

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen

1	Einleitung	1
2	Grundgrößen und Einheiten	7
2.1	Basisgrößen und Basiseinheiten	7
2.2	Weitere Grundgrößen	8
2.3	Bezeichnungen für Vielfache und Teile von Einheiten	9
2.4	Physikalische Konstanten	9
3	Mechanische Grundlagen	13
3.1	Einfache Bewegungsgleichungen	13
3.2	Ausführungsformen von Getrieben	15
3.2.1	Begriffe und Zusammenhänge	15
3.2.2	Stufenlose Getriebe	16
3.2.3	Differenzialgetriebe	17
3.2.4	Sperrdifferenzialgetriebe	19
3.2.5	Planetengetriebe	19
3.3	Schaltgetriebe	22
3.3.1	Automatisierte Betätigung des Schaltgetriebes	22
3.4	Kupplung	23
3.4.1	Die fußbetätigte lösbare Kupplung	23
3.5	Reibung und Kräfte auf die Räder	23
3.5.1	Reibung	23
3.5.1.1	Haftreibung	23
3.5.1.2	Gleitreibung	24

3.5.1.3	Reibungskoeffizienten	24
3.5.2	Kräfte am Rad	25
3.5.2.1	Druckverteilung am Rad	25
3.5.2.2	Bewegungsgleichungen für ein belastetes Rad	25
3.5.3	Kammscher Reibungskreis	26
3.6	Fahrwiderstände und -kräfte	27
3.6.1	Rollwiderstand	28
3.6.2	Luftwiderstand	28
3.6.3	Steigungswiderstand	28
3.6.4	Beschleunigungswiderstand	29
3.6.5	Kraft-, Leistungs- und Energiebedarf	29
3.7	Fahrzyklen	30
3.7.1	Reduktion der maximal erforderlichen Antriebsleistung	30
4	Grundlagen der Wärmelehre, Kreisprozesse	33
4.1	Zustandsänderungen idealer Gase	33
4.2	Hauptsätze der Wärmelehre	36
4.2.1	Erster Hauptsatz der Wärmelehre	36
4.2.2	Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre	37
4.2.3	Hauptgleichungen der Wärmelehre	37
4.3	Kreisprozesse	38
4.3.1	Carnot-Prozess	38
4.3.2	Joule-Prozess	40
4.3.3	Gleichraum-Prozess, idealer Otto-Prozess	41
4.3.4	Gleichdruck-Prozess, idealer Diesel-Prozess	43
4.3.5	Weitere Kreisprozesse	45
4.3.6	Exergie	45
5	Grundlagen der Elektrotechnik	47
5.1	Grundlagen des elektrischen Feldes	47
5.1.1	Elektrische Feldstärke, Elektrische Spannung	47
5.1.2	Elektrische Flussdichte, Elektrische Ladung	49
5.1.3	Elektrischer Strom	51
5.1.4	Kondensatoren, Kapazität	52

5.1.4.1	Parallelschaltung von Kondensatoren	53
5.1.4.2	Serienschaltung von Kondensatoren	53
5.1.5	Elektrischer Widerstand	54
5.1.6	Ohmsches Gesetz	54
5.1.7	Kirchhoffsche Gesetze	55
5.1.7.1	Erstes Kirchhoff-Gesetz	55
5.1.7.2	Zweites Kirchhoff-Gesetz	56
5.1.7.3	Serienschaltung von Widerständen	57
5.1.7.4	Parallelschaltung von Widerständen	57
5.1.8	Elektrische Leistungsdichte, Elektrische Leistung . . .	58
5.1.9	Elektrische Energiedichte, Elektrische Energie	58
5.2	Grundlagen des magnetischen Feldes	59
5.2.1	Magnetisches Feld und bewegte Ladungen	59
5.2.2	Magnetisches Feld und stromdurchflossene Leiter . . .	61
5.2.3	Magnetische Flussdichte, Magnetischer Fluss	63
5.2.4	Faradaysches Induktionsgesetz	64
5.2.5	Spulen, Induktivität	66
5.2.5.1	Zylinderförmige Luftspule	66
5.2.5.2	Torusförmige Luftspule	67
5.2.5.3	Induktivität einer Spule	68
5.2.5.4	Selbstinduktion, Lenzsche Regel	69
5.2.5.5	Selbstinduktivität, Gegeninduktivität	69
5.2.6	Magnetische Energiedichte, Magnetische Energie . . .	70
5.2.7	Wirkungen des magnetischen Feldes	71
5.3	Berechnung magnetischer Kreise	72
5.3.1	Analogie zum elektrischen Stromkreis	73
5.3.2	Magnetischer Kreis mit Permanentmagneten	74
5.3.2.1	Einfluss der Temperatur	76
5.3.2.2	Feldschwächung, Entmagnetisierung	77
5.4	Harmonische Wechselgrößen und Wechselstromkreise	80
5.4.1	Harmonische Wechselgrößen	80
5.4.2	Wirk-, Blind- und Scheinleistung	82
5.4.3	Kirchhoffsche Gesetze im Wechselstromkreis	84
5.4.4	Schaltungselemente im Wechselstromkreis	85

