
Hybridfahrzeuge

Peter Hofmann

Hybridfahrzeuge

Grundlagen, Komponenten,
Fahrzeugbeispiele

3. Auflage



Springer Vieweg

Peter Hofmann
Kraftfahrzeugbau, Technische Universität
Wien Institut für Fahrzeugantriebe und
Automobiltechnik, Wien, Österreich

ISBN 978-3-662-66893-1 ISBN 978-3-662-66894-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-66894-8>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2010, 2014, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Markus Braun
Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Gewidmet

Prof. Dr. Hans Peter Lenz

Meinem Doktorvater und Vorbild

Vorwort zur 3. Auflage

Hybridfahrzeuge sind derzeit aufgrund der mannigfaltigen Vorteile hinsichtlich Verbrauchseinsparung bzw. Effizienz, dem Emissionsminderungspotenzial sowie dem Beitrag zur Erhöhung der Funktionalität die meist verkauften Fahrzeuge. Aus technischer Sicht wird das auch weiterhin so bleiben.

Allerdings laufen aktuell politisch induzierte Anstrengungen, Verbrennungsmotoren längerfristig als Antriebssystem für Fahrzeuge zu verbieten, was auch Hybridfahrzeuge betreffen würde. Damit soll der Klimakrise begegnet werden, wobei der Fokus bei den Maßnahmen rein auf eine Tank to Wheel (TtW) Betrachtung gelegt wird und weder die Bereitstellung von regenerativer Energie noch ein sektorübergreifender Lösungsansatz mit einbezogen werden.

Wie im Einleitungskapitel dargelegt, wird Europa auch weiterhin auf den Import von Energie angewiesen sein, wobei hier ein Wandel hin zu regenerativer Energie erfolgen muss. Da Strom nicht über lange Strecken effizient transferiert und auch nicht in großen Mengen gespeichert werden kann, muss die Energie in chemisch gebundener Form als sogenannte E-Fuels eingeführt werden. Dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass zum einen die vorhandene Infrastruktur weiterhin genutzt und zum anderen die Bestandsflotte ebenso mit klimaneutralen Kraftstoffen betrieben werden kann. Unter Einbeziehung der Fahrzeughherstellung stellen mit E-Fuels betriebene Hybridfahrzeuge die nachhaltigste Antriebslösung dar. Insofern ist zu erwarten, dass sich die Hybridtechnologie auch längerfristig als dominierendes Antriebssystem behaupten wird.

In der 3. Auflage des Buches erfolgte eine Aktualisierung, Erweiterung und weitere Detaillierung sämtlicher Themenbereiche, wobei auch auf die neue für Hybridfahrzeuge (HEV) relevante Gesetzgebung – im speziellen für Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) – eingegangen wird. Die Struktur wurde insofern geändert, als die Themen Topologie und Klassifizierung getrennt wurden ebenso wie auch Energie-Wandler und -Speicher bei den Komponenten.

Wegen der großen Verbreitung bzw. Anzahl an am Markt befindlichen Hybridfahrzeugen, können nicht mehr alle Fahrzeuge im Buch aufgeführt werden. Statt dessen wurden repräsentative HEVs für sämtliche Topologie-Varianten ausgewählt und

vorgestellt. Da auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge als Hybridfahrzeuge gelten, wurde auch ein aktuelles Brennstoffzellenfahrzeug aufgenommen. Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Buch das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

Auch bei dieser Auflage haben wieder viele Kräfte unterstützt – ich möchte allen, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben, herzlich danken! Dies gilt besonders für meine Frau, die sich beim Korrekturlesen zu einem Hybrid-Profi entwickelt hat.

Dezember 2022

Peter Hofmann

Ergänzendes Vorwort zur 2. Auflage

Hybridfahrzeuge stellen eine faszinierende Technik dar. Aufgrund 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 Potenziale, 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

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 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 Verbrauchseinsparpotenziale 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 Kraftstoffeinsparpotenzial 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. Aufgrund 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 Potenziale 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.

