

# Hybridfahrzeuge

Peter Hofmann

# Hybridfahrzeuge

Ein alternatives Antriebssystem für die  
Zukunft

 Springer

Peter Hofmann  
Kraftfahrzeugbau  
Institut für Fahrzeugantriebe  
und Automobiltechnik  
Technische Universität Wien  
Wien  
Austria

ISBN 978-3-7091-1779-8

ISBN 978-3-7091-1780-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-7091-1780-4

Springer Wien Heidelberg New York Dordrecht London

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

Springer

© Springer-Verlag Wien 2010, 2014

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

## **Ergänzendes Vorwort zur 2. Auflage**

Hybridfahrzeuge stellen eine faszinierende Technik dar. Auf Grund der großen Anzahl an Freiheitsgraden hinsichtlich Topologie, Komponenten, Dimensionierung bis hin zur Betriebsstrategie ergibt sich eine unermessliche Vielfalt an möglichen Lösungen. Dabei steigt die Erwartungshaltung in Bezug auf Anforderungen wie Effizienz, Fahrspaß, Dynamik, Fahrverhalten, Komfort usw. an, wobei die Kosten nicht aus dem Ruder laufen dürfen. Gerade diese Möglichkeiten und Potentiale, verbunden mit den Herausforderungen, sind ein besonderer Anreiz für kreative TechnikerInnen und haben dazu geführt, dass in den letzten Jahren enorme Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten durchgeführt wurden mit einem gewaltigen Output von Erkenntnissen, Innovationen sowie zahlreichen neuen Hybridfahrzeugen und vorgestellten Konzepten.

Für die 2. Auflage des Buches wurde all dem Rechnung getragen, die Fülle an neuem Material ist dabei ebenso eingeflossen wie auch die Bezugnahme auf geänderte Randbedingungen – beispielsweise die Gesetzgebung. Dementsprechend wurde der Inhalt des Buches vollständig überarbeitet, aktualisiert und wesentlich erweitert.

Damit ein derart umfassendes Buch entstehen kann, bedarf es der Unterstützung von vielen Kräften – beginnend bei der Hilfe beim Recherchieren und Zusammentragen von Material, über das Zurverfügungstellen von Bildern und Erteilen von Abdruckgenehmigungen bis hin zum Korrekturlesen des Manuskripts.

Ich möchte allen, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben, herzlich danken!

Jänner 2014

Peter Hofmann

# Vorwort zur ersten Auflage

Hybridfahrzeuge erfahren derzeit einen enormen Aufschwung – gegenwärtig arbeiten alle Fahrzeughersteller an neuen Konzepten. Dabei ist die Technik grundsätzlich nicht neu, sondern beinahe so alt wie das Automobil selbst. Waren es in der Anfangsphase Probleme bei der Regelung der Verbrennungsmotoren und der Kraftübertragung (Schaltgetriebe und Kupplung), die eine Kombination mit einem Elektroantrieb begründeten, so sind es heute vor allem Kraftstoffverbrauch und Emissionen, die die Entwicklung von Hybridantriebssystemen forcieren. Neben diesen Aspekten ermöglicht der Hybridantrieb zusätzliche Funktionalitäten, die teilweise von rein elektrischem Fahren bis zu Torque-Vectoring-Systemen oder mobilen Stromversorgungsaggregaten reichen.

Die Hybridtechnik wird oft als Brückentechnologie zu Brennstoffzellenantrieben angesehen, wobei zu erwarten ist, dass Brennstoffzellenfahrzeuge zweckmäßigerweise mit elektrischen Energiespeichern ausgestattet werden und damit ebenfalls als Hybridfahrzeuge gelten. Auch für Elektrofahrzeuge werden Hybridkonzepte zur Einführung und Erreichen einer breiten Akzeptanz wesentlich beitragen. Durch die geringe Speicherkapazität der Batterien und die damit verbundenen unzureichenden rein elektrischen Reichweiten werden sich E-Fahrzeug-Konzepte mit zusätzlichem Verbrennungsmotor, die als Range Extender dienen, etablieren.