5.4.4.1	Ohmscher Widerstand, Ohmscher Leitwert .	86
5.4.4.2	Ideale Spule, ideale Induktivität	87
5.4.4.3	Idealer Kondensator, ideale Kapazität	88
5.4.5	Komplexe Impedanz, komplexe Admittanz	89
5.4.5.1	Serienschaltung, Parallelschaltung	91
5.4.5.2	Serienschaltung von Widerstand und Spule, reale Spule	91
5.4.5.3	Ortskurven von Strom und Spannung	93
5.5	Drehspannungs-, Drehstrom- oder Dreiphasensysteme	94
5.5.1	Wirk-, Blind- und Scheinleistung im Dreiphasensystem	97
5.6	Komplexe Raumzeiger	98
5.6.1	Unterschiede zwischen Zeitzeigern und Raumzeigern .	101

II Antriebe und Regelung

6	Thermische Antriebsmaschinen	103
6.1	Verbrennungsmotoren	104
6.1.1	Kenngrößen von Verbrennungsmotoren	104
6.1.1.1	Definition von Mitteldruckwerten in den Zylindern	104
6.1.1.2	Indizierte Leistung	105
6.1.1.3	Effektive Leistung an der Kurbelwelle	106
6.1.1.4	Kraftstoffverbrauch	106
6.1.1.5	Muscheldiagramme	108
6.1.2	Gemischbildung	109
6.1.2.1	Innere Gemischbildung	109
6.1.2.2	Äußere Gemischbildung	109
6.2	Hubkolbenmotoren	109
6.2.1	Otto-Motoren	109
6.2.1.1	Otto-Viertaktmotoren	110
6.2.1.2	Realer Otto-Prozess	111
6.2.1.3	Otto-Zweitaktmotoren	112
6.2.2	Diesel-Motoren	113
6.2.2.1	Diesel-Viertaktmotoren	114

6.2.2.2	Realer Diesel-Prozess	115
6.2.2.3	Diesel-Zweitaktmotoren	116
6.2.3	Gasmotoren	117
6.3	Drehkolbenmotoren, Wankelmotoren	117
6.3.1	Aufbau, Wirkungsweise	117
6.4	Stirlingmotoren	119
6.4.1	Aufbau, Wirkungsweise	119
6.4.2	Stirling-Prozess	119
6.5	Gasturbinen, Gasturbinenprozess	122
6.5.1	Aufbau, Wirkungsweise	122
6.5.2	Einsatz im mobilen Bereich	123
7	Elektrische Maschinen	125
7.1	Grundbegriffe	125
7.2	Erwärmung elektrischer Maschinen	128
7.2.1	Erwärmungsgleichung, thermische Zeitkonstante . . .	128
7.2.2	Isolierstoffklassen	129
7.2.3	IndexLebensdauer, Montsingersche Regel	130
7.3	Betriebsarten elektrischer Maschinen	131
7.3.1	Genormte Betriebsarten	131
7.3.2	Verlustverhältnis	132
7.4	Kühlung elektrischer Maschinen	134
7.4.1	Wärmetransport	134
7.4.1.1	Wärmeleitung	134
7.4.1.2	Wärmeübergang, Wärmedurchgang	135
7.4.1.3	Wärmestrahlung	137
7.4.2	Wärmeabfuhr	137
7.4.2.1	Wärmetauscher	137
7.4.2.2	Wärmerohrkühlung	138
7.4.2.3	Siedekühlung	139
7.4.3	Kühlungsarten elektrischer Maschinen	140
7.5	Bauformen und Schutzarten elektrischer Maschinen	141
7.5.1	Bauformen elektrischer Maschinen	141
7.5.2	Schutzarten elektrischer Maschinen	142

