
ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Konrad Reif · Karl E. Noreikat · Kai Borgeest
Herausgeber

Kraftfahrzeug- Hybridantriebe

Grundlagen, Komponenten, Systeme,
Anwendungen

Mit 266 Abbildungen und 44 Tabellen

 Springer Vieweg

Herausgeber

Prof. Dr. Konrad Reif
Duale Hochschule Baden-Württemberg
Friedrichshafen, Deutschland
reif@dhbw-ravensburg.de

Prof. Karl E. Noreikat
NorCon Scientific Consulting
Esslingen, Deutschland
noreikat@norcon-solutions.de

Prof. Dr. Kai Borgeest
Hochschule Aschaffenburg
Aschaffenburg, Deutschland
kai.borgeest@fh-aschaffenburg.de

ISBN 978-3-8348-0722-9
DOI 10.1007/978-3-8348-2050-1

ISBN 978-3-8348-2050-1 (eBook)

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

Umschlag Bildquelle: Daimler AG
Mit freundlicher Unterstützung von Daimler

Springer Vieweg

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 2012

Dieses 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 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 und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Hybridantriebe sind inzwischen ein fester Bestandteil der Serienprodukte eines Fahrzeugherstellers. Damit ist dieses Fachgebiet zu einem wichtigen Bestandteil der Fahrzeugtechnik geworden, dem in der Aus- und Weiterbildung für alle kraftfahrzeugtechnischen und verwandten Berufe Rechnung getragen werden muss. Dies betrifft zum einen die Lehrinhalte an den Hochschulen, beruflichen Schulen und in den Ausbildungsabteilungen der Fahrzeug- und Zulieferfirmen, zum anderen aber auch die Weiterbildung der einzelnen Ingenieure und Fachleute in der Praxis, die in Form von Lehrgängen oder durch Selbststudium erfolgen kann.

An dieser Stelle will das Buch „Kraftfahrzeug-Hybridantriebe“ unterstützen. Es behandelt alle Themen, die für Aufbau und Funktion von Hybridantrieben wichtig sind. Dabei wurde auf fachlich fundierte Darstellung, gute Verständlichkeit und anwendungsnahe Praxisrelevanz großer Wert gelegt. Dies ist dadurch möglich, dass die einzelnen Abschnitte von einer Vielzahl an Fachleuten erarbeitet wurden, die in der Fahrzeug- und Zulieferindustrie sowie im Hochschulbereich an den dargestellten Themen arbeiten.

Ziel des Buches ist es, die grundlegenden Prinzipien zu erklären. Damit das Buch für den Leser in einer begrenzten Zeit lesbar ist, musste das Material beschränkt und bei den Themen Schwerpunkte gesetzt werden. Dies erfolgte unter zwei Prämissen: Wichtig sind einerseits die Themen, die für das Verständnis des Hybridantriebs unabdingbar sind, wie z. B. die Antriebsstrukturen. Andererseits wurde aber auch auf eine ausführliche und detaillierte Darstellung der Themen Wert gelegt, die spezifisch für Hybridfahrzeuge sind, wie z. B. elektrische Maschinen, Elektronik und vor allem die Energiespeicher.

Die Gliederung wurde so gewählt, dass beim Lesen des Buchs sukzessive ein umfassendes Verständnis aufgebaut wird. Bei manchen eng zusammenhängenden Themen musste eine sinnvolle Trennung gefunden werden. So hängen beispielsweise die Antriebsstrukturen eng mit den Getrieben zusammen: Die Planetengetriebe zur Leistungsverzweigung werden in diesem Buch bei den Antriebsstrukturen behandelt, der Abschnitt über Getriebe behandelt dagegen die „normalen Fahrzeuggetriebe“ und deren Hybridisierung. Ebenso hängt das Kapitel über die Betriebsstrategie mit dem über die Simulation und die Auslegung eng zusammen. Sie erklären aber die Sachverhalte aus verschiedenen Sichtweisen. Die Fragestellung der Betriebsstrategie lautet: Wie funktioniert ein Hybridfahrzeug in optimaler Weise? Und die der Simulation und Auslegung: Wie entwirft man ein optimal

funktionierendes Hybridfahrzeug? Außerdem war es zum Teil notwendig, in manchen Kapiteln einige Inhalte vorweg in Kurzform zu behandeln, beispielsweise manche Inhalte der Betriebsstrategie, um den Aufbau und die Funktion des Antriebs zu erklären.

