

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Formelzeichen, Abkürzungen	9
Kurzfassung	17
Summary	19
1 Einleitung und Zielsetzung	21
1.1 Modellgestützte Entwicklung mechatronischer Systeme	21
1.2 HiL Simulation in der Antriebsentwicklung	23
1.3 Zielsetzung der Arbeit	25
2 Stand der Modellierung	29
2.1 Motormodelle für Echtzeit-Anwendungen	30
2.1.1 Mittelwertmodelle	31
2.1.2 Nulldimensionale Prozessrechnungsmodelle	33
2.2 Modellierungsansätze für das 14V-Energiebordnetz und dessen Komponenten	35
2.2.1 elektrische Zusammenhänge	35
2.2.2 Generatormodellierung	36
2.2.3 Batteriemodell	37
2.2.4 Verbrauchersimulation	38
	5

Inhaltsverzeichnis

3 Messdatenerfassung und -auswertung	41
3.1 Erfassung motorischer Messdaten	41
3.1.1 Versuchsträger	41
3.1.2 Prüfstandsaufbau und konventionelle Messtechnik	42
3.1.3 Indiziermesstechnik	44
3.2 Aufbereitung und Analyse der Motormessdaten	46
3.2.1 Ermittlung der Motorreibung und zyklischen Schwankungen	46
3.2.2 Bestimmung des Restgasgehalts im Zylinder	47
3.2.3 Verbrennungsanalyse	48
3.2.4 Approximation des Vibe-Ersatzbrennverlaufs	51
3.3 Bordnetzprüfstand	53
3.3.1 Prüfstandsaufbau und Versuchsträger	53
3.3.2 Messdatenerfassung	54
3.4 Kopplung von Motor- und Bordnetzprüfstand	55
3.4.1 Messaufbau	55
3.4.2 Datenerfassung	56
4 Motormodellierung	57
4.1 Spezifikation des Motormodells	57
4.2 Grundlagen und Aufbau	59
4.2.1 Teilmodelle des Motormodells	59
4.2.2 Implementierung einer nulldimensionalen Hochdruck-Prozessrechnung . .	61
4.2.3 Kurbeltrieb	70
4.2.4 Modellierung des Druckverlaufs im Ladungswechsel	74
4.3 Parametrierung	78
4.3.1 Konstruktionsdaten	78
4.3.2 Parameter für die Hochdruckrechnung	79
4.3.3 Parametrierung der Niederdrucksimulation	82
4.4 Numerische Randbedingungen für die Implementierung auf einem HiL-System .	84

4.4.1	Numerische Integration und Differenziation	84
4.4.2	Rechenschrittweite für die Prozessrechnung	91
4.4.3	Synchronisation unterschiedlicher Rechenschrittweiten	94
4.4.4	Berechnung des Energieeintrags durch die Verbrennung	96
4.5	Modellvalidierung	98
4.5.1	stationäre Validierung des Verbrennungsmodells	99
4.5.2	Dynamische Validierung des Gesamtmotormodells	103
5	Energiebordnetzmodell	105
5.1	Anforderungen an das Bordnetzmodell und Ableitung des Modellaufbaus	105
5.2	Generatormodell	116
5.2.1	Reglermodell	116
5.2.2	Maschinenmodell	120
5.3	Batteriemodell	122
5.4	Lastaufschaltung für die Modellvalidierung	123
5.5	Dynamische Validierung des Bordnetzmodells	125
6	Closed-Loop Betrieb des Verbunds aus Motor- und Energiebordnetzmodell	131
6.1	Integration der Modelle in die HiL-Plattform	132
6.2	Kopplung von Motor- und Energiebordnetzmodell	134
6.3	Dynamische Validierung des Modellverbunds	135
7	Zusammenfassung und Ausblick	141
A	Anhang	143
A.1	Herleitung des Formfunktionsansatzes zur Niederdrucksimulation	143
A.2	Simulation der Zylinderungleichverteilung	149
Literaturverzeichnis		151