

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur englischen Ausgabe XV

Die Autoren XIX

1	Einleitung	1
1.1	Nachhaltigkeit im Transportwesen	3
1.1.1	Bevölkerung, Energie und Transportwesen	4
1.1.2	Umwelt	6
1.1.3	Wirtschaftswachstum	7
1.1.4	Neue Kraftstoffeffizienzvorgaben	8
1.2	Kurze Beschreibung der Entwicklung von HEVs	9
1.3	Gründe für Aufkommen und Misserfolg von EVs in den 1990er-Jahren und was daraus gelernt werden kann	12
1.4	Konfigurationen von HEVs	13
1.4.1	Serien-HEVs	14
1.4.2	Parallel-HEVs	16
1.4.3	Serien-parallel-HEVs	18
1.4.4	Komplexe HEVs	18
1.4.5	Diesel-Hybridfahrzeuge	19
1.4.6	Andere Konzepte der Hybridisierung von Fahrzeugen	20
1.4.7	Hybridisierungsgrad	20
1.5	Das fachbereichsübergreifende Wesen von HEVs	21
1.6	Stand der Technik bei HEVs	22
1.6.1	Der Toyota Prius	23
1.6.2	Der Honda Civic	25
1.6.3	Der Ford Escape	25
1.6.4	Das Two-Mode-Hybridsystem	26
1.7	Herausforderungen und Schlüsseltechnologie bei HEVs	27
1.8	Die „unsichtbare Hand“ und Unterstützung durch die Regierung	28
	Literatur	31

2	Konzept der Automobil-Hybridisierung	33
2.1	Fahrzeuggrundlagen	33
2.1.1	Wesentliche Komponenten eines konventionellen Fahrzeugs	33
2.1.2	Fahrzeug und Fahrwiderstand	35
2.1.3	Fahrzyklen und -gelände	36
2.2	Grundlagen der EVs	38
2.2.1	Warum EV?	38
2.2.2	Wesentliche Komponenten eines EV	39
2.2.3	Fahrzeug und Antriebslasten	41
2.3	Grundlagen des HEV	42
2.3.1	Wozu HEV?	42
2.3.2	Wesentliche Komponenten eines HEV	43
2.4	Grundlagen des Plug-in-Hybrid-elektrischen Fahrzeugs (PHEV)	44
2.4.1	Wozu PHEV?	44
2.4.2	Wesentliche Komponenten eines PHEV	45
2.4.3	Vergleich zwischen HEV und PHEV	46
2.5	Grundlagen von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCVs)	47
2.5.1	Wozu FCV?	47
2.5.2	Wesentliche Komponenten eines FCV	47
2.5.3	Einige Probleme im Zusammenhang mit Brennstoffzellen	47
	Literatur	48
3	HEV-Grundlagen	49
3.1	Einleitung	49
3.2	Fahrzeugmodell	50
3.3	Fahrzeug-Performance	53
3.4	Dimensionierung/Auslegung der Komponenten des Antriebsstrangs von EVs	56
3.5	Serielle Hybridfahrzeuge	61
3.6	Parallele Hybridfahrzeuge	67
3.6.1	Das elektrisch unterstützende Hybridkonzept	68
3.6.2	Eigenschaften des Verbrennungsmotors	75
3.6.3	Anforderung hinsichtlich Steigfähigkeit	75
3.6.4	Wahl der Übersetzung von Verbrennungsmotor zum Rad	76
3.7	Dynamik des Reifenschlupfs	77
	Literatur	80
4	Moderne HEV-Konfigurationen und Dynamik des HEV-Antriebsstrangs	81
4.1	Prinzip von Planetengetrieben	81
4.2	Hybridantrieb des Toyota Prius und des Ford Escape	84
4.3	Two-Mode-Hybridantrieb von GM	88
4.3.1	Betriebsweise des Two-Mode-Triebstrangs	89
4.3.2	Betriebsart 0: Anfahren vorwärts wie rückwärts	90
4.3.3	Modus 1: Geringe Geschwindigkeiten	91