Das Buch richtet sich an Studenten der Ingenieurwissenschaften, in der Praxis stehende Ingenieure und Fachleute die Aufbau, Funktion, Komponenten und Systeme des Hybridantriebs von Kraftfahrzeugen kennenlernen wollen.

Unser Dank gilt der Firma Daimler AG, ohne deren finanzielle und fachliche Unterstützung das Buch in dieser Form nicht hätte realisiert werden können.

Beiträge von 25 Autoren haben es möglich gemacht, dass dieses Buch entstehen konnte. Ihnen gilt unser besonderer Dank. Sie haben ihr wertvolles Fachwissen zur Verfügung gestellt. Für fachliche Unterstützung, vor allem in der Endphase der Buchentstehung, danken wir Herrn Dr. N. Amann, Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Biermann, Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Engeling, Herrn Dipl.-Ing. F. Gretzmeier und Herrn Dr. D. Kraft.

Ferner danken wir dem Verlag Springer Vieweg für die Anregung zu diesem Buch und die hervorragende Zusammenarbeit bei der professionellen Realisierung des Buchprojektes.

Friedrichshafen, Esslingen, Aschaffenburg im Oktober 2012

Konrad Reif
Karl E. Noreikat
Kai Borgeest

Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiterverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
Konrad Reif, Karl E. Noreikat und Kai Borgeest	
1.1 Definition, Einsatz, Anforderungen	1
1.1.1 Vorteile des Hybridantriebs	2
1.1.1.1 Weniger CO ₂ -Ausstoß durch Hybridfahrzeuge	2
1.1.1.2 Mehr Fahrdynamik und Fahrkomfort durch Hybridfahrzeuge	3
1.1.1.3 Hybridfahrzeuge als Zwischenschritt zu Elektrofahrzeugen	3
1.1.2 Technische Neuentwicklungen	3
1.2 Geschichte	4
1.2.1 Frühe Motivation	4
1.2.2 Umweltbewusstsein und Ölpreis	4
1.2.3 Fahrzeuge	6
Literatur	6
2 Hybride Antriebsstrukturen	7
Siegfried Saenger-Zetina und Markus Wagner	
2.1 Übersicht über die Komponenten	7
2.1.1 Einführung	7
2.1.2 Kombination von Wandlern und Speichern	8
2.1.2.1 Energiewandler	8
2.1.2.2 Energiespeicher	9
2.1.2.3 Drehzahl- und Drehmomentwandler	13
2.2 Vorteile eines Hybridantriebs	14
2.2.1 Technische Vorteile	15
2.2.1.1 Elektrisches Fahren	17
2.2.1.2 Rekuperatives Bremsen	17
2.2.1.3 Lastpunktverschiebung	21