Derzeit zeichnet sich ein breiter Einsatzbereich, der von ersten Hybridmotorrädern (Rollern) über PKW-Anwendungen bis zu Nutzfahrzeugen und Bussen reicht, ab. Besonders wenn das Anforderungs- bzw. Fahrprofil genau definiert werden kann, wie es beispielsweise bei Bussen und Verteilernutzfahrzeugen der Fall ist, kann die Hybridtechnologie entsprechend angepasst und die Betriebsstrategien optimiert werden. Damit können maximale Verbrauchseinsparpotentiale erschlossen werden.

Mit zunehmender Hybridisierung steigen auch die Herstellkosten des Fahrzeuges an. Um langfristig Erfolg zu haben, müssen sich die höheren Kosten entweder durch das Kraftstoffeinsparpotential amortisieren oder ein entsprechender Mehrwert in Form von Fahrspaß bzw. zusätzlicher Funktionalität gegeben sein. Auch der Gesetzgeber wird zukünftig verstärkt durch Besteuerungs- und Mautsysteme sowie Fahr- oder Einfahrverbote in bestimmte Zonen die Einführung von neuen Technologien beeinflussen.

Damit Hybridfahrzeuge erfolgreich entwickelt und produziert werden können, müssen alle Komponenten optimal aufeinander abgestimmt werden. Dazu ist eine fachübergreifende Zusammenarbeit erforderlich. Die Stärken und Schwächen der einzelnen Systeme müssen so kombiniert werden, dass sich Synergien und ideale Ergänzungen ergeben. Darin liegt die größte Herausforderung bei der Entwicklung, da deutlich mehr Ingenieure als bisher aus verschiedenen Bereichen, beginnend von der Verbrennungskraftmaschine über das Getriebe, die Elektro-Maschinen und den Energiespeicher bis zum Gesamtfahrzeug kooperieren müssen. Dafür ist mehr Verständnis und Basiswissen aus anderen Fachbereichen notwendig sowie eine forcierte Kommunikation und Austausch von Wissen.

Beim Verfassen dieses Buches haben mich viele Fachleute durch Diskussion, Korrekturlesen des Textes und Anregungen wesentlich unterstützt, wofür ihnen herzlicher Dank gebührt. Besonders zu erwähnen sind an dieser Stelle Dr. Andreas Schmidhofer für die aktive Mitarbeit bei der Erstellung des Kapitels Elektromotoren, Dr. Hochgatterer bei der Erstellung des Kapitels elektrische Energiespeicher, DI Bernhard Schneeweiss bei der Erstellung des Kapitels Antriebsstrangmanagement sowie DI Wolfgang Kriegler für Anregungen zum Aufbau und der Struktur des Buches.

Zu erwähnen sind weiters: Prof. Hans Peter Lenz, Prof. Ernst Fiala, Prof. Jürgen Stockmar, Prof. Fritz Indra und Prof. Bernhard Geringer für Anregungen und Korrekturlesen.

Weiters danken möchte ich Herrn Jaroslav Richter, meiner Frau Tatjana sowie den vielen nicht genannten Kollegen und Freunden, für deren Unterstützung zum Gelingen des Buches.

Nicht unerwähnt sollen auch die vielen Beiträge von OEMs, Zulieferern, Forschungsstellen usw. bleiben, die wesentlich zur Erstellung des Buches beigetragen haben. Gerade bei der Hybridfahrzeugtechnik, die derart viele Bereiche umfasst, ist es essentiell, dass das Wissen von vielen Fachleuten herangezogen wird.

Im vorliegenden Buch werden die Grundlagen von Hybridfahrzeugen an sich, die verschiedenen Komponenten und Technologien sowie deren Vernetzung behandelt. Auch auf die Rahmenbedingungen, die wesentlich die Einführung von Hybridfahrzeugen beeinflussen, wird eingegangen. Auf Grund der großen Vielfalt an Fachbereichen ist es nicht möglich, bei jeder Komponente die Grundlagen ausführlich zu behandeln. Hier wird auf Spezialliteratur verwiesen. Mit dem Werk soll grundsätzlich das Verständnis der Funktionen sowie die Interaktionen zwischen den Systemen vermittelt werden. Bei verschiedenen System-Varianten werden die spezifischen Eigenschaften verglichen und daraus prädestinierte Einsatzbereiche aufgezeigt.

