

Chris Mi, M. Abul Masrur und David W. Gao

Hybridkraftfahrzeuge

Grundlagen und Anwendungen
mit Perspektiven für die Praxis



*Chris Mi, M. Abul Masrur
und David W. Gao*

Hybridkraftfahrzeuge

**Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel
zu diesem Thema**

Lange, G., Pohl, M. (Hrsg.)

**Systematische Beurteilung
technischer Schadensfälle**

6. Auflage

2014

Print ISBN: 978-3-527-32530-6

Helm, D.

**Einführung in die
Kontinuumsmechanik**

2014

Print ISBN: 978-3-527-33597-8

Callister, W.D., Rethwisch, D.G.

**Materialwissenschaften und
Werkstofftechnik**

Eine Einführung

2012

Print ISBN: 978-3-527-33007-2

de Borst, R., Crisfield, M.A., Remmers, J.J.,
Verhoosel, C.V.

**Nichtlineare
Finite-Elemente-Analyse von
Festkörpern und Strukturen**

2014

Print ISBN: 978-3-527-33660-9

Bobzin, K.

**Oberflächentechnik für den
Maschinenbau**

2013

Print ISBN: 978-3-527-33018-8

Korpela, S.A.

**Grundlagen der
Strömungsmaschinen**

2014

Print ISBN: 978-3-527-33663-0

Fischer, K., Günther, W.

Technische Mechanik
2. Auflage

2013

Print ISBN: 978-3-527-33381-3

Shabana, A.A.

**Einführung in die
Mehrkörpersimulation**

2014

Print ISBN: 978-3-527-33664-7

Chris Mi, M. Abul Masrur und David W. Gao

Hybridkraftfahrzeuge

Grundlagen und Anwendungen mit Perspektiven für die Praxis

Übersetzt von Kurt Wener

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Titel der Originalausgabe

Mi/Masrur/Gao
„Hybrid Electric Vehicles“ (Print-ISBN
978-0-470-74773-5)

© All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

MATLAB® ist ein eingetragenes Warenzeichen von The MathWorks, Inc. und wird im Text mit freundlicher Genehmigung von The MathWorks, Inc. verwendet.

Autoren**Chris Mi**

University of Michigan-Dearborn
USA

M. Abul Masrur

University of Detroit-Mercy
Großbritannien

David W. Gao

University of Denver
2390 S York St, Room 200
University of Denver
CO 80 Denver Co
USA

Übersetzung**Kurt Wener**

Translation Knowledge Work(s)
Bleicherstr. 11
31137 Hildesheim
Deutschland

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung Formgeber/Atelier für grafische Gestaltung, Mannheim, Deutschland
Typesetting le-tex publishing services GmbH, Leipzig, Deutschland

Druck und Bindung Markono Print Media Pte Ltd, Singapur

Print ISBN 978-3-527-33662-3

ePDF ISBN 978-3-527-67806-8

ePub ISBN 978-3-527-67808-2

Mobi ISBN 978-3-527-67807-5

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur englischen Ausgabe *XV*

Die Autoren *XIX*

1	Einleitung	<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>

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-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

- 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 Batteriebensdauer 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

Vorwort zur englischen Ausgabe

Es gilt heute als anerkannte Tatsache, dass die Technologien von Hybrid-elektrischen Fahrzeugen (HEV, Hybrid Electric Vehicle) und Elektrofahrzeugen (EV, Electric Vehicle) von entscheidender Bedeutung für die gesamte Automobilindustrie sind. Sie sind aber auch für den Benutzer in Bezug auf die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz und der Umweltfreundlichkeit von Bedeutung. Im vergangenen Jahrzehnt haben diese Technologien beachtliche Fortschritte gemacht. Mit der technologischen Entwicklung ist auch öffentlich zugängliche Literatur zu diesen Themen in Form von veröffentlichten Konferenzunterlagen und Artikeln in Fachzeitschriften, aber auch in Form von Lehrbüchern und Nachschlagewerken erschienen. Warum haben die Autoren sich also die Mühe gemacht, dieses Buch zu schreiben? Die Frage ist durchaus berechtigt. Nun, die Autoren haben bemerkt, dass die existierenden Lehrbücher sich hauptsächlich auf Themen wie Fahrzyklus, Kraftstoffverbrauch und Antriebstechnologien konzentrieren. Zudem sind die Autoren der Meinung, dass das Hauptaugenmerk dieser Lehrbücher auf normalen Personenwagen lag. Vor diesem Hintergrund meinen die Autoren, dass ein breiter gefasster Blick auf die Technologie notwendig ist, also dass die HEV-Technologie nicht nur auf normale Automobile, sondern auch auf andere Fahrzeuge, wie beispielsweise Lokomotiven, Geländefahrzeuge (Baumaschinen- und Bergbaufahrzeuge), Schiffe und sogar in gewissem Maß auf Luftfahrzeuge anwendbar ist. Die Autoren sind überzeugt, dass diese Informationen wahrscheinlich existieren, aber nicht in Form eines Lehrbuchs, in dem die allgemeine Sicht auf die Technologie präsentiert wird. Tatsächlich ist HEV-Technologie überhaupt nicht neu – eine leicht abgewandelte Variante gab es bereits vor Jahren in Diesel-elektrischen Lokomotiven. Allerdings haben die Verfügbarkeit von Hochleistungselektronik und die Entwicklung besserer Werkstoffe für die Elektromotortechnologie die HEV-Technologie im vergangenen Jahrzehnt wirklich nach vorne gebracht, so dass sie für weitere Anwendungen einsetzbar wird.