7.6	Transformatoren	143
7.6.1	Einphasen-Transformatoren	143
7.6.1.1	Spannungsgleichungen, Ersatzschaltbild . . .	144
7.6.1.2	Übersetzungsverhältnis, Magnetisierungsstrom	146
7.6.1.3	Beschreibung mit komplexen Zeitzeigern . .	147
7.6.1.4	Vereinfachtes Ersatzschaltbild	148
7.6.2	Drehstrom-Transformatoren	149
7.6.3	Schaltgruppe von Transformatoren	150
7.7	Gleichstrommaschinen	151
7.7.1	Aufbau, Wirkungsweise	151
7.7.2	Spannung, Drehmoment, Leistung	155
7.7.2.1	Innere Spannung	156
7.7.2.2	Inneres Drehmoment	159
7.7.2.3	Innere Leistung	160
7.7.3	Drehzahlstellung von Gleichstrommaschinen	160
7.7.3.1	Anwendungen in Elektro- und Kraftfahrzeugen	161
7.8	Drehfeldmaschinen	163
7.8.1	Drehfeldwicklung und Erzeugung eines Drehfelds . . .	163
7.8.2	Asynchronmaschinen (ASM)	167
7.8.2.1	Entwicklung des Drehmoments	167
7.8.2.2	Rotorbauformen	169
7.8.2.3	Leistungsbilanz und Drehmoment	170
7.8.2.4	Ersatzschaltbild	173
7.8.2.5	Ortskurve des Statorstroms, Drehmoment . .	175
7.8.2.6	Kennlinien bei Stromrichterspeisung	180
7.8.3	Synchronmaschinen (SM)	181
7.8.3.1	Bauarten, Wirkungsweise	181
7.8.3.2	Vollpol-Synchronmaschine	184
7.8.3.3	Schenkelpol-Synchronmaschine	188
7.8.3.4	Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM, PMSM)	192
7.8.3.5	Reluktanzmaschinen (RM, RSM)	197
7.8.3.6	Synchrongenerator im Inselbetrieb	198

7.8.3.7	Kennlinien bei Stromrichterspeisung	200
7.8.4	Weitere Typen von Synchronmaschinen	201
7.8.4.1	Geschaltete Reluktanzmaschine, Switched Reluctance Machine (SRM)	201
7.8.4.2	Multipol-Synchronmaschinen	204
7.8.4.3	Transversalfluss-Synchronmaschine (TF-SM)	206
7.8.5	Sonderbauarten	211
7.8.5.1	Maschinen mit Zahnwicklung	211
7.8.5.2	Maschinen mit Außenrotor	212
7.8.5.3	Axialflussmaschinen	213
7.8.5.4	Radnabenmaschinen	214
7.8.5.5	Integrierte Starter-Generator-Systeme (ISG)	214

