

*Behrooz Mashadi*  
*David Crolla*

# **Antriebsstrangsysteme in Kraftfahrzeugen**

Übersetzt von Kurt Wener

**WILEY-VCH**  
Verlag GmbH & Co. KGaA

## Inhaltsverzeichnis

**Die Autoren** XV

**Vorwort** XVII

**Abkürzungen** XIX

<b>1</b>	<b>Fahrzeugantriebskonzepte</b>	<b>1</b>
1.1	Antriebskonzepte	1
1.1.1	Systemansatz	2
1.1.2	Geschichtliches	3
1.1.3	Herkömmliche Antriebe	4
1.1.4	Hybridantriebe	4
1.2	Antriebskomponenten	6
1.2.1	Verbrennungsmotor	7
1.2.2	Kraftübertragung	7
1.2.3	Fahrzeugaufbau	7
1.2.4	Systemfunktionen	7
1.3	Fahrzeugleistung	8
1.4	Verhalten des Fahrers	12
1.5	Die Bedeutung der Modellierung	13
1.6	Ziel dieses Buches	15
1.7	Allgemeines zu den Literaturhinweisen	15
	Literatur	16
<b>2</b>	<b>Merkmale der Leistungserzeugung bei Verbrennungsmotoren</b>	<b>17</b>
2.1	Einleitung	17
2.2	Grundprinzipien der Leistungserzeugung beim Verbrennungsmotor	18
2.2.1	Betriebsarten von Verbrennungsmotoren	18
2.2.2	Der Verbrennungsvorgang	22
2.2.3	Betrachtung der Thermodynamik des Verbrennungsmotors	25
2.2.4	Merkmale der Motorleistungsabgabe	42

2.2.5	Variationen des Zylinderdrucks	44
2.3	Modellierung von Verbrennungsmotoren	48
2.3.1	Maschinenkinetik	49
2.3.2	Motordrehmoment	59
2.3.3	Ein vereinfachtes Modell	67
2.3.4	Das Schwungrad	77
2.4	Mehrzylindermotoren	81
2.4.1	Zündfolge	81
2.4.2	Motordrehmoment	85
2.4.3	Annähernd gleichförmiges Motordrehmoment	90
2.5	Drehmomentkennfelder	93
2.5.1	Motorenprüfstände	94
2.5.2	Rollenprüfstände	96
2.5.3	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien	98
2.6	Zauberformel des Motordrehmoments	105
2.6.1	Konvertierung von Teillastkurven	106
2.6.2	Die MT-Formel	107
2.6.3	Auswertung	108
2.7	Motormanagementsystem	109
2.7.1	Aufbau	110
2.7.2	Sensoren	111
2.7.3	Kennfelder und Look-up-Tabellen	112
2.7.4	Kalibrierung	114
2.8	Ausgangsleistung	115
2.8.1	Mechanischer Wirkungsgrad des Motors	116
2.8.2	Antriebe von Nebenaggregaten	117
2.8.3	Auswirkung durch Umgebungsbedingungen	118
2.9	Fazit	127
2.10	Wiederholungsfragen	128
2.11	Aufgaben	129
2.12	Weiterführende Literatur	132
	Literatur	133
<b>3</b>	<b>Dynamik der longitudinalen Bewegung von Fahrzeugen</b>	<b>135</b>
3.1	Einleitung	135
3.2	Drehmomenterzeuger	135
3.2.1	Verbrennungskraftmaschinen	136
3.2.2	Elektromotoren	137
3.3	Traktionskraft	139
3.3.1	Entstehung der Reifenkraft	140
3.3.2	Mathematische Beziehungen für die Traktionskraft	144
3.3.3	Traktionskurven	150
3.4	Widerstandskräfte	152
3.4.1	Rollwiderstand	153
3.4.2	Aerodynamik des Fahrzeugs	157