Ein Lehrbuch ist keine Fachzeitschrift und muss deshalb ein vernünftiges Maß von Unabhängigkeit aufweisen. Daher haben die Autoren sich entschlossen, die Grundlagen zu erarbeiten, einschließlich der Grundlagen von Leistungselektronik, Elektromotoren und Speicherelementen wie Batterien, Kondensatoren, Schwungrädern usw. Alle diese Grundlagen sind wesentliche Komponenten bzw. Bestandteile der HEV-Technologie. Ein weiteres Element im Buch ist eine Dis-

kussion über die Systemebenenarchitektur von Fahrzeugen, Modellierungs- und Simulationsmethoden, Kraftübertragung und Kopplung. Auch Fahrzyklen und deren Bedeutung sowie Optimierung der Fahrzeugleistungs-Nutzungsstrategie (und Leistungsmanagement) werden erläutert. Das Problem der Aufteilung der Leistung zwischen mehreren Quellen liegt im Bereich des Leistungsmanagements. Das Leistungsmanagement ist ein extrem wichtiges Thema für alle Leistungssysteme, die mehr als eine Leistungsquelle nutzen. Diese Quellen können sich der Art nach gleichen und unterscheiden, das heißt, sie können elektrisch, mechanisch, chemisch etc. sein. Auch wenn sie alle sehr ähnlich sind, besitzen sie vielleicht unterschiedliche Eigenschaften. Optimierung bedingt eine Entscheidung über die Ressourcenzuordnung in solchen Situationen. Einige dieser Optimierungsmethoden existieren tatsächlich in der Energieversorgungsbranche und werden dort auch genutzt, haben aber in letzter Zeit auch Interesse in fahrzeugtechnischen Anwendungen gefunden. Um dieses Buch thematisch abzurunden und einen eher ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen, wurden auch Themen wie Anwendungen für Geländefahrzeuge, Lokomotiven, Schiffe und Luftfahrzeuge aufgenommen. In jüngster Vergangenheit gewann die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Stromversorgungsnetz für Plug-in-Funktionen zunehmend an Bedeutung, daher wurden Themen wie die Leistungsübertragung in Plug-in-Hybrids sowie Vehicle-to-Grid bzw. Vehicle-to-Vehicle mit aufgenommen. Auch wurden die Diagnose und Prognostik, die Zuverlässigkeit von HEVs aus Systemebene-sicht, elektromechanische Schwingungen sowie NVH-Effekte (NVH, Noise Vibration Harshness), elektromagnetische Verträglichkeit und elektromagnetische Störungen (EMV/EMS, englisch Electromagnetic Compatibility/Electromagnetic Interference, EMC/EMI) sowie Lebensdauerproblematik diskutiert. Nach Meinung der Autoren finden sich die meisten dieser Themen nicht in Lehrbüchern über HEVs. Tatsächlich wurden einige dieser Themen auch nur selten in der wissenschaftlichen Literatur erläutert, obwohl sie alle sehr wichtige Punkte betreffen. Der Erfolg einer Technologie manifestiert sich letztlich in Form von Benutzerakzeptanz, und diese ist eng mit der Massenfertigung des Produkts verknüpft. Es reicht nicht, dass eine Technologie gut ist. Wenn eine Technologie nicht in großen Stückzahlen relativ kostengünstig gefertigt werden kann, und das gilt besonders für Technologien, die sich an den normalen Verbraucher richten, kann sie sich in der Gesellschaft nicht durchsetzen. Das gilt ganz besonders auch für HEVs. Daher schließt dieses Buch mit einem Kapitel zum Thema Kommerzialisierung von HEVs.

Die Autoren verfügen über signifikante Erfahrungen in vielen technischen Bereichen, die in diesem Buch besprochen werden, und dies spiegelt sich sowohl hinsichtlich der Stoffauswahl wie auch in der Präsentation wider. Die Autoren sind sowohl im akademischen wie auch im industriellen Umfeld als Vortragende bzw. Lehrkräfte im Bereich von HEV- und EV-Systemen und -Komponenten tätig. Das Buch ist zum Teil aus den Unterlagen für solche Kurse entstanden. Allerdings wurden jede Menge weiterer Unterlagen hinzugefügt, die nicht Teil dieser Kurse sind.

Alle, die zu diesem Werk beigetragen haben, glauben, dass es einige Lücken in der existierenden Literatur und im Bereich der HEV- und EV-Technologien sowohl für normale als auch für Geländefahrzeuge füllen kann. Das Buch hilft dem Leser auch, einen besseren Einblick in die Systemebene solcher Fahrzeuge zu erhalten.

Die insgesamt 15 Kapitel wurden von den drei Autoren gemeinsam geschrieben. Chris Mi ist der Hauptautor der Kapitel 1, 4, 5, 9 und 10. M. Abul Masrur ist der Hauptautor von Kapitel 2, 6, 7, 8, 14 und 15. David Wenzhong Gao ist der Hauptautor von Kapitel 3, 11, 12 und 13.

