

Rolf Isermann (Hrsg.)

# Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe

Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose  
für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe

Mit 318 Abbildungen und 24 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Mechatronische Fahrzeugantriebe</b>	<b>1</b>
1.1	Aktuelle Entwicklungen bei Verbrennungsmotoren	2
1.2	Steuerung und Regelung von Verbrennungsmotoren	7
1.3	Mechatronische Komponenten	13
1.4	Modellbildung und Simulation	19
1.5	Diagnose	25
1.6	Hybridisierung	27
1.7	Zusammenfassung	32

<b>A</b>	<b>Elektronische Steuerung und ihre Realisierung</b>
----------	--

<b>2</b>	<b>Aufbau und Anpassung der Motorsteuerungs-Software für Otto- und Dieselmotoren</b>	<b>38</b>
2.1	Anforderungen an Motorsteuerungs-Systeme	38
2.1.1	Anforderungen an moderne Motoren	38
2.1.2	Anforderungen an Motorsteuerungen	39
2.2	Aufbau von Systemen zur Steuerung von Otto- und Dieselmotoren	41
2.2.1	Aufbau des Motorsteuerungs-Systems	41
2.2.2	Aufbau des Motorsteuergerätes	42
2.2.3	Signalfluss der Motorsteuerung	44
2.3	Architektur der Motorsteuerungs-Software	46
2.3.1	Sichtweisen der Software-Architektur <sup>1</sup>	46
2.3.1.1	Statische Sicht der Motorsteuerungs-Software	46
2.3.1.2	Dynamische Sicht der Motorsteuerungs-Software	47
2.3.1.3	Funktionale Sicht der Motorsteuerungs-Software	48
2.3.2	Merkmale der Architektur	49
2.4	Struktur der Motorsteuerungs-Software	50
2.5	Parametrierung der Motorsteuerungs-Software	53
2.5.1	Ablauf der Parametrierung	53
2.5.2	Klassifizierung der Parametrierungsaufgaben	54
2.5.3	Herausforderungen bei der Parametrierung	55
2.5.4	Modellbasierte Applikation	56
2.5.5	HiL-Anwendungen	59
2.6	Entwicklungstrends von Motorsteuerungs-Systemen	59
2.6.1	Trends der Motorentwicklung	59
2.6.2	Trends der Entwicklung von Motorsteuerungs-Systemen	60
2.6.2.1	Komplexitätsbeherrschung – Standardisierung	60
2.6.2.2	Neue Anforderungen	63

2.6.2.3	Low Price Vehicles .....	63
2.6.2.4	Individuelle Lösungen .....	63
2.7	Zusammenfassung .....	64
<b>3</b>	<b>Steuerung und Regelung Pkw-Dieselmotoren – Stand und zukünftige Anforderungen</b> .....	<b>67</b>
3.1	Die Dieselmotor-Steuerung Gestern – Heute –Morgen .....	67
3.2	Die Abgasgesetzgebung als Treiber für Innovation im Bereich der Dieselmotor-Steuerung .....	69
3.3	Das vorhomogenisierte Brennverfahren als Alternative zur NO <sub>x</sub> -Abgasnachbehandlung .....	71
3.4	Zukünftige Anforderungen an die Dieselregelung .....	73
3.4.1	Brennraumdruckbasierte Dieselmotor-Steuerung; Sensoren und Funktionen .....	74
3.4.2	Niederdruck-Abgasrückführung .....	76
3.4.3	Direkt angetriebene Piezo-Einspritzdüsen .....	79
3.5	Die GM „In-House-Controls“-Strategie .....	80
3.6	Zukünftige Entwicklungstrends in der Motorsteuerung .....	82
3.7	Zusammenfassung und Ausblick .....	84