4.3.4	Modus 2: Oberer Drehzahl-/Geschwindigkeitsbereich	92
4.3.5	Modus 3: Regeneratives Bremsen	93
4.3.6	Übergang von Modus 0 zu Modus 3	93
4.4	Doppelkupplung-Hybridgetriebe	97
4.4.1	Konventionelle DCT-Technologie	97
4.4.2	Schaltpunktsteuerung	98
4.4.3	DCT-basierte Hybridtriebstränge	100
4.4.4	Betrieb eines DCT-basierten Hybridtriebstrangs	100
4.5	Die von Zhang <i>et al.</i> vorgeschlagene Hybrid-Kraftübertragung	103
4.5.1	Rein elektromotorischer Antrieb	104
4.5.2	Betriebsart kombinierte Leistung	105
4.5.3	Rein verbrennungsmotorischer Betrieb	105
4.5.4	Elektrischer Antrieb mit stufenlosem Getriebe	106
4.5.5	Betriebsmodus zur Energierückgewinnung	106
4.5.6	Stillstandsbetriebsmodus	107
4.6	Der Renault IVT-Hybridantrieb	107
4.7	Two-Mode-Hybrid-Kraftübertragung von Timken	108
4.7.1	Modus 0: Anfahren und Rückwärtsfahrt	109
4.7.2	Modus 1: Betrieb mit geringer Geschwindigkeit	109
4.7.3	Modus 2: Betrieb mit hoher Geschwindigkeit	109
4.7.4	Modus 4: Serieller Betriebsmodus	110
4.7.5	Betriebsmodusübergänge	111
4.8	Die Hybrid-Kraftübertragung von Tsai	112
4.9	Hybrid-Kraftübertragung mit Drehzahl- und Drehmoment-Kopplungsmechanismus	114
4.10	Der Toyota Highlander und Toyota Lexus Hybrid, elektrischer Vierradantrieb	116
4.11	Der Toyota-Camry-Hybridantrieb	118
4.12	Der Chevy-Volt-Antriebsstrang	119
4.13	Dynamik von Kraftübertragungen auf der Basis von Planetenradgetrieben	121
4.13.1	Nicht idealisierte Zahnräder im Planetenradsystem	121
4.13.2	Dynamik der Kraftübertragung	122
4.14	Fazit	123
	Literatur	124
5	Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge	125
5.1	Vorstellung von PHEVs	125
5.1.1	PHEVs und EREVs	125
5.1.2	Blended-PHEVs	126
5.1.3	Wozu PHEV?	126
5.1.4	Elektrische Energie für die Nutzung in PHEVs	129
5.2	PHEV-Konfigurationen	129
5.3	Äquivalente elektrische Reichweite von Blended-PHEVs	131
5.4	Kraftstoffeffizienz von PHEVs	132

5.4.1	Well-to-Wheel-Effizienz	132
5.4.2	Kraftstoffeffizienz von PHEVs	133
5.4.3	Nutzungsfaktor	134
5.5	Leistungsmanagement von PHEVs	135
5.6	PHEV-Auslegung und Dimensionierung der Komponenten	138
5.7	Dimensionierung von Komponenten von EREVs	138
5.8	Dimensionierung/Auslegung von Komponenten von Blended-PHEVs	140
5.9	HEV-Ümbauten zu PHEVs	140
5.9.1	Ersetzen des bestehenden Batteriepakets	141
5.9.2	Hinzufügen eines Zusatzbatteriepakets	143
5.9.3	Umrüstung von konventionellen Fahrzeugen zu PHEVs	144
5.10	Sonstige Themenbereiche zu PHEVs	144
5.10.1	Nutzung von „ausgemusterten“ Batterien zur Unterstützung des elektrischen Stromnetzes	144
5.10.2	Emissionsreduktion beim Kaltstart bei PHEVs	145
5.10.3	Leistungsfähigkeit von Batteriepaketen in PHEVs bei kaltem und warmem Wetter	145
5.10.4	Wartung von PHEVs	146
5.10.5	Sicherheit von PHEVs	146
5.11	Vehicle-to-Grid-Technologie	147
5.11.1	Laden der Batterie beim PHEV	148
5.11.2	Auswirkungen der G2V-Technologie	150
5.11.3	Das V2G-Konzept	155
5.11.4	Vorteile des V2G-Konzeptes	156
5.11.5	Fallstudien für V2G	156
5.12	Fazit	160
	Literatur	160
6	Spezielle Hybridfahrzeuge	163
6.1	Hydraulische Hybridfahrzeuge	163
6.1.1	Regeneratives Bremsen bei HHVs	166
6.2	Gelände-HEVs	169
6.3	Diesel-HEVs	175
6.4	Elektrische oder Hybrid-Schiffe, -Luftfahrzeuge und -Lokomotiven	176
6.4.1	Schiffe	177
6.4.2	Luftfahrzeuge	179
6.4.3	Lokomotiven	183
6.5	Sonstige Industrie-Nutzfahrzeuge	187
	Literaturhinweise	187
	Literatur	188