2.2.1.4	Boosten	23
2.2.1.5	Start-Stopp-Funktion	24
2.2.1.6	Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad im Testzyklus	25
2.2.2	Subjektive Vorteile	26
2.2.2.1	Fahr- und Schaltkomfort	26
2.2.2.2	Geräusch- und Schwingungsverhalten	27
2.3	Konzepte und Betriebsweisen	27
2.3.1	Serielle Hybride	28
2.3.1.1	Konstruktive Merkmale	28
2.3.1.2	Varianten des seriellen Hybridantriebs	29
2.3.1.3	Beispiele von seriellen Hybriden	30
2.3.2	Parallele Hybride	31
2.3.2.1	Konstruktive Merkmale	31
2.3.2.2	Ausprägungen von Parallelhybriden	33
2.3.2.3	Beispiele von Parallelhybriden	39
2.3.3	Leistungsverzweigte Hybride	39
2.3.3.1	Konstruktive Merkmale	39
2.3.3.2	Beispiel von Leistungsverzweigungen	52
2.3.3.3	Beispiele von leistungsverzweigten Hybridantrieben	56
2.4	Klassifizierung nach Funktionalität	62
2.4.1	Anforderungen	62
2.4.2	Start-Stopp-Systeme	62
2.4.2.1	Die Start-Stopp-Funktion	63
2.4.2.2	Starteinrichtungen für Start-Stopp-Systeme	65
2.4.3	Hybrid-Funktionen	67
2.4.3.1	Mikro-Hybrid	67
2.4.3.2	Mild-Hybrid	67
2.4.3.3	Voll-Hybrid	67
2.4.4	Extern aufladbare Hybride	68
2.4.4.1	Hintergrund	68
2.4.4.2	Varianten	68
2.4.4.3	Lademöglichkeiten von Batterien	69
Literatur		72
3	Komponenten des Hybridantriebs	75
	Notker Amann, Matthias Beck, Otmar Bitsche, Pedro Casals, Bernd Cebulski, Christine Ehret, Jochen Faßnacht, Andreas Greff, Franz Gretzmeier, Gün-ter Gutmann, Frank Hentschel, Markus van Heyden, Markus G. Kliffken, Dieter Kraft, Axel Müller, Roland Norden, Robert Stawiarski, Markus Wagner, Toni Viscido und Harald Weiler	
3.1	Auslegung des Verbrennungsmotors	75
3.1.1	Ottomotor	78

3.1.2	Dieselmotor	82
3.1.3	Alternative Antriebe	85
3.1.3.1	Stirlingmotor	85
3.1.3.2	Dampfmotor	88
3.1.3.3	Gasturbine	90
3.1.4	Zusammenfassung	92
3.2	Elektrische Maschinen	93
3.2.1	Überblick	93
3.2.1.1	Allgemeines zu elektrischen Maschinen	93
3.2.1.2	Prinzipien der physikalischen Wirkungsweise	94
3.2.1.3	Grundzüge der Drehfeldtheorie	97
3.2.1.4	Werkstoffe	105
3.2.2	Synchronmaschinen	107
3.2.2.1	Prinzipieller Ständeraufbau	107
3.2.2.2	Prinzipielle Läuferbauformen	108
3.2.2.3	Sonderform Transversalflussmaschine	113
3.2.2.4	Wirkungsweise	115
3.2.2.5	Ausführungsbeispiele	119
3.2.2.6	Vor- und Nachteile bei Hybridfahrzeugen	121
3.2.3	Asynchronmaschinen	122
3.2.3.1	Einleitung	122
3.2.3.2	Prinzipieller Aufbau der Drehstrom-Asynchronmaschine mit Käfigläufer	123
3.2.3.3	Wirkungsweise	125
3.2.3.4	Betriebsverhalten	127
3.2.3.5	Vor- und Nachteile bei Hybridfahrzeugen	130
3.2.3.6	Anwendungsbeispiele	130
3.2.3.7	Ausführungsbeispiele	132
3.2.4	Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine	134
3.2.4.1	Einführung	134
3.2.4.2	Mathematisches Modell der permanenterregten Synchronmaschine	135
3.2.4.3	Aufbau der feldorientierten Regelung	138
3.2.4.4	Sensorik	141
3.2.4.5	Sonstige Regelungselemente für Hybridfahrzeuge	142
3.3	Elektrik und Elektronik	143
3.3.1	Energiebordnetz	144
3.3.1.1	Bordnetztopologien	144
3.3.1.2	Bordnetzsicherheit	160
3.3.2	Steuergeräte und Kommunikation	163
3.3.2.1	Funktionsorientierte Vernetzungsstrategie	164