## B Modellbildung und Simulation von Verbrennungsmotoren

<b>4</b>	<b>Modellansätze für die Simulation von Gemischbildung und Verbrennung</b> ....	<b>88</b>
4.1	Thermodynamische (nulldimensionale) Modelle .....	89
4.2	Phänomenologische (quasi-dimensionale) Modelle .....	90
4.3	CFD-Codes .....	92
4.3.1	Erhaltungsgleichungen .....	92
4.3.2	Spray-Modellierung .....	93
4.3.3	Dieselmotorische Diffusionsverbrennung .....	96
4.3.4	Ottomotorische Vormischverbrennung .....	98
4.4	Schadstoffbildung .....	99
4.4.1	Stickoxid-Bildung .....	99
4.4.2	Rußbildung .....	100
4.5	Zusammenfassung .....	101
<b>5</b>	<b>Mittelwert- und Arbeitstaktsynchrone Simulation von Dieselmotoren</b> .....	<b>103</b>
5.1	Mittelwert-Motormodell .....	104
5.1.1	Luft- und Abgaspfad .....	105
5.1.2	Turbolader .....	108
5.1.3	Zylindergruppe .....	113
5.2	Arbeitstaktsynchrones Motormodell .....	115
5.2.1	Luft- und Abgaspfad .....	115
5.2.2	Zylindergruppe .....	116

5.3	Echtzeitsimulationssystem .....	120
5.3.1	Echtzeitrechnersystem .....	121
5.3.2	Echt- und Ersatzlasten .....	121
5.3.3	Motorsteuergerät .....	122
5.4	Simulationsergebnisse .....	123
5.5	Zusammenfassung .....	125

## **C Modellbildung durch Motorvermessung auf Prüfständen**

<b>6</b>	<b>Stationäre Motorvermessung mit verschiedenen Methoden und Modellen ....</b>	<b>130</b>
6.1	Versuchsplanung .....	131
6.1.1	Rastervermessung .....	132
6.1.2	Klassische Versuchspläne .....	132
6.1.3	Space-filling Designs .....	133
6.1.4	D-optimale Versuchspläne .....	134
6.2	Modellbildung .....	137
6.2.1	Polynome .....	138
6.2.2	Neuronale Netze für die stationäre Modellbildung .....	141
6.3	Modellanalyse .....	144
6.3.1	Der $F$ -Test zur Regressorselektion .....	146
6.3.2	Gütemaße zur Beurteilung stationärer Modelle .....	148
6.3.3	Resamplingverfahren .....	149
6.3.4	Umgang mit Ausreißern .....	151
6.3.5	Grafische Methoden zur Beurteilung stationärer Modelle .....	152
6.4	Optimierung der Steuerung (ein Beispiel) .....	155
6.4.1	Grundlagen evolutionärer Algorithmen .....	157
6.4.2	Mutation .....	158
6.4.3	Rekombination .....	159
6.4.4	Selektion und Nebenbedingungen .....	160
6.4.5	Optimierungsbeispiel mit evolutionären Algorithmen .....	161
6.5	Zusammenfassung .....	162
<b>7</b>	<b>Dynamische Motorvermessung mit verschiedenen Methoden und Modellen .</b>	<b>167</b>
7.1	Struktur der modellbasierten dynamischen Motorvermessung .....	168
7.2	Variationsraumvermessung .....	170
7.3	Aufstellung des Kandidatensets (Rasterung des Variationsraums) .....	171
7.4	Auswahl der Amplituden .....	172
7.4.1	D-optimale Versuchspläne .....	172
7.4.2	Raumabdeckende Versuchspläne (Space-Filling Designs) .....	173
7.5	Reihenfolge der Messpunkte für die dynamische Vermessung .....	174
7.6	Quasistationäre Motorvermessung .....	176
7.7	Generierung dynamischer Anregungssequenzen .....	179