8 Grundlagen der Leistungselektronik 217

8.1	Wichtige Halbleiter-Bauelemente	218
8.1.1	Dioden	218
8.1.2	Thyristoren	218
8.1.3	Abschalt- oder GTO-Thyristoren	220
8.1.4	IGC-Thyristoren (IGCT)	221
8.1.5	Bipolare Leistungstransistoren	221
8.1.6	MOS-Feldeffekt-Transistoren (MOSFET)	222
8.1.7	IGB-Transistoren (IGBT)	222
8.2	Wichtige Schaltungen der Leistungselektronik	222
8.2.1	Mittelpunkt- und Brücken-Schaltungen	222
8.2.1.1	Glättung des Gleichstroms	224
8.2.1.2	Kommutierung	224
8.2.2	Bordversorgung mit Klauenpolgenerator	225
8.2.3	M3-Schaltung mit Thyristoren	226
8.3	Gleichstromsteller, Gleichstromwandler	228
8.3.1	Einquadrantensteller	228
8.3.1.1	Fahrschaltung	228
8.3.1.2	Nutzbremsschaltung	229
8.3.2	Vierquadrantensteller	229
8.3.2.1	Steuerung Variante 1	231

8.3.2.2	Steuerung Variante 2	231
8.3.2.3	Vergleich der beiden Steuerungen	231
8.3.3	Abwärts- und Aufwärts-Gleichspannungswandler	233
8.3.3.1	Abwärtswandler	234
8.3.3.2	Aufwärtswandler	234
8.4	Wechselrichter	237
8.4.1	Wechselrichter mit Vollblocksteuerung	238
8.4.2	Raumzeigerdarstellung und Vollblocksteuerung	240
8.4.3	Pulswechselrichter	242
8.5	Umrichter	246
8.6	Einsatz von Pulsstromrichtern im mobilen Bereich	248
8.6.1	Fahr- und Bremsschaltungen für Drehfeldmaschinen	248
8.6.2	Serienhybridantrieb mit Pulsstromrichter	249
8.6.3	Wirkungsgrad von Pulsstromrichter und Drehfeldmaschine	250
9	Regelung von elektrischen Antrieben	253
9.1	Der einfache Regelkreis	253
9.2	Grundtypen von Reglern	254
9.2.1	P-Glied	255
9.2.2	I-Glied	255
9.2.3	D-Glied	256
9.2.4	PI-Glied	256
9.2.5	PD-Glied	256
9.2.6	PID-Glied	257
9.3	Realisierung einfacher Regler	257
9.3.1	Operationsverstärker	257
9.3.2	Idealer Operationsverstärker	257
9.3.3	Invertierende Schaltung	258
9.3.4	Umkehraddierer	259
9.3.5	P-Regler	259
9.3.6	Nichtinvertierende Schaltung	259
9.3.7	PI-Regler	260
9.3.8	PID-Regler	260

9.4	Drehzahlregelung von Gleichstrommaschinen	261
9.5	Drehzahlregelung von Drehfeldmaschinen	262
9.5.1	Vektorregelung, Feldorientierte Regelung	262
9.5.2	Koordinatensysteme	262
9.5.3	Drehzahlregelung einer Asynchronmaschine	263
9.5.4	Drehzahlregelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine	264
9.5.5	Sensorlose Drehzahlregelung von Drehfeldmaschinen	264

III Energiespeicher und Kraftstoffe

10	Elektrochemische Energiespeicher	267
10.1	Allgemeines	267
10.2	Begriffe und Grundlagen	268
10.2.1	Faradaysche Gesetze	271
10.2.2	Theoretische Energiedichte	272
10.2.3	Voltaische Spannungsreihe	273
10.2.4	Voltazelle, Voltaelement	273
10.3	Batteriesysteme, Zellsysteme	276
10.3.1	Blei-Säure-Batterie (Pb-Säure-Akku)	276
10.3.2	Nickel-Batterien	278
10.3.2.1	Nickel-Kadmium-Batterie (Ni-Cd-Akku)	278
10.3.2.2	Nickel-Eisen-Batterie (Ni-Fe-Akku)	280
10.3.2.3	Nickel-Metallhydrid-Batterie (Ni-MH-Akku)	281
10.3.3	Lithium-Batteriesysteme	282
10.3.3.1	Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion-Zelle)	283
10.3.3.2	Lithium-Polymer-Batterie (Li-Po-Zelle)	284
10.3.3.3	Lithiumtitanat-Lithiumtitanoxid-Batterie	285
10.3.4	Hochtemperatur-Batteriesysteme	286
10.3.4.1	Natrium-Schwefel-Batterie (Na-S-Zelle)	286
10.3.4.2	Natrium-Nickelchlorid-Batterie (Na-NiCl ₂ - Zelle)	288
10.3.5	Zink-Brom-Batteriesysteme (Zn-Br-Zelle)	290