3.3.2.2	Zonenorientierte Vernetzungsstrategie	166
3.3.2.3	Architekturen	168
3.3.2.4	Bussysteme	169
3.3.2.5	Anbindung des Fahrzeugs an Infrastrukturen	173
3.3.3	Leistungselektronik	174
3.3.3.1	Grundlagen und Systemeinordnung	174
3.3.3.2	Technik und Bauelemente	174
3.3.3.3	Topologien und Schaltungstechnik	176
3.3.3.4	Zusätzliche Anforderungen	179
3.3.3.5	Aktuelle Entwicklungen	180
3.4	Energiespeicher	184
3.4.1	Überblick: Rolle der Energiespeicher	184
3.4.2	Bleibatterie	185
3.4.2.1	Elektrochemie des Bleiakkumulators	185
3.4.2.2	Aufbau des Bleiakkumulators	188
3.4.2.3	Bauarten	194
3.4.2.4	Eigenschaften von Bleibatterien	196
3.4.2.5	Stand der Technik	201
3.4.2.6	Entwicklungstendenzen bei Bleiakkumulatoren für Fahrzeuge	205
3.4.3	Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren	207
3.4.4	Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren	212
3.4.4.1	Elektrochemie	213
3.4.4.2	Stand der Technik	215
3.4.4.3	Zellendesign	215
3.4.4.4	Betriebs- und Alterungsverhalten	220
3.4.5	Lithium-Ionen-Batterien	222
3.4.5.1	Elektrochemie	225
3.4.5.2	Stand der Technik	226
3.4.5.3	Zellenkomponenten	228
3.4.5.4	Zellendesign	232
3.4.6	Anwendung elektrochemischer Speicher in Kraftfahrzeugen	235
3.4.6.1	Bordnetz	235
3.4.6.2	Elektrochemische Speichersysteme für Hybridfahrzeuge	238
3.4.6.3	Ausblick	242
3.4.7	Hydraulische Hybridantriebe und Energiespeicher	242
3.4.7.1	Abgrenzung zum elektrischen Hybrid	242
3.4.7.2	Aufbau und Systemkomponenten des hydrostatisch-regenerativen Bremssystems	245
3.4.7.3	Ergebnisse an einem Abfallsammelfahrzeug mit hydrostatisch-regenerativem Bremssystem	247

3.4.7.4	Ergebnisse an einem Abfallsammelfahrzeug mit hydrostatisch-regenerativem Bremssystem	249
3.4.8	Schwungräder	249
3.5	Fahrzeuggetriebe	253
3.5.1	Grundlagen	253
3.5.2	Getriebearten	259
3.5.2.1	Getriebe mit Zugkraftunterbrechung	260
3.5.2.2	Getriebe ohne Zugkraftunterbrechung	265
3.5.3	Einfluss der Hybridisierung auf das Getriebe	274
3.6	Nebenaggregate	279
3.6.1	Einleitung	279
3.6.2	Mechanischer und elektrischer Antrieb	279
3.6.3	Einsatz von Nebenaggregaten in unterschiedlichen Antriebssträngen	280
3.6.3.1	Konventioneller Antriebsstrang	281
3.6.3.2	Teilweise elektrifizierter Antriebsstrang	281
3.6.3.3	Vollständig elektrifizierter Antriebsstrang	284
3.6.4	Aggregate im Hybridfahrzeug	286
3.6.4.1	Elektrische Maschine	286
3.6.4.2	Lenkkräftunterstützung	287
3.6.4.3	DC/DC-Wandler zur Bordnetzversorgung	290
3.6.4.4	Potentialtrennender DC/DC-Wandler zur Bordnetzstabilisierung	291
3.6.5	Betrieb von Nebenaggregaten im Traktionsnetz	291
3.6.6	Energiemanagement	292
	Literatur	293
4	Betriebsstrategien	301
	Jan-Welm Biermann und Christian Renner	
4.1	Einleitung	301
4.2	Antriebskomponenten	302
4.2.1	Verbrennungsmotor	302
4.2.2	Elektrische Maschine	303
4.2.3	Energiespeicher	304
4.2.4	Nebenaggregate	305
4.3	Entwurf von Betriebsstrategien	306
4.3.1	Basisanforderungen	306
4.3.1.1	Start-Stopp-Betrieb	307
4.3.1.2	Boosten	307
4.3.1.3	Rekuperation	308
4.3.1.4	Elektrisches Fahren	309
4.3.1.5	Lastpunktanhebung und Lastpunktverlagerung	311