Da es sich hier um die Erstausgabe dieses Buches handelt, sind den Autoren Anregungen und Kommentare seitens der Leser sehr willkommen und stellen sicher, dass Korrekturen und Verbesserungen in künftige Ausgaben eingearbeitet werden können.

Die Autoren sind all denjenigen sehr dankbar, die zum Entstehen dieses Buches beigetragen haben. Ein großer Teil des vorgestellten Materials ist das Ergebnis jahrelanger Arbeit der Autoren und der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsgruppen an den folgenden Universitäten: University of Michigan–Dearborn, Tennessee Technological University und University of Denver. Dank gilt auch den vielen engagierten Mitarbeitern und Studierenden, die große Teile und Unterlagen zu diesem Buch beigetragen und bereitgestellt haben.

Der Dank der Autoren gilt auch ihren Familien. Sie haben die Autoren im Verlauf der Entstehung dieses Buches großartig unterstützt und viele Opfer gebracht.

Aufrichtige Anerkennung gilt auch den zahlreichen Quellen, die uns die Genehmigung erteilten, bestimmte Unterlagen oder Bilder in diesem Buch zu verwenden. Danksagungen finden Sie auch dort, wo diese Unterlagen im Buch erscheinen. Die Autoren haben sich bemüht, die Genehmigung für die verwendeten, öffentlich und auf Internet-Websites zugänglichen Materialien zu bekommen. In manchen Fällen existieren die ursprünglichen Quellenangaben der Unterlagen (insbesondere bei einigen Websites) nicht mehr und konnten nicht weiter zurückverfolgt werden. In diesen Fällen haben die Autoren festgehalten, woher die Unterlagen stammen und haben ihren Dank zum Ausdruck gebracht. Falls Quellenangaben tatsächlich fehlen sollten, entschuldigen sich die Autoren für dieses Versehen und werden dies in künftigen Ausgaben dieses Buches berichtigen, sofern der Herausgeber davon Kenntnis erlangt. Die in diesem Buch erwähnten Produkt- oder Lieferantennamen werden nur aus informativen Gründen aufgeführt. Sie stellen weder eine Befürwortung (oder Ablehnung) des Produkts oder Lieferanten durch den Herausgeber oder die Autoren dar.

Schließlich sind die Autoren dem Verlag John Wiley & Sons, Ltd sowie seinen redaktionellen Mitarbeitern zu großem Dank verpflichtet für die Möglichkeit, dieses Buch zu veröffentlichen. Sie danken ebenfalls für die allumfassende Unterstützung. Besonderer Dank gilt Frau Nicky Skinner von John Wiley & Sons, die dieses Buchprojekt im Namen des Herausgebers initiiert hat, aber leider kürzlich verstorben ist, sodass sie das Ergebnis ihrer erfolgreichen Arbeit nicht mehr erleben konnte.

Die Autoren

Chris Mi ist Associate Professor of Electrical and Computer Engineering und Director of DTE Power Electronics Laboratory an der University of Michigan–Dearborn, Dearborn, MI, USA. Dr Mi ist führender Experte für Elektro- und Hybridfahrzeuge und hielt Tutorien und Seminare zu dem Themenkomplex für die Society of Automotive Engineers (SAE), IEEE, National Society of Professional Engineers und wichtige Automobilhersteller und -zulieferer, darunter GM, Ford, Chrysler und Delphi. Er hielt seine Tutorien auch in China, Korea, Italien, Singapur und Mexiko. Er veröffentlichte über 100 Fachartikel, hielt mehr als 50 Vorträge und Keynotes und war vielfach Diskussionsleiter.

Ausgezeichnet wurde Dr. Mi vielfach, unter anderem mit den folgenden Auszeichnungen: „2009 Distinguished Research Award“ der University of Michigan–Dearborn, „2007 SAE Environmental Excellence in Transportation Award“ (auch bekannt als E2T) für „Innovative Education and Training Program in Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles“, „2005 Distinguished Teaching Award“ der University of Michigan–Dearborn, „IEEE Region 4 Outstanding Engineer Award“ und „IEEE Southeastern Michigan Section Outstanding Professional Award“. Er erhielt zudem die Auszeichnungen „National Innovation Award“ (1992) und „Government Special Allowance Award“ (1994) von der Zentralregierung in China. Im Dezember 2007 wurde Dr. Mi aufgrund seiner Verdienste als „a leader in education and an example of good moral character“ als Mitglied in die „Eta Kappa Nu“ der „Electrical and Computer Engineering Honor Society“ aufgenommen.

Dr. Mi verfügt über einen Abschluss als B. Sc. und M. Sc. der Northwestern Polytechnical University, Xi’an, China und einen PhD der University of Toronto, Kanada. Er war Chief Technical Officer bei 1Power Solutions zwischen 2008 und 2010 und arbeitete für General Electric Company zwischen 2000 und 2001. Von 1988–1994 war er Fakultätsmitglied der Northwestern Polytechnical University und zwischen 1994 und 1996 Associate Professor und Associate Chair des Department of Automatic Control Systems, Xi’an Petroleum University, China.