Hybridfahrzeugtechnik ist ein sehr innovativer Bereich, in welchem laufend Neuentwicklungen und Technologiesprünge vollzogen werden. Das Buch zeigt den gegenwärtigen Stand der Technik, sowie Entwicklungsziele und einen Ausblick über Potentiale auf.

Dieses Werk wendet sich an Studierende und Ingenieure in Forschung und Entwicklung, aber auch interessierte Praktiker. Diesen soll es als Lern- und Arbeitshilfe sowie als Nachschlagewerk dienen.

# Inhaltverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Verkehr und seine Auswirkungen auf die Umwelt .....	1
1.2 Historie von Hybridfahrzeugen .....	7
1.3 Prognosen für Hybridfahrzeuge .....	16
Literatur .....	21
<b>2 Definitionen und Klassifizierung der Hybridkonzepte</b> .....	23
2.1 Serieller Hybrid .....	23
2.1.1 Klassische Auslegung .....	25
2.1.2 Auslegung auf Grundlast .....	26
2.1.3 Auslegung für Plug-In-Hybridfahrzeuge ausgeführt als Elektrofahrzeuge mit Range Extender .....	26
2.1.4 Vor- und Nachteile des Serienhybridantriebs .....	27
2.2 Parallelhybrid .....	28
2.2.1 Parallelhybrid mit Momentenaddition .....	28
2.2.2 Parallelhybrid mit Drehzahladdition .....	29
2.2.3 Parallelhybrid mit Zugkraftaddition .....	29
2.2.4 Vor- und Nachteile des Parallelhybridantriebes .....	30
2.3 Leistungsverzweigter Hybrid .....	31
2.3.1 Planetengetriebe .....	34
2.3.2 Geometrische Beziehungen und Definitionen [3] .....	35
2.3.3 Kinematische Beziehungen .....	35
2.3.4 Dynamische Gleichungen .....	36
2.3.5 Input Split bzw. ausgangsgekoppeltes Getriebe .....	38
2.3.6 Output Split bzw. eingangsgekoppeltes Getriebe .....	40
2.3.7 Compound Split Getriebe .....	40
2.3.8 Getriebestufen des Two-Mode-Getriebes .....	43
2.3.9 Betriebsbereiche .....	44
2.4 Micro-Hybrid .....	50
2.4.1 48-Volt-Bordnetz .....	54
2.5 Mild-Hybrid .....	56

2.6	Full-Hybrid .....	58
2.7	Plug-In-Hybrid und Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV) .....	59
2.7.1	Plug-In-Hybridfahrzeug (mit niedrigerem Elektrifizierungsgrad) .....	59
2.7.2	Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV) .....	60
2.7.3	Ladesysteme .....	64
2.8	Zusammenfassung – Hybridsysteme .....	67
	Literatur .....	72
<b>3</b>	<b>Motivation zum Bau von Hybridantriebssystemen</b> .....	<b>75</b>
3.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	75
3.1.1	Situation in Kalifornien/USA .....	80
3.1.2	Situation in Europa .....	87
3.1.3	Situation in Japan .....	96
3.1.4	Situation in den BRIC Staaten .....	98
3.1.5	Zusammenfassung .....	103
3.2	Kraftstoffverbrauch .....	105
3.2.1	Lastpunktanhebung .....	105
3.2.2	Start/Stop .....	109
3.2.3	Elektrisches Fahren .....	111
3.2.4	Rekuperation .....	117
3.2.5	Zusammenfassung Kraftstoffverbrauchseinsparungspotenzial .....	124
3.3	Emissionen und Lärm .....	126
3.3.1	Elektrisch emissionsfrei fahren .....	126
3.3.2	Lastpunktverschiebung .....	127
3.3.3	Start/Stop .....	131
3.4	Funktionalität .....	133
3.4.1	E4WD – Elektrischer Allradantrieb .....	133
3.4.2	Torque Vectoring .....	134
3.4.3	Spannungsversorgung – Power Station .....	140
	Literatur .....	142
<b>4</b>	<b>Hybridkomponenten</b> .....	<b>145</b>
4.1	Verbrennungskraftmaschinen .....	145
4.1.1	Ottomotoren .....	145
4.1.2	Dieselmotoren .....	148
4.1.3	Zweitaktmotoren .....	149
4.1.4	Rotationskolbenmotoren .....	151
4.1.5	Stirlingmotor .....	153
4.1.6	Gasturbinen .....	156
4.1.7	Freikolbenmotoren .....	158
4.1.8	Brennstoffzellen .....	160
4.1.9	Vergleich der chemischen Energiewandler .....	163