- 7 HEV-Anwendungen für Militärfahrzeuge 189**
 - 7.1 Warum HEVs für militärische Anwendungen vorteilhaft sein können 189
 - 7.2 Landfahrzeuganwendungen 190
 - 7.2.1 Architekturen – serielle, parallele, komplexe Strukturen 190
 - 7.2.2 Fahrzeuge mit maximalem Nutzen 193
 - 7.3 Militärische Anwendungen für Nicht-Landfahrzeuge 196
 - 7.3.1 Elektromagnetische Raketenwerfer 197
 - 7.3.2 Schiffe mit Hybridbetrieb? 198
 - 7.3.3 Luftfahrzeuganwendungen 199
 - 7.3.4 Dismounted-Soldier-Anwendungen 199
 - 7.4 Robustheit von Geräten 201
 - Literaturhinweise 203
 - Literatur 204

- 8 Diagnose, Prognostik, Betriebssicherheit, EMV und andere Themenbereiche rund um HEVs 205**
 - 8.1 Diagnose und Prognostik bei HEVs und EVs 205
 - 8.1.1 Onboard-Diagnose 206
 - 8.1.2 Prognostik 208
 - 8.2 Betriebssicherheit von HEVs 211
 - 8.2.1 Analyse der Zuverlässigkeit von HEV-Architekturen 212
 - 8.2.2 Zuverlässigkeit und Teilausfall 215
 - 8.2.3 Software-Zuverlässigkeitsprobleme 217
 - 8.3 EMV-Probleme 221
 - 8.4 NVH-Effekte, elektromechanische und sonstige Probleme 223
 - 8.5 Probleme im Zusammenhang mit dem Lebensdauerende 226
 - Literaturhinweise 227
 - Literatur 227

- 9 Leistungselektronik in HEVs 229**
 - 9.1 Einleitung 229
 - 9.2 Grundprinzip der Leistungselektronik 232
 - 9.3 Gleichrichter in HEVs 233
 - 9.3.1 Ideale Gleichrichter 233
 - 9.3.2 Reale Gleichrichter 234
 - 9.3.3 Einphasen-Gleichrichter 235
 - 9.3.4 Restwelligkeit der Spannung 237
 - 9.4 In HEVs verwendete Abwärtswandler 241
 - 9.4.1 Funktionsweise 241
 - 9.4.2 Nichtlineares Modell 242
 - 9.5 Nicht isolierte bidirektionale DC/DC-Wandler 243
 - 9.5.1 Funktionsweise 243
 - 9.5.2 Beibehalten des Konstant-Aufrechterhalten des Konstantmomentbereichs und des Leistungsvermögens 245