Desweiteren ist Dr. Mi Associate Editor von *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Associate Editor of *IEEE Transactions on Power Electronics – Letters*, Associate Editor des *Journal of Circuits, Systems, and Computers* (2007–2009), Editorial Board Member von *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, Editorial Board Member von *IET Transactions on Electrical Systems in Transpor-*

tation, ein Guest Editor von *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *Special Issue on Vehicle Power and Propulsion* (2009–2010), sowie Guest Editor von *International Journal of Power Electronics*, *Special Issue on Vehicular Power Electronics and Motor Drives* (2009–2010). Er arbeitete als Vice Chair (2006–2007) und Chair (2008) der IEEE Southeastern Michigan Section. Er war General Chair der Fifth IEEE International Vehicle Power and Propulsion Conference, die in Dearborn, MI, USA vom 7.–11. September 2009 stattfand. Er hat auch im Review Panel für die National Science Foundation, dem US Department of Energy (2006–2010) sowie dem Natural Science and Engineering Research Council of Canada (2010) gearbeitet.

Dr. Mi ist der Topic Coordinator für die 2011 IEEE International Future Energy Challenge Competition.

M. Abul Masrur verfügt seit 1984 über einen Abschluss als PhD in Electrical Engineering der Texas A&M University, College Station, TX, USA. Dr. Masrur ist Adjunct Professor an der University of Detroit Mercy, wo er Vorlesungen zu den Themenbereichen „Advanced Electric and Hybrid Vehicles“ (Moderne Elektro- und Hybridfahrzeuge), „Vehicular Power Systems“ (Fahrzeugantriebsstränge), „Electric Drives and Power Electronics“ (Elektrische Antriebe und Leistungselektronik) hielt. Er arbeitete für die Scientific Research Labs. der Ford Motor Co. zwischen 1984 und 2001 und war unter anderem an der Forschung und Entwicklung in Verbindung mit elektrischen Antrieben und Leistungselektronik, Architekturen moderner automobiltechnischer Leistungselektronik, elektrischen aktiven Federungssystemen für Automobile, elektrischen Lenkunterstützungssystemen sowie am Design von autonomen USV-Systemen beteiligt.

Seit April 2001 arbeitete Dr. Masrur mit dem US Army RDECOM-TARDEC (R&D) zusammen, wo er am Konzeptdesign und der Entwicklung von fahrzeugtechnischen Leistungsmanagementsystemen, elektrischem Leistungsmanagement und KI-basierter Fehlerdiagnose von elektrischen Antrieben arbeitete. Er hat über 70 Publikationen verfasst, viele davon in öffentlich zugänglichen internationalen Fachzeitschriften und Konferenzbeiträgen. Er ist Inhaber von acht US-Patenten, wovon zwei auch in Europa und eines in Japan patentiert sind. Er erhielt zahlreiche Auszeichnungen, darunter die folgenden: „Best Automotive Electronics Paper Award“ der IEEE Vehicular Technology Society im Jahre 1998 für seine Aufsätze über neuartige Fahrzeugleistungssystemarchitekturen in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006 erhielt er gemeinschaftlich den „SAE Environmental Excellence in Transportation Award – Education, Training, & Public Awareness“ (oder E2T) für ein Tutorium, in dessen Rahmen er Hybridfahrzeuge vorstellte.

Dr. Masrur ist Senior Member der IEEE und arbeitete von 1999–2007 als Associate Editor (Vehicular Electronics Section) der *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Er arbeitete auch bis Dezember 2010 zwei Jahre lang als Chair des Motor-Subcommittee des IEEE Power & Energy Society – Electric Machinery Committee.

David Wenzhong Gao ist Associate Professor of Electrical and Computer Engineering und Director of Renewable Energy and Power Electronics Laboratory an der University of Denver, Denver, CO, USA. Dr. Gao hat umfangreiche Forschungen in den Bereichen Hybrid-elektrische Fahrzeuge, erneuerbare Energien, elektrische Energiesysteme und intelligente Stromnetze durchgeführt. Er hat über 100 Aufsätze in internationalen Fachzeitschriften und Konferenzunterlagen veröffentlicht. 2006 hielt er ein Tutorium zum Thema „Modeling and Simulation Tools for Vehicle Power System“ beim US Army Vetronics Institute in Warren, MI, USA. Im September 2007 wurde er als Mitglied von der Sigma Xi aufgenommen. Er ist ebenfalls Mitglied der Eta Kappa Nu, der „Electrical and Computer Engineering Honor Society“, und der HKN als Faculty Advisor. Seit 2003 ist er Senior Member der IEEE. Er wurde mit der Auszeichnung „Best Paper Award“ in „Complex Systems Track“ auf der 2002 Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) im Januar 2002 ausgezeichnet.

Dr. Gao hat einen Abschluss als B. Sc. der Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, als M. Sc. der Northeastern University, Shenyang, China und einen PhD des Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.

