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 Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch, anwendungsorientiert und aktuell zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Ingenieure der Kraftfahrzeugentwicklung und Antriebstechnik sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Fahrzeug- und Antriebstechnik. 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.

Helmut Tschöke
Herausgeber

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Basiswissen

Springer Vieweg

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Helmut Tschöke
Otto-von-Guericke-Universität
Institut für Mobile Systeme
Magdeburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-04643-9
DOI 10.1007/978-3-658-04644-6

ISBN 978-3-658-04644-6 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

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 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

Um die zukünftigen Mobilitätsbedürfnisse zu erfüllen, steht die Automobilindustrie derzeit vor einem bedeutenden Technologiesprung – der Elektrifizierung des Fahrantriebs. Parallel dazu steht der klassische Verbrennungsmotor: Er wird auch weiterhin die dominierende Antriebsquelle bleiben und bietet noch nicht absehbare Verbesserungspotenziale, um den Anforderungen an Emissionen und Ressourcenschonung gerecht zu werden.

Die Automobilhersteller sind aufgefordert, neben den limitierten Schadstoffemissionen auch die vorgegebenen Grenzen für den CO₂-Ausstoß einzuhalten. Ab 2021 dürfen europäische Automobile im Durchschnitt nur noch 95 g CO₂/km emittieren, 2025 sollen es 70 g CO₂/km oder gar noch weniger sein. Aktuell liegt der Durchschnittswert bei Neuwagen in Deutschland bei 132 g CO₂/km. Richtungsweisende Fahrzeugstudien, die speziell auf die urbane Mobilität der Zukunft gerichtet sind, können weltweit unter anderem auf Automobilausstellungen betrachtet werden. Sie verdeutlichen, dass die Automobilindustrie und die Kunden in den kommenden Dekaden vor signifikanten technischen, wirtschaftlichen sowie infrastrukturellen Veränderungen stehen.

In diesem Kontext stehen mit den ökologischen Aspekten verbundene technische Innovationen, die nachhaltig den Wirtschaftsstandort Deutschland auf dem Gebiet alternativer Mobilität stärken und sichern: Deutschland soll Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität werden. Bis 2020 sollen eine Million, bis 2030 sogar sechs Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren. Das Fernziel des politischen Plans: Von 2050 an soll der urbane Straßenverkehr überwiegend mit regenerativen Energieträgern realisiert werden.

Die fortschreitende Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedeutet für Ingenieure und alle Interessierten, sich neben der Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren auch mit der Entwicklung einer praxistauglichen Elektromobilität zu beschäftigen. Dieses Buch will dazu beitragen, das notwendige technische Basiswissen im Bereich der Elektrotraktion zu vermitteln. Von Mai 2012 bis Dezember 2013 wurde in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ in der neuen Reihe MTZ Wissen ein Teil dieser Beiträge veröffentlicht. Jetzt soll mit einigen Ergänzungen ein Kompendium zum technischen Verständnis der Elektromobilität beitragen. Den Autoren und Co-Autoren sei herzlich für Ihr Engagement gedankt und dem Verlag, insbesondere Herrn Richard Backhaus, der die Reihe mit konstruktiven Hinweisen begleitet hat, für die Möglichkeit der Veröffentlichung.

Autorenverzeichnis

Blandow, Volker, Dipl.-Ing. (FH) 8.4	TÜV SÜD AG, München
Drillkens, Julia, Dipl.-Ing. 3.3	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
Ecker, Madeleine, Dipl.-Phys. 3.2	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
Eghtessad, Marjam, Dr.-Ing. 7	Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig
Ehmer, Sebastian, M.Sc. 10	APL GmbH, Landau
Gerber, Nina-Kirstin, Dipl.-Vw. 8.1	IAV GmbH, Berlin
Hadler, Jens, Hon.-Prof. Dr.-Ing. 10	APL GmbH, Landau
Kasper, Roland, Univ. Prof. Dr.-Ing. 2.3, 2.4	Institut für Mobile Systeme, Universität Magdeburg
Kowal, Julia, Dr.-Ing. 3.1, 3.3	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
Küçükay, Ferit, Univ. Prof. Dr.-Ing. 7	Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig
Kümmell, Steffen, Dipl.-Ing. 8.1	IAV GmbH, Berlin
Lensch-Franzen, Christian, Dipl.-Ing. 10	APL GmbH, Landau
Leidhold, Roberto, Univ. Prof. Dr.-Ing. 2.2	Institut für Elektrische Energiesysteme, Universität Magdeburg
Lindemann, Andreas, Univ. Prof. Dr.-Ing. 2.1, 4.1	Institut für Elektrische Energiesysteme, Universität Magdeburg