Februar 2010

Peter Hofmann

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Definition „Hybridfahrzeug“	1
1.2 Verkehr und seine Auswirkungen auf die Umwelt	2
1.3 Historie von Hybridfahrzeugen	11
1.4 Prognosen für Hybridfahrzeuge	21
Literatur	23
2 Antriebsstrangtopologien	25
2.1 Serieller Hybrid	25
2.2 Parallelhybrid	30
2.3 Leistungsverzweigter Hybrid	33
2.4 Kombinierte Hybridantriebe	45
2.5 Zusammenfassung – Antriebsstrangtopologien	53
Literatur	53
3 Klassifizierung von Hybridsystemen	55
3.1 Micro-Hybrid	55
3.2 Mild-Hybrid	65
3.2.1 48 V-Bordnetz	67
3.3 Full-Hybrid	69
3.4 Plug-In-Hybrid und Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV)	70
3.4.1 Plug-In-Hybridfahrzeug (mit niedrigerem Elektrifizierungsgrad)	71
3.4.2 Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV)	72
3.4.3 Ladetechnik	77
3.5 Zusammenfassung – Klassifizierung von Hybridsystemen	81
Literatur	84

4 Motivation zum Bau von Hybridantriebssystemen	87
4.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen	88
4.1.1 Hintergründe und geschichtliche Entwicklung	88
4.1.2 WLTP – World Harmonized Light Vehicle Test Procedure	94
4.1.3 Emissionsgrenzwerte	107
4.1.4 Flottenverbrauchsbeschränkung	109
4.1.5 Zusammenfassung	112
4.2 Kraftstoffverbrauch	114
4.2.1 Lastpunktverschiebung	114
4.2.2 Start/Stopp	118
4.2.3 Elektrisches Fahren	121
4.2.4 Segeln	130
4.2.5 Rekuperation	130
4.2.6 Elektrifizierte Nebenaggregate	137
4.2.7 Zusammenfassung Kraftstoffverbrauchseinsparungspotenzial	141
4.3 Emissionen und Lärm	144
4.3.1 Elektrisch emissionsfrei Fahren	144
4.3.2 Lastpunktverschiebung	145
4.3.3 Start/Stopp	148
4.3.4 Elektrisch beheizter Katalysator E-Kat	149
4.3.5 Potenzial beim Dieselmotor	151
4.4 Funktionalität	159
4.4.1 E4WD – Elektrischer Allradantrieb	159
4.4.2 Torque-Vectoring	162
4.4.3 Spannungsversorgung – Power Station	168
Literatur	169
5 Energiewandler für Hybridfahrzeuge	175
5.1 Verbrennungskraftmaschinen	175
5.1.1 Ottomotoren	175
5.1.2 Dieselmotoren	179
5.1.3 2-Takt-Motoren	180
5.1.4 Rotationskolbenmotoren	182
5.1.5 Stirlingmotor	184
5.1.6 Gasturbinen	189
5.1.7 Freikolbenmotoren	192
5.2 Brennstoffzellen	194
5.3 Vergleich der chemischen Energiewandler	199
5.4 Elektromaschinen	202
5.4.1 Charakteristik, Verluste und Kühlung von E-Maschinen	204
5.4.2 Gleichstrommaschinen	212

5.4.3	Drehstrommaschinen	214
5.4.4	Asynchronmaschine (ASM)	218
5.4.5	Permanenterregte Synchronmaschine (PSM)	220
5.4.6	Fremderregte Synchronmaschine (FESM)	223
5.4.7	Geschaltete Reluktanzmaschine (SRM)	224
5.4.8	Permanenterregte Transversalflussmaschine	226
5.4.9	Vergleich der verschiedenen Elektromaschinen	229
5.4.10	Ausführungsformen	232
5.5	Leistungselektronik (Stromrichter)	251
5.5.1	Halbleiter-Elemente	253
5.5.2	Leistungselektronische Schaltungen	258
5.6	Hydrostatische Fahrantriebe	265
5.6.1	Hydraulische Kenngrößen des verlustfreien Antriebs [74]	268
5.6.2	Hydraulik-Hybrid bzw. Hybrid-Air von Bosch und PSA	272
5.7	Nebenaggregate	274
5.7.1	Elektrisch angetriebene Verdichter und elektrisch unterstützte Turbolader	276
5.7.2	Hydraulische Impulsspeicher HIS®	278
5.7.3	Kühlung	282
5.7.4	Heizung und Klimatisierung	283
Literatur		287
6	Energiespeicher für Hybridfahrzeuge	293
6.1	Allgemeines	293
6.2	Sekundärelemente	299
6.2.1	Energetische Betrachtungen	302
6.2.2	Kenngrößen von Batterien	302
6.3	Alterung von Batteriezellen	306
6.4	Bauarten von Batteriezellen	307
6.5	Batterieaufbau und Verschaltung der Zellen	312
6.6	Blei-Batterie (Pb/PbO ₂)	313
6.6.1	Funktion	313
6.6.2	Aufbau	314
6.7	Nickel-Metallhydrid-Batterie	316
6.7.1	Funktion	316
6.7.2	Bauformen von Nickel-Metallhydrid-Zellen	318
6.7.3	Zusammenfassung der generellen Eigenschaften des NiMH-Systems	318
6.8	Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion-Batterie, LIB)	319
6.8.1	Funktion	319
6.8.2	Alterungsmechanismen von Li-Ionen-Zellen	323
6.8.3	Bauformen von Li-Ionen-Zellen	325