Darüber hinaus ist Dr. Gao Editor des *IEEE Transactions on Sustainable Energy* und war Gutachter für führende Fachzeitschriften wie *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *IET Renewable Power Generation*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *IEEE Transactions on Power Systems* sowie für Konferenzen wie IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (VPPC) und IEEE Power and Energy Society General Meeting. Er war Technical Co-chair beim Organizing Committee of the IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference, die in Dearborn, MI, USA, vom 7.–11. September 2009 stattfand. Er arbeitete auch im Grant Review Panel für die US National Science Foundation, das US Department of Energy sowie den Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

1

Einleitung

Die moderne Gesellschaft ist hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung extrem von dem auf fossilen Brennstoffen basierenden Transportwesen abhängig – nur so ist die uneingeschränkte Beförderung von Gütern und Personen möglich. Nach einer Schätzung des US Department of Transportation gibt es weltweit rund 800 Millionen Autos, und rund 250 Millionen Kraftfahrzeuge werden auf US-amerikanischen Straßen bewegt [1]. Mit einer Automobilproduktion von 13,79 bzw. einem Absatz von 13,64 Millionen Einheiten hat China 2009 die Vereinigten Staaten als weltweit größter Autobauer und Absatzmarkt überholt [2]. Mit der fortschreitenden Urbanisierung, Industrialisierung und Globalisierung ist die Tendenz für eine schnelle Zunahme der Zahl der Personenwagen in der ganzen Welt unvermeidlich. Die mit diesem Trend zusammenhängenden Probleme sind augenscheinlich, denn das Transportwesen ist extrem vom Öl abhängig. Einerseits sind die Ölreserven der Erde begrenzt. Andererseits haben die durch das Verbrennen von Ölprodukten entstehenden Emissionen zu Klimawandel, schlechter Luft in Ballungsräumen und politischen Konflikten geführt. So sind weltweit Energiesystem- und Umweltprobleme entstanden, die größtenteils dem Individualverkehr zuzuschreiben sind.

Der Individualverkehr bietet Menschen die Möglichkeit, sich jederzeit frei zu bewegen. Allerdings schafft diese Wahlfreiheit auch einen Konflikt, der uns zunehmend Sorgen um Umwelt und Nachhaltigkeit über den Umgang der Menschen mit ihren natürlichen Ressourcen bereitet.

Erstens muss die Welt sich dem ernstesten Problem des steigenden Energiebedarfs und der schwieriger werdenden Energieversorgung stellen. Die Welt verbraucht tagtäglich rund 85 Millionen Barrel Öl. Es gibt aber lediglich 1300 Milliarden Barrel an bekannten Ölreserven. Legt man den aktuellen Verbrauch zugrunde, so wird die Welt in 42 Jahren alle Ölreserven aufgebraucht haben [3]. Ölreserven werden nicht so schnell entdeckt, wie die Nachfrage nach Öl zunimmt. Sechzig Prozent des verbrauchten Öls wird im Transportwesen verwendet [4]. Die Vereinigten Staaten verbrauchen rund 25 % des gesamten Öls auf der Welt [5]. Die Verringerung des Ölverbrauchs im Individualverkehr ist für das Erreichen von Nachhaltigkeit im Energie- und Umweltbereich entscheidend.

Zweitens muss die Welt sich der schwierigen Aufgabe des globalen Klimawandels stellen. Die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe erhöhen die

Konzentration an Kohlendioxid (CO₂) in der Erdatmosphäre. Sie werden auch als Treibhausgas- bzw. GHG-Emissionen (GHG, Green House Gas) bezeichnet. Die Zunahme der CO₂-Konzentration führt dazu, dass zu viel Wärme von der Erdoberfläche aufgenommen wird, was wiederum zu einem globalen Temperaturanstieg und in vielen Teilen der Welt zu extremen Wetterbedingungen führt. Die langfristigen Folgen der globalen Erwärmung können zur Erhöhung des Meeresspiegels und Instabilität von Ökosystemen führen.

Mit Benzin- und Dieselmotoren betriebene Fahrzeuge gehören zu den Hauptverursachern von CO₂-Emissionen. Hinzu kommen andere Emissionen von herkömmlichen, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftfahrzeugen. Zu diesen Emissionen zählen Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO und NO₂ bzw. NO_x), die bei der Verbrennung von Motorbenzin entstehen, sowie Kohlenwasserstoffe, flüchtige organische Verbindungen (VOC, Volatile Organic Compound) aus verdampftem, unverbranntem Kraftstoff, Schwefeldioxid und Rußpartikel (Ruß), die bei der Verbrennung von Dieselmotoren entstehen. Diese Emissionen verschmutzen die Luft und beeinträchtigen letztlich die Gesundheit von Mensch und Tier.

Drittens braucht die Gesellschaft Nachhaltigkeit, aber das aktuelle Modell ist alles andere als nachhaltig. Die Verringerung des fossilen Brennstoffverbrauchs und der Kohlenstoffemissionen ist Teil der gemeinsamen Anstrengungen zum Erhalt der natürlichen Ressourcen in nachhaltigen Grenzen. Darum sollte der künftige Individualverkehr mehr Freiheit, nachhaltige Mobilität und nachhaltiges wirtschaftliches Wachstum sowie Wohlstand für die Gesellschaft liefern. Beim Erreichen dieses Ziels spielen elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die Energie sauber, sicher und intelligent nutzen, eine wichtige Rolle.