7.7.1	Sprungfunktionen .....	179
7.7.2	Rampen .....	179
7.7.3	Pseudó-Rausch-Binár-Signale (PRBS) .....	180
7.8	Kombinierte Vermessungsstrategien .....	181
7.8.1	Einheitliches Bezeichnungsschema für dynamische Vermessungsstrategien .....	181
7.8.2	ADN – Pseudo-Rausch-Binár-Signale mit D-optimalen Amplituden	182
7.8.3	SLN – Sprünge in lokal linearen Bereichen basierend auf LOLIMOT .....	183
7.8.4	ALN – APRB-Identifikationssignal mit angepassten Amplituden ...	186
7.8.5	AEN – Dynamische Vermessung auf Basis von ECU-Stellgrößen ...	187
7.9	Dynamische Modellbildung des Verbrennungsmotors .....	187
7.9.1	Local linear model tree – LOLIMOT .....	189
7.9.2	Hinging Hyperplane Tree-Baummodelle – HHT .....	190
7.9.3	Parametrische Volterra-Reihe und Hammerstein-Modelle .....	190
7.9.4	Extraktion der Stationärwerte aus dynamischen Modellen .....	192
7.10	Modellanalyse – Geeignete Kriterien zur Gütebewertung .....	193
7.11	Anwendungsbeispiele .....	194
7.12	Zusammenfassung .....	197
<b>8</b>	<b>Implementierung von Motorvermessungsmethoden für die Prüfstandsautomatisierung .....</b>	<b>200</b>
8.1	Herausforderung in der Kalibrierung .....	200
8.2	Smart Calibration Ansatz .....	201
8.3	Methodische Lösungen .....	202
8.3.1	Besser, schneller und weniger Messen .....	202
8.3.1.1	Besser Messen .....	202
8.3.1.2	Schneller Messen .....	205
8.3.1.3	Weniger Messen .....	207
8.3.2	Arbeiten in allen Entwicklungsumgebungen .....	208
8.4	Implementierung neuer Methoden in SW-Produkte .....	209
8.5	Zusammenfassung .....	211
<b>D Modellgestützter Entwurf von Steuerung und Regelung für Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang</b>		
<b>9</b>	<b>Funktionsentwicklung und Kalibration für aufgeladene Motoren – Modellbasiert vom Konzept bis zur Serie .....</b>	<b>214</b>
9.1	Modulares Konzept der Motorsteuerung EMS 2 .....	215
9.2	Der modellbasierte Funktionsansatz .....	216
9.3	Modulare und modellbasierte Funktionen zur Aufladung am Beispiel von Serienlösungen .....	217

9.3.1	Abgasturbolader mit Wastegate .....	217
9.3.1.1	Verdichter, Turbine, Wastegate .....	219
9.3.1.2	Statische und dynamische Leistungsbilanz .....	221
9.3.1.3	Abgasgegendruck .....	222
9.3.1.4	Ladedruckregelung .....	223
9.3.2	Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) .....	223
9.3.3	Kompressoraufladung .....	227
9.4	Werkzeuge zur Simulation und Kalibration .....	229
9.5	Zusammenfassung .....	231
<b>10</b>	<b>Modellgestützte Ladedruck- und Abgasrückführ-Regelung von Dieselmotoren</b> .....	<b>233</b>
10.1	Modellbildung .....	235
10.1.1	Lokal lineare Modellstruktur .....	235
10.1.2	Parameterschätzung .....	238
10.1.3	Lokal lineare Zustandsraumdarstellung .....	239
10.1.4	Identifikation des Dieselmotors .....	239
10.2	AGR-/VTG-Regelungsentwurf .....	244
10.2.1	Vorsteuerung .....	244
10.2.2	Reglerentwurf .....	250
10.2.3	Prüfstandsergebnisse .....	253
10.3	Zusammenfassung .....	256
<b>11</b>	<b>Brennraumdruckregelung von Dieselmotoren mit homogener Kompressionszündung (HCCI)</b> .....	<b>259</b>
11.1	Die (teil-)homogene Dieselerverbrennung .....	260
11.2	Der Versuchsträger .....	262
11.3	Realisierung der homogenen Kompressionszündung an einem seriennahen Dieselmotor .....	263
11.3.1	Untersuchung der homogenen Kompressionszündung und Wahl der Regelgrößen .....	264
11.3.2	Brennraumdruckbasierte Berechnung der Verbrennungsschwerpunktlage .....	269
11.3.3	Brennraumdruckbasierte AGR-Raten-Berechnung .....	269
11.4	Modellbildung des Luftsystems zur Regelung der homogenen Dieselerverbrennung .....	271
11.4.1	Identifikation des Luftsystems des Dieselmotors .....	275
11.5	Regelung der homogenen Dieselerverbrennung .....	277
11.5.1	Entwurf einer modellbasierten Vorsteuerung zur Regelung des Luftsystems im homogenen Dieselerbetrieb .....	277
11.5.2	Regler zur Regelung des Luftsystems im homogenen Dieselerbetrieb .....	279
11.5.3	Regelung der Verbrennungsschwerpunktlage .....	280
11.6	Ergebnisse der Regelung .....	282
11.7	Zusammenfassung .....	285