10.3.6	Redox-Flow-Batteriesysteme	292
10.3.6.1	Vanadium-Redox-Flow-Batterie	293
10.3.7	Vergleich einiger Batteriesysteme	294
10.4	Batteriesysteme im mobilen Bereich	294
10.4.1	Anwendungen in der Elektrotraktion	294
10.4.2	Hybridantriebe	296
10.4.3	Batterieanlagen und Nutzung regenerativer Energiequellen	296
11	Energiespeicherung mit Kondensatoren	299
11.1	Bauformen von Kondensatoren	299
11.1.1	Plattenkondensator	299
11.1.2	Elektrolyt-Kondensator	300
11.1.3	Doppelschicht-Kondensator (DSK)	301
11.2	Kondensator als Energiespeicher	303
11.2.1	Laden eines Kondensators	303
11.2.2	Energiespeicherung	305
11.2.3	Entladen eines Kondensators	305
11.2.4	Laden und Entladen mit konstantem Strom	306
11.2.5	Energieumsetzung, maximale Leistungsabgabe	307
11.3	Kondensatoren im mobilen Bereich	308
11.3.1	Verwendung in Fahrzeugen	308
11.3.2	Netzstabilisierung von Nahverkehrssystemen	309
12	Pneumatische und Hydropneumatische Speicher	311
12.1	Druck(gas/luft)speicher für den mobilen Einsatz	311
12.1.1	Druckgasbehälter	311
12.1.2	Energie, Exergie, Wirkungsgrad	312
12.1.2.1	Energie, Energiedichte	312
12.1.2.2	Isochore Abkühlung	313
12.1.2.3	Exergieverlust	314
12.1.2.4	Exergiewirkungsgrad, Speicherwirkungsgrad	315
12.1.3	Druckluftauto	315
12.1.4	Druckluftspeichersystem mit Hydraulik- und Pneumatik-Komponenten	316

12.2	Hydropneumatische Speicher	317
12.2.1	Bauformen, Wirkungsweise	317
12.2.2	Einsatzmöglichkeiten	318
12.2.3	Kennlinien, Kenngrößen	319
13	Schwungradspeicher	323
13.1	Physikalische Grundlagen	323
13.1.1	Beanspruchungen in einem rotierenden dünnen Ring .	324
13.1.2	Energiedichte eines Schwungradspeichers	325
13.2	Schwungradspeicher im mobilen Einsatz	326
13.2.1	Gyrobusse	326
13.2.2	Einsatz von Schwungrädern in dieselektrischen Fahr- zeugen	327
14	Brennstoffzellen	329
14.1	H ₂ /O ₂ -Brennstoffzelle	329
14.1.1	PEM-H ₂ /O ₂ -Brennstoffzelle	330
14.2	Methanol-Brennstoffzelle	333
14.2.1	Methanol-Brennstoffzellen-System	334
14.2.2	Direkte Methanol-Brennstoffzelle (DMBZ,DMFC) . .	335
14.3	Hybridbetrieb von Brennstoffzelle und Batterie	336
15	Energieträger und Kraftstoffe	339
15.1	Energieträger und deren Einteilung	339
15.2	Elektrische Energie	340
15.2.1	Wasserkraftwerke	341
15.2.2	Gezeitenkraftwerke	341
15.2.3	Windkraftwerke	342
15.2.4	Solarkraftwerke	343
15.2.5	Biomassekraftwerke	344
15.2.6	Geothermalkraftwerke	344
15.3	Wasserstoff als Energieträger	344
15.3.1	Herstellung von Wasserstoff	345
15.3.1.1	Klassische technische Prozesse	346