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge bringen viele Vorteile und Herausforderungen mit sich. Elektrizität ist effizienter als der Verbrennungsprozess eines Autos. Well-to-wheel-Studien belegen, selbst wenn der Strom des Elektrofahrzeugs mit Rohöl erzeugt wird, kann das Elektrofahrzeug mit 1 Gallone (3,8l) Benzin eine Strecke von 173 km (108 Meilen) zurücklegen, während ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICE, Internal Combustion Engine) damit 53 km (33 Meilen) weit kommt [6–8]. Einfacher gesagt kostet eine rein elektrisch gefahrene Meile 0,02 USD, legt man den US-üblichen kWh-Preis von 0,12 USD zugrunde. Bei einem Kleinwagen mit Benzinmotor sowie einem Preis von 3,30 USD pro Gallone kostet die gefahrene Meile 0,10 USD.

Strom kann mithilfe erneuerbarer Quellen erzeugt werden, beispielsweise mit Wasserkraft, Wind- oder Solarenergie und mit Biomasse. Andererseits verfügt das derzeitige Elektrizitätsnetz in der Nacht, wenn weniger Energie gebraucht wird, über Überkapazitäten. Elektrofahrzeuge (EVs, Electric Vehicles) lassen sich also idealerweise über Nacht laden, wenn das Netz Überkapazitäten bietet.

Hohe Kosten, limitierte Reichweite und lange Ladezeiten sind die Hauptprobleme batteriebetriebener Elektrofahrzeuge. Hybrid-elektrische Fahrzeuge (HEVs, Hybrid Electric Vehicles), die für den Fahrzeugantrieb sowohl einen Verbrennungs- als auch einen Elektromotor nutzen, überwinden die Kosten- und Reichweitenprobleme rein elektrisch betriebener Fahrzeuge und müssen nicht an

einer Steckdose geladen werden. Der Kraftstoffverbrauch kann im Vergleich zu benzinbetriebenen Fahrzeugen bei HEVs erheblich gesenkt werden. Allerdings werden diese Fahrzeuge immer noch mit Benzin- bzw. Dieselmotoren betrieben.

Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge (PHEVs oder „Steckdosen“-Hybrids) sind mit größeren Batteriepaketen und größeren Elektromotoren als HEVs bestückt. PHEVs können am Stromnetz geladen werden und können im rein elektromotorischen Betrieb eine begrenzte Distanz (30–60 km) zurücklegen. Dieser Modus wird auch als „Charge-Depletion“-Betrieb (CD-Betrieb) bezeichnet. Sobald die Batteriekapazität einen Schwellenwert unterschreitet, funktionieren PHEVs ähnlich wie ein normales HEV. Dies wird als CS-Modus (CS, Charge-Sustain, Ladeerhaltung) bzw. als Reichweitenverlängerungsmodus bezeichnet. Da die meisten Personenwagen für Pendlerfahrten eingesetzt und 75 % dieser Fahrzeuge täglich lediglich max. 60 km bewegt werden [9], kann eine bedeutende Menge an fossilem Kraftstoff eingespart werden, wenn PHEVs genutzt werden, die über eine Reichweite von 60 km bei rein elektrischem Antrieb verfügen. Im CS-Betrieb arbeitet ein PHEV ähnlich wie ein HEV. Um eine bessere Kraftstoffeffizienz zu erzielen, werden Elektromotor und Batterie genutzt, um den Betrieb des Verbrennungsmotors und des Fahrzeugsystems zu optimieren. Dank der größeren Batterieleistung und Energiespeicherfähigkeit kann ein PEHV mehr kinetische Energie beim Bremsen zurückgewinnen und damit den Kraftstoffverbrauch weiter reduzieren.

1.1

Nachhaltigkeit im Transportwesen

Das aktuelle Modell des Individualverkehrssystems ist langfristig nicht nachhaltig, denn die Erde verfügt nur über begrenzte fossile Brennstoffreserven. Damit werden derzeit 97 % des gesamten Energiebedarfs im Transportwesen gedeckt [10]. Um zu verstehen, wie wir Nachhaltigkeit im Transportwesen erreichen können, müssen wir wissen, wie Energie gewonnen wird und wie Fahrzeuge angetrieben werden können.

Die uns zur Verfügung stehenden Energiearten können in drei Kategorien unterteilt werden: erneuerbare Energie, nicht erneuerbare Energie aus fossilen Brennstoffen und Atomenergie. Zu den erneuerbaren Energien gehören Wasserkraft, Solarenergie, Windenergie, ozeanische und geothermale Energie sowie Energie aus Biomasse usw. Zu den nicht erneuerbaren Energien gehören Kohle, Öl und Erdgas. Atomenergie ist zwar reichlich vorhanden, aber auch nicht erneuerbar. Schließlich sind auch die Ressourcen an Uran und anderen radioaktiven Elementen begrenzt. Zudem gibt es (wie der atomare Unfall nach dem Erdbeben und Tsunami in Japan gezeigt hat) begründete Bedenken hinsichtlich der nuklearen Sicherheit und der Endlagerung nuklearer Abfälle. Energie aus Biomasse ist erneuerbar, da sie aus Holz, Früchten, Zellulose, Abfall und Müll gewonnen werden kann. Elektrizität und Wasserstoff sind sekundäre Formen von Energie. Sie lassen sich aus einer Vielzahl von Primärenergiequellen gewinnen,