9.5.3	Reduzierung der Stromwelligkeit in der Batterie	246
9.5.4	Regeneratives Bremsen	249
9.6	Wechselrichter	249
9.7	Stromrichter	251
9.8	Bidirektionale DC/DC-Wandler mit galvanischer Trennung	251
9.8.1	Grundprinzip und stationäre Betriebszustände	252
9.8.2	Spannungsrestwelligkeit	257
9.9	PWM-Gleichrichter in HEVs	263
9.9.1	Gleichrichterbetrieb des Inverters	263
9.10	Batterieladegeräte für EVs und PHEVs	264
9.10.1	Durchfluss-/Sperrwandler	266
9.10.2	Halbbrücken-DC/DC-Wandler	267
9.10.3	Vollbrücken-DC/DC-Wandler	267
9.10.4	Leistungsfaktorkorrekturstufe	267
9.10.5	Bidirektionale Batterieladegeräte	269
9.10.6	Sonstige Ladegerättopologien	271
9.10.7	Induktives Laden	271
9.10.8	Drahtloses Laden	272
9.11	Modellierung und Simulation von HEV-Leistungselektronik	274
9.11.1	Simulation auf Geräteebene	275
9.11.2	Systemebenenmodell	275
9.12	Neu entwickelte Leistungselektronikgeräte	276
9.13	Schaltkreisgehäuse	276
9.14	Wärmemanagement in der HEV-Leistungselektronik	277
9.15	Fazit	280
	Literatur	280
10	Elektrische Maschinen und Antriebe in HEVs	283
10.1	Einleitung	283
10.2	Asynchronmotorantriebe	284
10.2.1	Funktionsprinzip von Asynchronmotoren	284
10.2.2	Ersatzschaltbild des Asynchronmotors	287
10.2.3	Drehzahlsteuerung einer Asynchronmaschine	289
10.2.4	Asynchronmotoren durch variable Frequenzsteuerung und variable Spannungssteuerung	291
10.2.5	Wirkungsgrad und Verluste von Asynchronmaschinen	293
10.2.6	Zusatzverlust in Asynchronmotoren aufgrund der PWM-Versorgungsspannung	294
10.2.7	Feldorientierte Regelung von Asynchronmaschinen	305
10.3	Permanentmagnetmotorantriebe	312
10.3.1	Grundsätzlicher Aufbau von PM-Motoren	312
10.3.2	Funktionsprinzip und Betriebsweise von PM-Motoren	314
10.3.3	Analyse des Magnetkreises von IPM-Motoren	319
10.3.4	Dimensionierung/Auslegung der Magneten in PM-Motoren	329
10.3.5	Wirbelstromverluste in den Magneten von PM-Maschinen	334

- 10.4 Geschaltete Reluktanzmotoren 336
- 10.5 DSPM-Maschinen 337
- 10.6 Auslegung und Dimensionierung von Traktionsmotoren 342
 - 10.6.1 Auswahl von A und B 343
 - 10.6.2 Drehzahlbemessung des Traktionsmotors 343
 - 10.6.3 Bestimmung der inneren Leistung 343
- 10.7 Thermische Analyse und Modellierung von Traktionsmotoren 344
 - 10.7.1 Der Wärmewiderstand des Luftspalts R_{ls} 345
 - 10.7.2 Radiale Leitung des Wärmewiderstands des Rotorkerns R_{rs} 346
 - 10.7.3 Die radiale Leitung des Wärmewiderstands der Pole R_{mr} 347
 - 10.7.4 Der Wärmewiderstand der Welle R_{Welle} 347
 - 10.7.5 Die radiale Leitung des Wärmewiderstands der Statorzähne R_{st} 348
 - 10.7.6 Die radiale Leitung des Wärmewiderstands des Statorjochs R_{sj} 348
 - 10.7.7 Die Leitung des Wärmewiderstands zwischen Wicklungen und Stator R_{ws} 349
 - 10.7.8 Konvektionswärmewiderstand zwischen den außenliegenden Wicklungen des Stators und der angrenzenden Luft R_{wl} 349
- 10.8 Fazit 351
 - Literatur 352

- 11 Batterien, Superkondensatoren, Brennstoffzellen und Steuerungen 359
 - 11.1 Einleitung 359
 - 11.2 Kennzeichnung von Batterien 361
 - 11.2.1 Kapazität (C) 361
 - 11.2.2 Gespeicherte Energie (E) 362
 - 11.2.3 Ladezustandswert 362
 - 11.2.4 Entladungstiefe (DOD) 363
 - 11.2.5 Spezifische Energie 364
 - 11.2.6 Energiedichte 364
 - 11.2.7 Spezifische Leistung und Leistungsdichte 364
 - 11.2.8 Amperestundenwirkungsgrad oder Ladewirkungsgrad 365
 - 11.2.9 Energieeffizienz 365
 - 11.2.10 Anzahl der „tiefen Zyklen“ und Batterielebensdauer 365
 - 11.3 Vergleich von unterschiedlichen Energiespeichertechnologien für HEVs 367
 - 11.3.1 Bleisäurebatterie 368
 - 11.3.2 Nickel-Metallhydrid-Batterie 369
 - 11.3.3 Lithium-Ionen-Batterie 369
 - 11.3.4 Superkondensatoren 370
 - 11.4 Modellierung anhand elektrischer Ersatzschaltbilder 372
 - 11.4.1 Batteriemodellierung 372
 - 11.4.2 Beispiel eines Batteriemodells 374
 - 11.4.3 Modellierung von Superkondensatoren 376