15.3.1.2	Verfahren auf Basis der Fotolyse	346
15.3.1.3	Elektrolyseverfahren	347
15.3.1.4	Wasserstoff-Erzeugung mit Solarenergie . . .	349
15.3.1.5	Wasserstoff aus Biomasse	352
15.3.2	Speicherung von Wasserstoff	353
15.3.2.1	Druckgasbehälter	353
15.3.2.2	Metallhydrid-Speicher	353
15.3.2.3	Carbazol als Wasserstoffspeicher	355
15.3.2.4	Fulleren-Speicher	356
15.3.2.5	Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes)	357
15.3.2.6	Kryogene Speicherung	357
15.4	Weitere gasförmige Energieträger	359
15.4.1	Druckluft als Energieträger	359
15.4.2	Erdgas als Kraftstoff	359
15.4.2.1	Erdgasspeicher für den mobilen Einsatz . . .	361
15.4.2.2	Mobile Adsorptionsspeicher	361
15.4.3	Biogas als Kraftstoff	362
15.5	Flüssige Kraftstoffe	362
15.5.1	Flüssiggas	362
15.5.1.1	Verwendung und Speicherung von Flüssiggas	362
15.5.2	Pflanzenöl als Energieträger, Biodiesel	364
15.5.2.1	Herstellung von Pflanzenöl und Biodiesel . .	364
15.5.2.2	Lagerung und Speicherung von Pflanzenöl und Biodiesel	365
15.5.3	Methanol aus Biomasse	366
15.5.3.1	Herstellungsverfahren aus Biomasse und Biogas	367
15.5.4	Ethanol	367
15.5.4.1	E-10 Kraftstoff	368
15.6	Kraftstoffe aus Algen	370
15.6.1	Vorteile und Nachteile bei der Erzeugung	371
15.7	Flexible Fuel Vehicles (FFV)	372

IV Elektro- und Hybridfahrzeuge

16 Elektrostraßenfahrzeuge	373
16.1 Einteilung, Übersicht	373
16.2 Gesichtspunkte für das Antriebssystem	374
16.2.1 Antriebsmaschinen für Elektrofahrzeuge	374
16.2.1.1 Drehfeldmaschinen	375
16.2.1.2 Radnabenmaschinen	376
16.2.2 Elektronik und Sensorik	377
16.2.2.1 Leistungselektronik	377
16.2.2.2 Bordladegeräte	378
16.2.2.3 Sensorik	379
16.2.3 Range-Extender	379
16.3 Gesichtspunkte zur Ausstattung und Ausführung	380
16.3.1 Fahrzeugheizung	380
16.3.1.1 Standheizung	382
16.3.2 Leichtbauweise bei Elektrofahrzeugen	383
16.3.2.1 Blue-Motion-Technologie	383
16.4 Energiespeicher und Brennstoffzellen in Elektrofahrzeugen	384
16.4.1 Batteriesysteme	384
16.4.1.1 Batterieauswahl	384
16.4.2 Speicherkondensatoren	385
16.4.2.1 Lithium-Ionen-Kondensatoren	385
16.4.3 Schwungradspeicher	386
16.4.4 Einsatz von Brennstoffzellen	387
16.5 Stromtankstellen	387
16.5.1 Stromtankstellen als Netzstützpunkte	388
16.5.1.1 Induktive Netzanbindung	389
16.5.1.2 Spannungssysteme	389
16.5.2 Solartankstellen	389
16.6 Zweirädrige Elektrofahrzeuge	391
16.6.1 Elektro-Fahrräder	391
16.6.2 Pedelects	392
16.6.3 Elektro-Motorroller, Elektro-Scooter	392

