

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur englischen Ausgabe *XV*

Die Autoren *XIX*

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

<b>2</b>	<b>Konzept der Automobil-Hybridisierung</b>	<b>33</b>
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
<b>3</b>	<b>HEV-Grundlagen</b>	<b>49</b>
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
<b>4</b>	<b>Moderne HEV-Konfigurationen und Dynamik des HEV-Antriebsstrangs</b>	<b>81</b>
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
<b>5</b>	<b>Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge</b>	<b>125</b>
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-Umbauten 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
<b>6</b>	<b>Spezielle Hybridfahrzeuge</b>	<b>163</b>
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

<b>7</b>	<b>HEV-Anwendungen für Militärfahrzeuge</b>	<b>189</b>
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
<b>8</b>	<b>Diagnose, Prognostik, Betriebssicherheit, EMV und andere Themenbereiche rund um HEVs</b>	<b>205</b>
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
<b>9</b>	<b>Leistungselektronik in HEVs</b>	<b>229</b>
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
<b>10</b>	<b>Elektrische Maschinen und Antriebe in HEVs</b>	<b>283</b>
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
<b>11</b>	<b>Batterien, Superkondensatoren, Brennstoffzellen und Steuerungen</b>	<b>359</b>
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	Batterimodellierung	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
<b>12</b>	<b>Modellierung und Simulation von Elektro- und Hybridfahrzeugen</b>	<b>415</b>
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
<b>13</b>	<b>Dimensionierung/Auslegung und Design-Optimierung von HEV-Komponenten</b>	<b>441</b>
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
<b>14</b>	<b>Leistungsregelstrategie und Energiemanagement für Fahrzeuge</b>	<b>475</b>
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
<b>15</b>	<b>Kommerzialisierung und Standardisierung von HEV-Technologie und Zukunft des Transportwesens</b>	<b>497</b>
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
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>503</b>