- 11.4.4 **Beispiel einer Batteriemodellierung für eine Hybrid-Batterie und einen Superkondensator** 378
- 11.5 **Batterieladesteuerung** 383
- 11.6 **Lademanagement von Energiespeichervorrichtungen** 385
- 11.7 **Schwungrad-Energiespeichersystem** 389
- 11.8 **Hydraulische Energiespeichersysteme** 393
- 11.9 **Brennstoffzellen und hybrides Brennstoffzellen-Energiespeichersystem** 394
- 11.9.1 **Vorstellung der Brennstoffzellen** 394
- 11.9.2 **Modellierung von Brennstoffzellen** 399
- 11.9.3 **Hybrid-Brennstoffzellen-Energiespeichersysteme** 402
- 11.9.4 **Regelstrategie eines Hybrid-Brennstoffzellen-Energiesystems** 406
- 11.10 **Fazit und Diskussion** 411
- Literatur** 412

- 12 **Modellierung und Simulation von Elektro- und Hybridfahrzeugen** 415
- 12.1 **Einleitung** 415
- 12.2 **Grundprinzipien der Modellierung von Fahrzeugsystemen** 417
- 12.3 **HEV-Modellierung mit ADVISOR** 419
- 12.4 **HEV-Modellierung mit PSAT** 423
- 12.5 **Physikalische Modellierung** 424
- 12.5.1 **RCF-Modellierungsverfahren** 424
- 12.5.2 **Hybridtriebstrangmodellierung** 425
- 12.5.3 **Modellierung einer Gleichstrommaschine** 426
- 12.5.4 **Modellierung eines DC/DC-Aufwärtswandlers** 427
- 12.5.5 **Modellierung der Fahrzeugdynamik** 428
- 12.5.6 **Radschlupfmodell** 429
- 12.6 **Bondgraphen und andere Modellierungsverfahren** 433
- 12.6.1 **Bondgraphenmodellierung für HEVs** 433
- 12.6.2 **HEV-Modellierung mit PSIM** 434
- 12.6.3 **HEV-Modellierung mit Simplorer und V-Elph** 435
- 12.7 **Betrachtung der numerischen Integrationsverfahren** 437
- 12.8 **Fazit** 437
- Literatur** 438

- 13 **Dimensionierung/Auslegung und Design-Optimierung von HEV-Komponenten** 441
- 13.1 **Einleitung** 441
- 13.2 **Globale Optimierungsalgorithmen für die HEV-Auslegung** 442
- 13.2.1 **DIRECT** 443
- 13.2.2 **Simulated Annealing (SA)** 448
- 13.2.3 **Genetische Algorithmen** 451
- 13.2.4 **Partikelschwarmoptimierung** 453
- 13.2.5 **Vor- und Nachteile der verschiedenen Optimierungsalgorithmen** 455
- 13.3 **Model-in-the-Loop-Designoptimierungsprozess** 457

13.4	Beispiel für die Designoptimierung eines Parallel-HEV	458
13.5	Beispiel einer Designoptimierung eines seriellen HEV	464
13.5.1	Steuerungs-Framework eines seriellen HEV-Antriebsstrangs	464
13.5.2	Parameteroptimierung eines seriellen HEV	466
13.5.3	Optimierungsergebnisse	468
13.6	Fazit	471
	Literatur	472
14	Leistungsregelstrategie und Energiemanagement für Fahrzeuge	475
14.1	Generisches Framework, Definition und Bedarfe	475
14.2	Methodologie der Implementierung	477
14.2.1	Methodik der Optimierung	484
14.2.2	Optimierung der Kostenfunktion	487
14.3	Vorteile des Energiemanagements	494
	Literaturhinweise	495
	Literatur	495
15	Kommerzialisierung und Standardisierung von HEV-Technologie und Zukunft des Transportwesens	497
15.1	Was bedeutet Kommerzialisierung und welche Bedeutung kommt ihr bei HEVs zu?	497
15.2	Vorteile, Nachteile und Auslöser der Kommerzialisierung	497
15.3	Standardisierung und Kommerzialisierung	499
15.4	Probleme der Kommerzialisierung und Auswirkungen auf zahlreiche Typen von Fahrzeugen	500
15.5	Kommerzialisierung und Zukunft der HEVs und des Transportwesens	500
	Literaturhinweise	502
	Stichwortverzeichnis	503