrotraktionsmotor	98
5.2.4	Batteriespeicher	98
5.3	Online-Strategie des Serienhybrids: Vorüberlegungen	99
5.4	Regelungstechnische Beschreibung des Problems und Lösungsverfahren	102
5.4.1	Fuzzy-Logic und Fuzzy-Control: eine kurze Einführung	103
5.4.2	Steuergeräte-Architektur des Serienhybrids	104
5.4.2.1	VMU: Funktionen	105
5.4.2.2	MGU-ECU: Funktionen	110
5.5	Simulationsergebnisse der Online-Regelung	114
5.5.1	Online-Fuzzy-Regelung für den MVEG-Zyklus	114
5.5.2	Online-Fuzzy-Regelung für den FTP-Zyklus	119
5.6	Stabilität der Fuzzy-Regelung	122
5.6.1	Variation des Ladezustandes	122
5.6.2	Variation der Last der elektrischen Nebenverbraucher	128
5.7	Bewertung der Ergebnisse	131
5.7.1	Variation des Fahrzeuggewichts	131
5.7.2	Einfluß des Leistungsbedarfs der Nebenaggregate	133
5.7.3	Fazit und Ausblick	134
6.	<i>Zusammenfassung</i>	135
7.	<i>Literaturverzeichnis</i>	137

8.	<i>Anhang</i>	157
8.1	Modellierung des Verbrennungsmotors	157
8.1.1	Modellierung des Reibmomentes	157
8.1.2	Modellierung des indizierten Momentes	158
8.1.2.1	Ideale Kreisprozesse	158
8.1.2.2	Vergleichsprozesse	161
8.1.2.3	Realer Prozeß	162
8.1.3	Massenströme	163
8.1.4	Einspritzmengenbegrenzung und Abgasrückführung	165
8.2	Modellierung des Turboladers	166
8.3	Ladeluftkühler	167
8.4	Elektrotraktionsmotor: Asynchronmaschine in feldorientierter Regelung	168
9.	<i>Lebenslauf</i>	171