4.2	Elektromaschinen .....	165
4.2.1	Betriebsgrenzen und Kennlinien .....	167
4.2.2	Gleichstrommaschinen .....	172
4.2.3	Drehstrommaschinen .....	174
4.2.4	Asynchronmaschine .....	175
4.2.5	Fremderregte Synchronmaschinen .....	177
4.2.6	Permanenterregte Synchronmaschinen .....	178
4.2.7	Geschaltete Reluktanzmaschine .....	180
4.2.8	Permanenterregte Transversalflussmaschinen .....	181
4.2.9	Vergleich der verschiedenen Elektromaschinen .....	184
4.2.10	Ausführungsformen .....	187
4.2.11	Getriebeintegration .....	191
4.3	Leistungselektronik (Stromrichter) .....	198
4.3.1	Halbleiter-Elemente .....	200
4.3.2	Leistungselektronische Schaltungen .....	202
4.4	Energiespeicher .....	209
4.4.1	Allgemeines .....	209
4.4.2	Sekundärelemente .....	215
4.4.3	Bauarten von Batteriezellen .....	222
4.4.4	Blei-Batterien (Pb/PbO <sub>2</sub> ) .....	226
4.4.5	Nickel-Cadmium-Batterien .....	229
4.4.6	Nickel-Metallhydrid-Batteriesysteme .....	229
4.4.7	Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion) .....	233
4.4.8	Na-NiCl-Batterie (Zebra) .....	237
4.4.9	Natrium-Schwefel-Batterie .....	238
4.4.10	Batteriemanagementsystem .....	238
4.4.11	Superkondensatoren .....	242
4.4.12	Schwungradspeicher .....	246
4.4.13	Hydropneumatische Speicher .....	253
4.4.14	Vergleich der Energiespeichersysteme .....	267
4.5	Nebenaggregate .....	273
4.5.1	Hydraulische Impulsspeicher HIS® .....	274
4.5.2	Elektrische Servolenkung .....	276
4.5.3	Heizung und Klimatisierung .....	279
	Literatur .....	283
<b>5</b>	<b>Antriebsstrangmanagement</b> .....	<b>287</b>
5.1	Betriebszustände von Hybridfahrzeugen .....	288
5.2	Betriebsstrategien .....	290
5.2.1	Einteilung von Betriebsstrategien .....	291
5.3	Simulation von Hybridfahrzeugen .....	295
5.3.1	Modellierung eines Hybridfahrzeugs .....	296
5.3.2	Beispiel Betriebsstrategie .....	306
5.3.3	Beispiel Betriebsstrategie mit Energiekostenindikator EKI [10, 11] .....	317