<b>12 Steuerung und Regelung von Automatikgetrieben .....</b>	<b>288</b>
12.1 Auswahl des richtigen Ganges .....	288
12.2 Schaltablaufsteuerung .....	290
12.3 Geregelte Wandlerkupplung .....	296
12.4 Standabkopplung .....	302
12.5 Zukünftige Rolle des Automatikgetriebes im Antriebsstrang .....	303
12.6 Zusammenfassung .....	304
<b>E Steuerung und Optimierung von Hybrid- und Brennstoffzellen-Antrieben .....</b>	
<b>13 Energetische Bewertung von Betriebsstrategien im Hybrid-Antriebsstrang ..</b>	<b>308</b>
13.1 Eine einfache Beispielrechnung .....	309
13.2 Bewertung einzelner Hybridmodi: spezifische Kosten und Ersparnisse .....	310
13.3 Vergleich von Hybridmodi im Fahrzyklus .....	314
13.4 Prädiktive Strategie .....	316
13.5 Nichtprädiktive Strategie .....	319
13.6 Hybridmodi und Schaltung .....	321
13.7 Grenzen und Erweiterung der Methodik .....	323
13.8 Zusammenfassung .....	324
13.9 Anhang: Parametrierung des Modells .....	326
<b>14 Modellgestützte Hybrid Systementwicklung –</b>	
<b>Modellierung und Optimierung .....</b>	<b>328</b>
14.1 Verschiedene Hybridkonzepte .....	328
14.2 Modellierung und Simulation .....	330
14.3 Optimierung .....	334
14.4 Ergebnisse .....	336
14.5 Zusammenfassung .....	339
<b>15 Regelung ausgewählter Hybridtopologien: parallel und leistungsverzweigt ...</b>	<b>341</b>
15.1 Hybridantrieb im Allgemeinen .....	341
15.2 Anforderungen an die Betriebsstrategie .....	343
15.2.1 Energie- und Leistungsmanagement-Funktionen .....	343
15.2.2 Drehmomentpfad- und Gangsynchronisations-Funktionen .....	344
15.2.3 Hardwarespezifische Maßnahmen .....	344
15.3 Softwareentwicklungsprozess .....	345
15.4 Steuerung und Regelung des Hybridantriebsstrangs .....	346
15.4.1 Genereller Funktionsumfang .....	346
15.4.1.1 Steuergerätexterne Berechnung (Offline) .....	346
15.4.1.2 Steuergerätinterne Berechnung (Online) .....	347
15.4.2 Parallel-Antrieb .....	347
15.4.2.1 Systemarchitektur .....	347
15.4.2.2 Funktionsumfänge .....	348