4.3.2	Entwicklungsprozess	315
4.4	Anwendungsbeispiel	317
4.4.1	Fahrzeug	317
4.4.2	Betriebsstrategie	318
4.4.3	Prädiktive Betriebsstrategie	321
	Literatur	323
5	Simulation und Auslegung	325
	Dieter Kraft, Thomas Huber und Sandra Sterzing-Oppel	
5.1	Modellierung und Simulation	325
5.2	Validierung der Simulationsmodelle	328
5.3	Optimale Auslegung von Hybridfahrzeugen	330
5.3.1	Bestimmung von Zielgrößen	330
5.3.2	Optimierung einer einzelnen Zielgröße	331
5.3.3	Optimierung mehrerer Zielgrößen	332
5.3.4	Datenbasierte Modellierung	333
5.4	Ergebnisse der optimalen Auslegung	335
5.4.1	Ausgangspunkt und Ziele	335
5.4.2	Modellierung	336
5.4.3	Optimierung	338
5.4.4	Vergleich von Hybridkonzepten	338
5.4.5	Validierung der Ergebnisse	338
	Literatur	339
	Sachverzeichnis	341

Mitarbeiterverzeichnis

1 Einleitung

Prof. Dr. Konrad Reif, Duale Hochschule Baden-Württemberg

Prof. Karl. E. Noreikat, NorCon Esslingen

Prof. Dr. Kai Borgeest, Hochschule Aschaffenburg

2 Hybride Antriebsstrukturen

Dr. Siegfried Saenger-Zetina, Daimler AG, Sindelfingen

2.3.3 Leistungsverzweigte Hybride

B. Eng. MBA Markus Wagner, Daimler AG, Stuttgart Untertürkheim

Dr. Siegfried Saenger-Zetina, Daimler AG, Sindelfingen

3 Komponenten des Hybridantriebs

3.1 Auslegung des Verbrennungsmotors

Andreas Greff, Continental Automotive GmbH, Regensburg

3.1.3 Alternative Antriebe

B. Eng. MBA Markus Wagner, Daimler AG, Stuttgart Untertürkheim

Dipl.-Ing. Frank Hentschel, vormals Daimler AG, Sindelfingen

3.2 Elektrische Maschinen

Dr. Notker Amann, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen

Dr. Axel Müller, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen

Marcus van Heyden, ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt

3.3 Elektrik und Elektronik

3.3.1 Energiebordnetz

Dr.-Ing. Jochen Faßnacht, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Dipl.-Ing. (FH) Franz Gretzmeier

Dr.-Ing. Toni Viscido, DSA – Daten- und Systemtechnik GmbH, Aachen

3.3.2 Steuergeräte und Kommunikation

Dr. Dieter Kraft, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Dr.-Ing. Toni Viscido, DSA – Daten- und Systemtechnik GmbH, Aachen

Dr. Harald Weiler, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

3.3.3 Leistungselektronik

Bernd Cebulski, IAV GmbH Chemnitz

3.4.1–3.4.6 Energiespeicher

Dr. Günter Gutmann, Beratung und Wissensvermittlung für elektrochemische Energiespeicher und Wandler, Esslingen

Dipl.-Ing. Otmar Bitsche, Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft, Stuttgart

3.4.7 Hydraulische Hybridantriebe und Energiespeicher

Dr.-Ing. Matthias Beck, Bosch Rexroth, Elchingen

Dr. Christine Ehret, Bosch Rexroth, Elchingen

Dr.-Ing. Markus G. Kliffken, Bosch Rexroth, Elchingen

Robert Stawiarski, Bosch Rexroth, Elchingen

3.4.8 Schwungräder

B. Eng. MBA Markus Wagner, Daimler AG, Stuttgart Untertürkheim

Dipl.-Ing. Frank Hentschel, vormals Daimler AG, Sindelfingen

3.5 Fahrzeuggetriebe

Dipl.-Ing. Pedro Casals, BMW AG, vormals ZF Friedrichshafen AG

3.6 Nebenaggregate

Dr. Dieter Kraft, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Roland Norden, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

4 Betriebsstrategien

Prof. Dr.-Ing. habil. Jan-Welm Biermann, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen Universität

Dipl.-Ing. Christian Renner, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen

5 Simulation und Auslegung

Dipl.-Ing. Thomas Huber, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Dr. Sandra Sterzing-Oppel, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Dr. Dieter Kraft, Robert Bosch GmbH, Stuttgart