16.6.4	Elektro-Motorräder	393
16.6.5	Segway Personentransporter	394
16.6.5.1	Besonderheiten beim Segway	395
16.6.5.2	Inverses Pendel	396
16.7	Mehrspurige Elektrofahrzeuge	398
16.7.1	Elektroautos, Elektromobile	398
16.7.2	Elektrobusse	398
16.7.2.1	Elektrobusse mit Bordbatterien	399
16.7.2.2	Elektrobusse mit Batterieanhänger	401
16.7.2.3	Elektrobusse mit Brennstoffzellen	401
16.7.2.4	Oberleitungsbusse	402
16.7.2.5	Duo-Busse	404
16.7.2.6	Gyrobusse	404
16.7.3	Elektrotransporter	406
16.7.4	Elektro-Sonderfahrzeuge	407
16.7.4.1	Elektro-Quads	407
17	Hybridantriebe, Hybridfahrzeuge	409
17.1	Grundbegriffe, Einteilung, Übersicht	409
17.1.1	Einteilung hinsichtlich der Anordnung bzw. Topologie	409
17.1.2	Einteilung hinsichtlich der Leistungsaufteilung	410
17.2	Serielle Hybridantriebe	412
17.2.1	Klassischer serieller Hybridantrieb	414
17.2.2	Serieller Hybridantrieb mit Batterie oder/und Spei- cherkondensatoren	414
17.2.3	Serieller Hybridantrieb mit Gasturbine	416
17.2.4	Diselelektrische Busse mit Schwungradspeicher	416
17.3	Parallele Hybridantriebe	418
17.3.1	Zusammenwirken von Verbrennungsmotor und Elek- tromotor	421
17.4	Leistungsverzweigte Hybridantriebe	422
17.4.1	Two-Mode-Hybridsysteme	424
17.5	Weitere Hybridantriebssysteme	425
17.5.1	Start-Stopp-Systeme	425
17.5.2	Micro-Hybrid-Systeme	426

17.5.3	Plug-In-Hybrid-Systeme	426
17.6	Weitere Hybridfahrzeugkonzepte	427
17.6.1	Hybrid-Fahrräder, Hybrid-Mofas, Hybrid-Mopeds	427
17.6.2	Hybrid-Scooter, Hybrid-Roller	427
17.6.3	Hybrid-Motorräder	428
17.6.4	Hybridautos	428
17.6.5	Hybridbusse und Nutz-Hybridfahrzeuge	428
17.6.6	Hybrid-Sonderfahrzeuge	428
18	Modellbildung und Simulation	429
18.1	Ziele der Modellbildung	429
18.2	Modelle und Simulationen wichtiger Komponenten	430
18.2.1	Verwendete grafische Symbole	430
18.2.2	Modelle für Batterien	430
18.2.2.1	Shepherd-Batteriemodell	431
18.2.3	Modellbildung von Brennstoffzellen	433
18.2.4	Vergleich zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Modell	434
18.2.5	Modellbildung von Speicherkondensatoren	435
18.2.6	Modelle von leistungselektronischen Baugruppen	436
18.2.6.1	Gleichrichter mit Motor als Last	436
18.3	Modellbildung elektrischer Maschinen	438
18.3.1	Modellbildung von Gleichstrommaschinen	439
18.3.2	Modellbildung von Drehfeldmaschinen	440
18.3.3	Bezogene physikalische Größen	440
18.4	Modellbildung von Verbrennungsmotoren	443
18.4.1	Kenngrößen von Verbrennungsmotoren	443
18.4.1.1	Hubvolumen und Verdichtung	443
18.4.1.2	Leistung und effektiver Mitteldruck	444
18.4.1.3	Wirkungsgrad und Kraftstoffverbrauch	444
18.4.2	Simulation des Verbrennungsmotors	445
18.4.2.1	Simulation mit dem Muscheldiagramm	445
18.4.2.2	Simulation mit Hilfe der Willanslinien	447
18.5	Fahrwiderstände, Fahrstrecke	448

18.5.1	Fahrwiderstände	448
18.5.2	Streckenprofil, Fahrstrecke	449
18.6	Fahrzeugmodelle	449
18.6.1	Einfaches Elektrofahrzeugmodell	450
18.6.2	Einfaches Hybridfahrzeugmodell	450
18.7	Energiemanagement	450
18.7.1	Bremsbetrieb	452
18.7.2	Fahrbetrieb	453
18.7.3	Kennlinienfelder und Ladezustand	454
18.8	Ausgewählte Simulationsmodelle	454
18.8.1	Modell mit vorgegebener Antriebskraft	454
18.8.2	Modell mit vorgegebener Fahrgeschwindigkeit	455
Literaturverzeichnis		457
Stichwortverzeichnis		465