6.8.4	Li-Ionen-Batteriesysteme	327
6.8.5	Generelle Eigenschaften	328
6.9	Batteriemanagementsystem	328
6.10	Superkondensatoren (Doppelschichtkondensatoren, Supercap, Ultracap)	334
6.11	Schwungradspeicher	338
6.12	Hydropneumatische Speicher	345
6.12.1	Blasenspeicher	346
6.12.2	Kolbenspeicher	347
6.12.3	Membranspeicher	347
6.12.4	Auslegung und Kenngrößen	348
6.12.5	Zustände bzw. Zustandsänderungen	349
6.13	Vergleich der Energiespeichersysteme	352
6.13.1	Elektrische Energiespeicher	352
6.13.2	Weiterentwicklungen bei Fahrzeugbatterien	353
6.13.3	Vergleich aller möglichen Speicherformen	356
	Literatur	357
7	Antriebsstrangmanagement	361
7.1	Betriebszustände von Hybridfahrzeugen	363
7.2	Betriebsstrategien	365
7.2.1	Offline-Betriebsstrategien	365
7.2.2	Online-Betriebsstrategien – regelbasiert	367
7.2.3	Online-Betriebsstrategien - optimierungsbasiert	370
7.2.4	Betriebsstrategien mit Prognosefunktionen	372
7.3	Beispiele für Betriebsstrategien	379
7.3.1	Heuristische Betriebsstrategie	379
7.3.2	Heuristische Betriebsstrategie mit Einbeziehung des Thermomanagements	390
7.3.3	Betriebsstrategie mit Energiekostenindikator EKI	397
7.3.4	Beispielbetriebsstrategie mit Prognosefunktionen für ein serielles Hybridfahrzeug mit Range Extender	405
	Literatur	408
8	Repräsentative Hybridfahrzeuge	411
8.1	Serielle Hybridfahrzeuge	412
8.1.1	Nissan Note e-Power	412
8.1.2	Serielles Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug Toyota Mirai	418
8.2	Parallele Hybridfahrzeuge	430
8.2.1	P0-Hybridfahrzeug: VW Golf 8 – 48 V-Mild-Hybrid	430
8.2.2	P1-Hybridfahrzeug: Mercedes S 500 mit 48 V-Bordnetz	440
8.2.3	P2-Hybridfahrzeug: Mercedes-Benz E 300 BlueTec HYBRID	447

8.2.4	P2-Plug-In-Hybridfahrzeuge von Mercedes-Benz	456
8.2.5	P3-Hybridfahrzeug: Mercedes-AMG GT 63 S E PERFORMANCE	467
8.2.6	P4-Hybridfahrzeug: BMW 225xe Active Tourer.	471
8.3	Leistungsverzweigte Hybridfahrzeuge	479
8.3.1	Toyota Prius	479
8.4	Kombinierte Hybridfahrzeuge	497
8.4.1	P14-Hybridfahrzeug: Honda NSX.	497
8.4.2	Seriell-Paralleles Hybridfahrzeug: Honda Sport Hybrid I-MMD System im Honda Accord und Honda CR-V 2.0	501
8.4.3	Leistungsverzweigt-Paralleles Hybridfahrzeug: Lexus RX400h und RX450h	510
8.4.4	Leistungsverzweigt-Serielles Hybridfahrzeug: Opel Ampera	516
	Literatur.	524
	Stichwortverzeichnis.	529