- 3.4.3 Steigungen/Gefälle 162
- 3.4.4 Gegenkraftdiagramme 164
- 3.4.5 Ausrolltest 164
- 3.5 Fahrzeug-Performance bei konstanter Leistung (CPP) 166
  - 3.5.1 Maximale Leistungsabgabe 166
  - 3.5.2 Annahme einer stufenlosen Übersetzung 167
  - 3.5.3 Geltende Gleichungen 170
  - 3.5.4 Lösung der geschlossener Form 173
  - 3.5.5 Numerische Lösungen 174
  - 3.5.6 Leistungsanforderungen 177
  - 3.5.7 Fahrzeit und Fahrstrecke 180
  - 3.5.8 Höchstgeschwindigkeit 184
- 3.6 Performance bei konstantem Drehmoment (CTP) 187
  - 3.6.1 Lösung der geschlossener Form 188
  - 3.6.2 Numerische Lösungen 191
- 3.7 Performance mit fest vorgegebener Last (FTP, Fixed Throttle Performance) 196
  - 3.7.1 Schaltvorgang und Traktionskraft 197
  - 3.7.2 Beschleunigung, Geschwindigkeit und Fahrstrecke 200
  - 3.7.3 Schaltzeitpunkte 204
  - 3.7.4 Maximaldrehzahl in jedem Gang 205
  - 3.7.5 Optimale Beschleunigungs-Performance 208
  - 3.7.6 Leistungsaufnahme 210
- 3.8 Gaspedalzyklusleistung (PCP, Pedal Cycle Performance) 213
- 3.9 Wirkung rotierender Massen 215
  - 3.9.1 Korrekturen an den vorherigen Analysen 222
- 3.10 Reifenschlupf 224
- 3.11 Performance an Steigungen 227
  - 3.11.1 Fahrzeug-Performance bei konstanter Leistung (CPP) 228
  - 3.11.2 Performance bei konstantem Drehmoment (CTP) 229
  - 3.11.3 Performance bei unveränderlichem Drosselwert (FTP) 231
  - 3.11.4 Variable Steigungen 233
- 3.12 Ausrollversuche 233
  - 3.12.1 Konstanter Rollwiderstand 235
  - 3.12.2 Rollwiderstand als Funktion der Geschwindigkeit 238
  - 3.12.3 Trägheit rotierender Massen 240
- 3.13 Verluste im Antriebsstrang 243
  - 3.13.1 Wirkungsgrade der Komponenten 243
  - 3.13.2 Umkehrung des Drehmomentflusses 247
  - 3.13.3 Wirkung des Rollwiderstands 248
- 3.14 Fazit 249
- 3.15 Wiederholungsfragen 250
- 3.16 Aufgaben 251
- 3.17 Weiterführende Literatur 261
  - Literatur 262

- 4 Kraftübertragung 263**
  - 4.1 Einleitung 263
  - 4.2 Notwendigkeit eines Getriebes 263
  - 4.3 Auslegung der Getriebeübersetzungen 266
    - 4.3.1 Niedrigste Gangstufe 266
    - 4.3.2 Höchste Gangstufe 273
    - 4.3.3 Gangabstufungen 281
    - 4.3.4 Sonstige Einflussfaktoren 291
  - 4.4 Getriebekinematik und Zähnezahlen 293
    - 4.4.1 Standardverzahnung 295
    - 4.4.2 Planetengetriebe 299
  - 4.5 Manuelle Schaltgetriebe 303
    - 4.5.1 Aufbau und Betrieb 303
    - 4.5.2 Trockenkupplungen 306
    - 4.5.3 Membranfedern 318
    - 4.5.4 Dynamische Vorgänge beim Einkuppeln 330
  - 4.6 Automatische Getriebe 357
    - 4.6.1 Konventionelle Automatikgetriebe 358
    - 4.6.2 Automatisierte Handschaltgetriebe 362
    - 4.6.3 Doppelkupplungsgetriebe (DCT) 363
  - 4.7 Stufenlose Getriebe 369
    - 4.7.1 Klassifizierung 370
    - 4.7.2 Reib-CVTs 371
    - 4.7.3 Ratschen-CVTs 374
    - 4.7.4 Nicht mechanische CVTs 376
    - 4.7.5 Leerlauf und Start 378
  - 4.8 Fazit 378
  - 4.9 Wiederholungsfragen 379
  - 4.10 Aufgaben 380
  - 4.11 Weiterführende Literatur 389
    - Literatur 390
  
- 5 Kraftstoffverbrauch 391**
  - 5.1 Einleitung 391
  - 5.2 Energieverbrauch des Verbrennungsmotors 392
    - 5.2.1 BSFC-Kennfelder 392
    - 5.2.2 Spezifischer Kraftstoffverbrauch und Motorwirkungsgrad 395
  - 5.3 Fahrzyklen 396
    - 5.3.1 Typische Fahrzyklen 398
    - 5.3.2 Berechnungen 399
    - 5.3.3 Fahrzeugtests 402
  - 5.4 Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs 402
    - 5.4.1 Berechnung des Kraftstoffverbrauchs ohne Kennfeld 405
    - 5.4.2 Berechnung des Kraftstoffverbrauchs mit Kennfeld 409
    - 5.4.3 Wirkung rotierender Massen 413