15.4.2.3	Koordination .....	349
15.4.2.4	Versuch .....	350
15.4.3	Leistungsverzweigter Antrieb .....	351
15.4.3.1	Systemarchitektur .....	351
15.4.3.2	Funktionsumfänge .....	353
15.4.3.3	Koordination .....	356
15.4.3.4	Versuch .....	359
15.5	Zusammenfassung .....	361
<b>16</b>	<b>Modellbasierte Steuerung, Regelung und Diagnose von Brennstoffzellenantrieben .....</b>	<b>363</b>
16.1	Die Umweltstrategie von General Motors .....	363
16.2	Die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb: Funktionsweise .....	365
16.3	Steuerung und Regelung des Brennstoffzellenantriebs .....	367
16.4	Modellgestützte Betriebsweise und Fehlerdiagnose .....	370
16.4.1	Rekonstruktion nicht oder schwer messbarer Größen .....	371
16.4.2	Modellgestützte Diagnosen .....	371
16.4.3	Anwendungsbeispiel 1: Pumpendiagnose mittels Volumenstrombestimmung im Kühlkreislauf .....	372
16.4.4	Anwendungsbeispiel 2: Modellbasierte Bestimmung des Stickstoffanteils im Anodenkreis .....	375
16.5	Steuerungs- und Software-Entwicklungsmethodik .....	381
16.5.1	Einsatz der Simulationstechnik in der Vorentwicklungsphase .....	381
16.5.2	Einsatz der Simulationstechnik in der Produktentwicklungsphase ...	382
16.5.3	Controller Tests an HIL-Simulatoren .....	383
16.5.4	Echtzeitsimulationsumgebungen an Testständen .....	384
16.6	Zusammenfassung .....	384
<b>F Diagnose von Verbrennungsmotoren</b>		
<b>17</b>	<b>Diagnoseentwicklungsmethodik am Beispiel Dieselsystem .....</b>	<b>388</b>
17.1	Status Quo .....	388
17.2	Entwicklungsmethodik bei der On-Board Diagnose .....	391
17.2.1	Prozesselemente der OBD Entwicklung im Systementwicklungsprozess .....	392
17.2.2	System-Anforderungsanalyse und Konzeptentwicklung .....	392
17.2.3	Systementwicklungsunterstützende Elemente und integrierte Entwicklung .....	393
17.2.4	Systemfreigabe Plattform .....	393
17.3	Entwicklungsmethodik Werkstattdiagnose .....	394
17.3.1	Systementwicklung Werkstattdiagnose .....	394
17.3.2	Systemintegration Werkstattdiagnose .....	398



17.4	Toolunterstützung im Diagnose-Entwicklungsprozess .....	400
17.4.1	Toolunterstützung für die DMA .....	401
17.4.2	Entwicklungsumgebung für testerbasierte Diagnosefunktionen und Diagnosesequenzen .....	403
17.4.3	Standardisierte Prüfsprache zum Austausch von Diagnoseinhalten ..	404
17.5	Zusammenfassung .....	405
<b>18</b>	<b>Modellgestützte Fehlerdiagnose eines DI-Benzinmotors .....</b>	<b>408</b>
18.1	Fehlererkennung im Ansaug- und Abgassystem .....	409
18.1.1	Modellierung mit lokallinearen Netzmodellen .....	410
18.1.2	Erzeugen von Residuen und Symptomen .....	411
18.1.3	Betriebspunktabhängige Fehlererkennung .....	412
18.1.4	Diagnose im Ansaug- und Abgassystem .....	415
18.2	Fehlererkennung im Raildrucksystem .....	416
18.2.1	Waveletanalyse des Raildrucksignals .....	417
18.2.2	Analyse des Drehzahlsignals .....	419
18.2.3	Fehlererkennung und -diagnose im Raildrucksystem .....	420
18.3	Fehlererkennung im Zündungssystem .....	421
18.4	Gesamtdiagnosesystem .....	423
18.5	Zusammenfassung .....	423
<b>19</b>	<b>Modellgestützte Fehlererkennung und Diagnose für Common-Rail-Einspritzsysteme .....</b>	<b>426</b>
19.1	Modellbasierte Fehlererkennung und Diagnose .....	426
19.1.1	Grundlagen .....	426
19.2	Fehlererkennungsmodul „Common-Rail-Einspritzsystem“ .....	429
19.2.1	Druckaufbau im Hochdruckspeicher .....	430
19.2.1.1	Volumenstrom von der Hochdruckpumpe .....	432
19.2.1.2	Volumenstrom durch das Druckregelventil .....	434
19.2.1.3	Volumenströme zu den Injektoren .....	435
19.2.2	Analyse des Common-Rail-Drucksensorsignals .....	437
19.2.3	Modellbasierte Fehlererkennungsalgorithmen .....	442
19.2.3.1	Residuum „Mittlerer Common-Rail-Druck“ .....	443
19.2.3.2	Gleichmäßigkeitsresiduen .....	445
19.2.3.3	Residuum „Kraftstoffförderung“ .....	445
19.2.4	Versuchsergebnisse .....	446
19.2.5	Anwendbarkeit des Fehlererkennungsmoduls bei unterschiedlicher Systemkonfiguration .....	449
19.3	Zusammenfassung und Ausblick .....	452
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>455</b>