

# Elektro- und Hybridfahrzeuge für den Straßenverkehr

Grundlagen, Komponenten, Systeme,  
Fahrzeugkonzepte und Simulation

Univ.-Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Erich Rummich

Mit 198 Bildern und 32 Tabellen

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Grundlagen

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundgrößen und Einheiten</b>	<b>7</b>
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
<b>3</b>	<b>Mechanische Grundlagen</b>	<b>13</b>
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	Kammischer 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
<b>4</b>	<b>Grundlagen der Wärmelehre, Kreisprozesse</b>	<b>33</b>
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
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik</b>	<b>47</b>
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

<b>6</b>	<b>Thermische Antriebsmaschinen</b>	<b>103</b>
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
<b>7</b>	<b>Elektrische Maschinen</b>	<b>125</b>
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	Transversalfloss-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
<b>8</b>	<b>Grundlagen der Leistungselektronik</b>	<b>217</b>
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 Drehfeld- maschine . . . . .	250
<b>9</b>	<b>Regelung von elektrischen Antrieben</b>	<b>253</b>
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	Umkehrdrierer . . . . .	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

<b>10</b>	<b>Elektrochemische Energiespeicher</b>	<b>267</b>
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 <sub>2</sub> - 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
<b>11</b>	<b>Energiespeicherung mit Kondensatoren</b>	<b>299</b>
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
<b>12</b>	<b>Pneumatische und Hydropneumatische Speicher</b>	<b>311</b>
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
<b>13</b>	<b>Schwungradspeicher</b>	<b>323</b>
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 Fahrzeugen . . . . .	327
<b>14</b>	<b>Brennstoffzellen</b>	<b>329</b>
14.1	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -Brennstoffzelle . . . . .	329
14.1.1	PEM-H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -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
<b>15</b>	<b>Energieträger und Kraftstoffe</b>	<b>339</b>
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

<b>16 Elektrostraßenfahrzeuge</b>	<b>373</b>
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 Pedelecs	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
<b>17</b>	<b>Hybridantriebe, Hybridfahrzeuge</b>	<b>409</b>
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 Speicher- kondensatoren . . . . .	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-Hybridssysteme . . . . .	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
<b>18</b>	<b>Modellbildung und Simulation</b>	<b>429</b>
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	Kenngößen 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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>457</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>465</b>