- 5.5 Effekte der Schaltvorgänge 414
  - 5.5.1 Wirkung des Schaltvorgangs auf die EOP 414
  - 5.5.2 Effiziente Betriebspunkte 419
- 5.6 Software 424
  - 5.6.1 Lösungskonzepte 424
  - 5.6.2 ADVISOR® 426
- 5.7 Automatisierte Schaltvorgänge 427
  - 5.7.1 Zustand des Motors 428
  - 5.7.2 Absichten des Fahrers 428
  - 5.7.3 Kombinierte Schaltvorgänge 429
  - 5.7.4 Steuergerät 429
  - 5.7.5 Vielganggetriebekonzept 430
- 5.8 Andere Lösungen zur Kraftstoffeffizienz 431
  - 5.8.1 Verbesserungen an Antriebskomponenten 432
  - 5.8.2 Leichtbaufahrzeuge 433
  - 5.8.3 Der Verbrennungsmotor 435
  - 5.8.4 Kraftübertragung 436
- 5.9 Fazit 438
- 5.10 Wiederholungsfragen 439
- 5.11 Aufgaben 440
- 5.12 Weiterführende Literatur 444
  - Literatur 446
  
- 6 Dynamik des Antriebsstrangs 447**
  - 6.1 Einleitung 447
  - 6.2 Modellierung der Antriebsdynamik 448
    - 6.2.1 Modellierungsverfahren 448
    - 6.2.2 Lineare und nicht lineare Modelle 451
    - 6.2.3 Softwarenutzung 452
  - 6.3 Bondgraph-Modelle von Antriebskomponenten 453
    - 6.3.1 Der Motor 453
    - 6.3.2 Die Kupplung 454
    - 6.3.3 Das Getriebe 455
    - 6.3.4 Kardan- und Antriebswellen 456
    - 6.3.5 Das Differenzial 457
    - 6.3.6 Das Rad 459
    - 6.3.7 Fahrzeug 460
  - 6.4 Modelle des Antriebsstrangs 460
    - 6.4.1 Vollständiges Modell des Antriebsstrangs 461
    - 6.4.2 Geradeausfahrt 461
    - 6.4.3 Starrkörpermodell 462
    - 6.4.4 Antriebsstrang mit Nachgiebigkeit der Kupplung 464
    - 6.4.5 Antriebsstrang mit Nachgiebigkeit der Antriebswellen 464
    - 6.4.6 Antriebsstrang mit Nachgiebigkeit in Kupplung und Antriebswellen 465

6.5	Analyse	466
6.5.1	Effekt der Kupplungsnachgiebigkeit	467
6.5.2	Wirkung der Nachgiebigkeit der Antriebswelle	469
6.5.3	Wirkung von Kupplungs- und Antriebswellennachgiebigkeit	473
6.5.4	Frequenzgänge	476
6.5.5	Verbesserungen	483
6.6	Fazit	484
6.7	Wiederholungsfragen	484
6.8	Aufgaben	485
6.9	Weiterführende Literatur	490
	Literatur	490

<b>7</b>	<b>Hybridelektrische Fahrzeuge</b>	<b>491</b>
7.1	Einleitung	491
7.2	Arten von hybridelektrischen Fahrzeugen	492
7.2.1	Grundlegende Klassifizierung	492
7.2.2	Grundlegende Betriebsarten	495
7.2.3	Sonstige Derivate	496
7.2.4	Hybridisierungsgrad	501
7.3	Power-split-Vorrichtungen	503
7.3.1	Einfache PSD	503
7.3.2	EM-Verbund-PSD	513
7.4	HEV-Komponenteneigenschaften	522
7.4.1	Der Verbrennungsmotor	523
7.4.2	Elektrische Maschinen	523
7.4.3	Die Batterie	528
7.5	HEV-Leistungsanalyse	538
7.5.1	Seriell-HEV	538
7.5.2	Parallel-HEV	543
7.6	Dimensionierung von HEV-Komponenten	545
7.6.1	Allgemeine Überlegungen	548
7.6.2	Performance-Auslegung	550
7.6.3	Optimale Dimensionierung/Auslegung	576
7.7	Leistungsmanagement	578
7.7.1	Steuerungspotenzial	579
7.7.2	Steuerung	585
7.8	Fazit	587
7.9	Wiederholungsfragen	588
7.10	Aufgaben	589
7.11	Weiterführende Literatur	591
	Literatur	592

**Anhang: Einführung in die Modellierung mit Bondgraphen 593**

A.1	Grundlegendes Konzept	593
A.2	Standardelemente	594

A.2.1	Quellen	594
A.2.2	Passive Elemente	595
A.2.3	Zweiter-Elemente	596
A.2.4	Junctions	599
A.3	Erstellen von Bondgraphen	600
A.4	Bewegungsgleichungen	603
A.4.1	Kausalität	603
A.4.2	Vorgehensweise bei der Zuweisung	605
A.4.3	Nummerierung von Bondgraphen	606
A.4.4	Komponentengleichungen	607
A.4.5	Vereinfachen von Bondgraphen	607
A.4.6	Ableitung der Bewegungsgleichungen	608

<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>613</b>
-----------------------------	------------