- 5.3.4 Beispiel für Dimensionierung der E-Komponenten ..... 324
- 5.3.5 Betriebsstrategien unter Einbeziehung des  
Thermomanagements ..... 329
- 5.4 Betriebsstrategien mit Prognosefunktionen ..... 335
  - 5.4.1 Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme ..... 336
  - 5.4.2 Beispielbetriebsstrategie mit Prognosefunktionen  
für ein serielles Hybridfahrzeug mit Range Extender ..... 338
  - 5.4.3 Fahrstreckenerkennung und Prognose ..... 341
- Literatur ..... 345
- 6 Ausgeführte Pkw- und Motorrad-Hybridkonzepte ..... 347**
  - 6.1 Audi Hybridfahrzeuge ..... 347
    - 6.1.1 Audi Q5 hybrid quattro und Audi A6 hybrid ..... 347
  - 6.2 AVL Hybridkonzepte ..... 351
    - 6.2.1 AVL ECO Target ..... 351
    - 6.2.2 AVL Turbohybrid ..... 354
  - 6.3 BMW Hybridfahrzeuge ..... 361
    - 6.3.1 BMW ActiveHybrid 3, 5 und 7 ..... 361
    - 6.3.2 BMW i3 mit Range Extender ..... 364
    - 6.3.3 BMW i8 ..... 366
    - 6.3.4 BMW X6 ActiveHybrid ..... 370
  - 6.4 Honda Hybridfahrzeuge ..... 376
    - 6.4.1 Integrated Motor Assist (IMA)-Hybridsystem  
von Honda ..... 376
    - 6.4.2 Honda Sport Hybrid/Accord Hybrid ..... 384
  - 6.5 Hyundai Hybridfahrzeuge ..... 386
    - 6.5.1 Hyundai ix35 FCEV ..... 386
  - 6.6 Lexus Hybridfahrzeuge ..... 388
    - 6.6.1 Lexus RX400h und RX450h ..... 388
    - 6.6.2 Lexus GS 450h ..... 393
    - 6.6.3 Lexus LS 600h ..... 396
    - 6.6.4 Lexus CT 200h ..... 400
  - 6.7 Magna HYSUV ..... 400
  - 6.8 Mercedes-Benz Hybridfahrzeuge ..... 403
    - 6.8.1 Mercedes-Benz S 400 HYBRID ..... 403
    - 6.8.2 Mercedes-Benz E300 BlueTec HYBRID ..... 410
    - 6.8.3 Mercedes-Benz ML 450 Hybrid ..... 419
  - 6.9 Opel Hybridfahrzeuge ..... 424
    - 6.9.1 Opel Flextreame ..... 424
    - 6.9.2 Opel Ampera ..... 425
  - 6.10 Peugeot Hybridfahrzeuge ..... 432
    - 6.10.1 Peugeot 3008Hybrid4 ..... 432
    - 6.10.2 Peugeot Hybrid Air ..... 437
  - 6.11 Piaggio MP3 Hybrid ..... 437

6.12	Porsche Hybridfahrzeuge .....	440
6.12.1	Porsche Cayenne S Hybrid .....	440
6.12.2	Porsche Panamera S E-Hybrid .....	442
6.12.3	Porsche 918 Spyder .....	445
6.13	Toyota Prius .....	450
6.13.1	Toyota Prius Generation 1 und 2 .....	450
6.13.2	Toyota Prius III und Prius Plug-In Hybrid .....	459
6.14	Volvo Hybridfahrzeuge .....	461
6.14.1	Volvo V60 Plug-In Hybrid .....	461
6.15	VW Hybridfahrzeuge .....	465
6.15.1	VW Golf Plug-In Hybrid .....	465
6.15.2	VW Jetta Hybrid .....	471
6.15.3	VW Touareg Hybrid .....	475
6.15.4	VW twinDRIVE .....	487
	Literatur .....	491
<b>7</b>	<b>Ausgeführte Lkw- und Bus-Hybridkonzepte .....</b>	<b>495</b>
7.1	Hybridbusse .....	503
7.1.1	Orion VII HybriDrive .....	503
7.1.2	Mitsubishi FusoAero .....	505
7.1.3	Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid .....	506
7.1.4	MAN Hybridbusse .....	508
7.1.5	Hess Doppelgelenk-Hybridbus .....	513
7.1.6	7700 parallel Hybrid Volvo I-SAM .....	514
7.1.7	IVECO – IrisbusHynovis .....	517
7.1.8	Solaris Urbino 18 .....	519
7.1.9	Scania Hybrid Concept Bus .....	520
7.2	Hybrid-Lkw .....	523
7.2.1	Mercedes-Benz Sprinter Plug-In-Hybrid .....	523
7.2.2	MAN Verteiler-Lkw .....	526
7.2.3	Mitsubishi FusoCanter Eco Hybrid .....	530
7.2.4	Mercedes-Benz Freightliner M2 106 Hybrid .....	533
7.2.5	Mercedes-Benz Atego BlueTec Hybrid .....	535
7.2.6	Volvo FE Hybrid .....	536
7.2.7	Abfallsammelfahrzeug mit hydrostatisch-regenerativem Bremssystem (HRB) .....	538
	Literatur .....	539
<b>8</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>541</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>543</b>