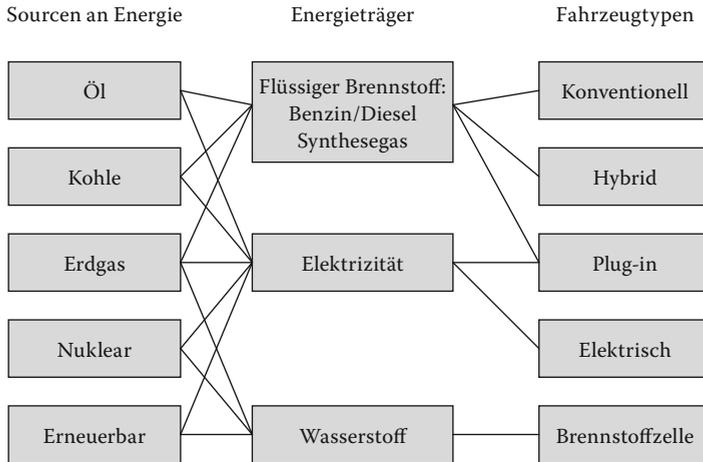


Abb. 1.1 Nachhaltiges Modell des Transportwesens.

unter anderem aus erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie. Benzin, Diesel und Synthesegase sind Energieträger, die aus fossilen Brennstoffen gewonnen werden.

Abbildung 1.1 zeigt die verschiedenen Typen von Quellen von Energie, Energieträger und Fahrzeuge. Herkömmliche Benzin- bzw. Diesel-betriebene Fahrzeuge benötigen flüssigen Kraftstoff, der sich nur aus fossilem Brennstoff gewinnen lässt. Auch wenn HEVs effizienter und verbrauchsgünstiger als herkömmliche Fahrzeuge sind, benötigen sie fossilen Brennstoff als Primärenergie. Daher sind weder herkömmliche Kraftfahrzeuge noch HEVs nachhaltig. Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen Strom bzw. Wasserstoff. Elektrische Energie und Wasserstoff können beide aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden, weswegen sie nachhaltig sind, sofern dafür tatsächlich erneuerbare Energiequellen genutzt werden. Obschon nicht gänzlich nachhaltig, bieten PHEVs die Vorteile von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen. PHEVs können die fossile Brennstoffnutzung durch Nutzung des Elektrizitätsnetzes verdrängen. Sie sind keine ultimative Lösung für Nachhaltigkeit, aber ein gangbarer Weg zu künftiger Nachhaltigkeit.

1.1.1

Bevölkerung, Energie und Transportwesen

Wie in Abb. 1.2 gezeigt, wächst die Weltbevölkerung sehr schnell [11]. Gleichzeitig steigt auch der Pkw-Absatz sehr schnell, wie Abb. 1.2 zeigt (www.dot.gov s. auch http://en.wikipedia.org/wiki/Passenger_vehicles_in_the_United_States¹⁾). Es gibt eine klare Korrelation zwischen Bevölkerungswachstum und der Anzahl der jährlich verkauften Fahrzeuge.

1) Letzter Zugriff auf alle Weblinks 20.08.14, falls nicht anders angegeben.

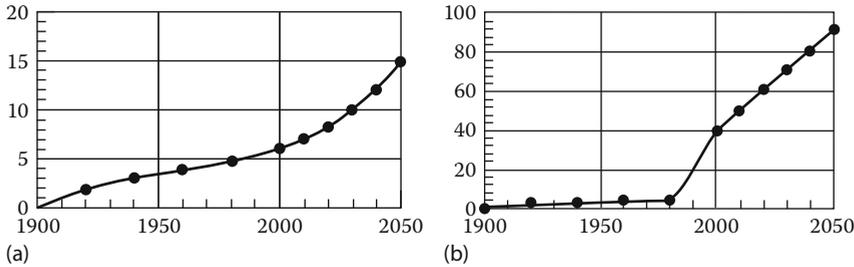


Abb. 1.2 Weltbevölkerungsentwicklung und jährlich verkaufte Fahrzeuge. (a) Weltbevölkerung, in Milliarden; (b) Jahresabsatz an Personenwagen, in Millionen.

In den USA wird der Kraftstoffverbrauch in Meilen pro Gallone (mpg) angegeben. Der Wert besagt, wie weit mit 3,8l Kraftstoff (1 Gallone) gefahren werden kann. In den meisten anderen Ländern der Welt wird der Verbrauch an Benzin (oder Diesel) für eine Strecke von 100 km angegeben, also in Litern pro 100 km (l/100 km). Mit dem CAFE-Standard (US Corporate Average Fuel Economy Standard) wurde die Kraftstoffeffizienz von Pkw für die Jahre von 1989–2008 auf 27,5 mpg festgelegt [12]. Mit einer durchschnittlichen Kraftstoffeffizienz von 27,5 mpg bzw. einem Kraftstoffverbrauch von rund 8,6 l/100 km sowie einer durchschnittlichen Fahrleistung von 24 100 km (15 000 Meilen) pro Jahr sowie 250 Millionen zugelassenen Fahrzeugen verbrauchen die USA 136 Milliarden Gallonen Kraftstoff im Jahr. Das entspricht 7 Milliarden Barrel Öl oder 0,5 % aller bekannten Ölreserven auf der Erde.

2009 überholte China die Vereinigten Staaten und wurde mit 13 Millionen verkauften Fahrzeugen zum zweitgrößten Fahrzeugmarkt weltweit. Chinas Wirtschaftswachstum blieb fünf Jahre in Folge zweistellig. Aufgrund der Finanzkrise sank der Fahrzeugabsatz im Jahr 2009 weltweit um 20 %. Nur Chinas Fahrzeugmarkt verzeichnete einen Zuwachs um 6 % wie auch Chinas Wirtschaft, die fast 10 % anhaltendes Wachstum verbuchen konnte. Früher konnte China seinen Ölbedarf aus eigenen Ressourcen decken. Schätzungen gehen heute davon aus, dass das Land schon 40 % seines Ölverbrauchs importieren muss (<http://data.chinaoilweb.com/crudeoil-import-data/index.html>).

Zusätzlich zu den Industrieländern wie Japan und Deutschland, die viel Öl importieren müssen, haben Schwellenländer wie Indien und Brasilien in den vergangenen fünf Jahren einen enormen Anstieg der Fahrzeugverkäufe erlebt. Diese Länder müssen dieselben Herausforderungen hinsichtlich Ölnachfrage und Umweltproblematik bewältigen. Abbildung 1.3 zeigt Rohölverbrauch und -nachfrage pro Tag nach Ländern [13].

Abbildung 1.4 zeigt die weltweite Ölnachfrage, Verlauf und Prognose der Ölproduktion (<http://www.eia.doe.gov/steo/contents.html>). Viele Analytiker glauben an die Theorie, dass sich Ölnachfrage und -produktion derzeit auf einem historischen Höchststand befinden und dass die Ölproduktion bald nicht mehr ausreichen wird. Die klaffende Lücke zwischen Nachfrage und Produktion wird eine zweite Ölkrise hervorrufen, die uns wahrscheinlich unvorbereitet treffen wird.

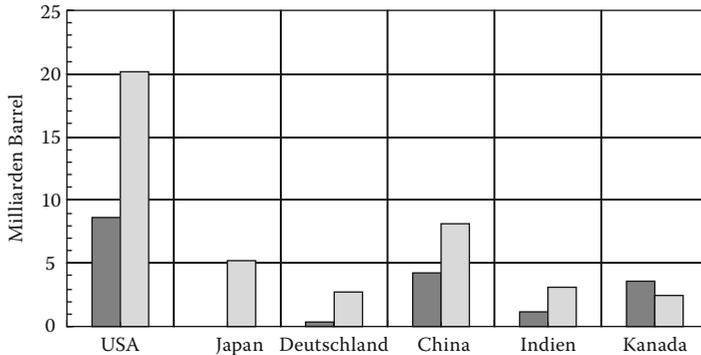


Abb. 1.3 Durchschnittlicher Rohölverbrauch im Jahr 2008 pro Tag nach Ländern, in Millionen Barrel. Die linke Spalte jedes Landes entspricht der Produktion, die rechte dem Verbrauch [13].

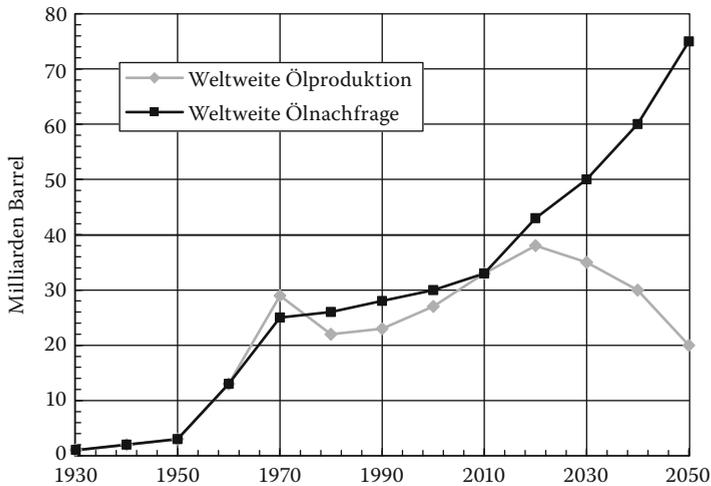


Abb. 1.4 Weltweite Ölnachfrage, Verlauf und Prognose der Ölproduktion.

1.1.2

Umwelt

Kohlenstoffemissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe sind die primäre Ursache von Treibhausgasemissionen, die zu globalen Umweltveränderungen und Klimawandel führen. Abbildung 1.5 zeigt die fossilen Kohlenstoffemissionen von 1900 bis heute [14]. Der steilste Anstieg an Treibhausgasemissionen fand in den letzten 100 Jahren statt. Mit dem Anstieg der Treibhausgasemissionen ist auch der globale Temperaturanstieg verbunden. Abbildung 1.6 zeigt den Mittelwert der globalen Änderung von Land- und Ozeantemperatur zwischen 1880 und heute, wobei die Temperatur der Jahre 1951–1980 als Vergleichsbasis dienten (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>).