Magdowski, Mathias, Dr.-Ing. 6	Institut für Medizintechnik, Universität Magdeburg
Maus, Wolfgang, Dipl.-Ing. 10	EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH
Noreikat, Karl E., Hon.-Prof. Dipl.-Ing. 5	NorCon Consulting, Esslingen
Raum, Markus, M.Sc. 8.1	IAV GmbH, Berlin
Sauer, Dirk Uwe, Univ. Prof. Dr. rer. nat. 3, 4.2	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
Schäper, Christoph, Dipl.-Ing. 4.2	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
Schünemann, Martin, Dipl.-Ing. 2.3, 2.4	Institut für Mobile Systeme, Universität Magdeburg
Schudeleit, Mark, M.Sc. 7	Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig
Thom, Rudolf W., Dipl.-Ing. (FH) 8.2	Consultant, Stuttgart
Tschöke, Helmut, Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. 1, 8.3, 9	Institut für Mobile Systeme, Universität Magdeburg
Vick, Ralf, Univ. Prof. Dr.-Ing. 6	Institut für Medizintechnik, Universität Magdeburg
Wawzyniak, Markus, Dr.-Ing. 4.3	Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
Wiebelt, Achim, Dr.-Ing. 4.3	Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
Witzel, Florian, Dipl.-Ing. (FH) 8.3	IAV GmbH, Gifhorn

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrifizierte Antriebssysteme mit Verbrennungsmotoren	1
1.1	Hybridantriebe	2
1.1.1	Definition	2
1.1.2	Hybridantriebe	2
1.1.3	Zusammenfassung	8
1.2	Range Extender	9
1.2.1	Definition	9
1.2.2	Anforderungen	11
1.2.3	Lösungsmöglichkeiten	12
1.2.4	Zusammenfassung	16
2	Elektrische Antriebsmaschinen	19
2.1	Elektrotechnische Grundlagen	20
2.1.1	Definitionen, Grundfunktionen	20
2.1.2	Elektrische Antriebe	20
2.1.3	Hochspannungsbordnetz	23
2.1.4	Stromversorgungen, Ladegeräte	24
2.1.5	Zusammenfassung	25
2.2	Elektrische Maschinen	25
2.2.1	Grundlagen der elektrischen Energiewandlung	25
2.2.2	Elektrische Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge	27
2.2.3	Steuerung und Regelung	31
2.2.4	Zusammenfassung	34
2.3	Elektrische Fährantriebe	35
2.3.1	Einleitung	35
2.3.2	Antriebsstrang-Topologien	35
2.3.3	Effizienzanalyse	38
2.3.4	Radindividuelle Direktantriebe	41
2.3.5	Zusammenfassung	41
2.4	Potentiale elektrischer Einzelradantriebe	42
2.4.1	Einleitung	42
2.4.2	Elektrischer Einzelradantrieb	43
2.4.3	Neue Methoden der Fahrdynamikregelungen	44
2.4.4	Zusammenfassung	48

3	Speicherung der elektrischen Energie	51
3.1	Grundlagen und Überblick über die Batterietechnik	52
3.1.1	Prinzipieller Aufbau von elektrochemischen Speichern	52
3.1.2	Batterieklemmenspannung	53
3.1.3	Verschiedene Batterietechnologien und typische Einsatzbereiche im Automobil	56
3.1.4	Zusammenfassung	60
3.2	Lithium-Ionen-Batterien	60
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise	60
3.2.2	Alterung	65
3.2.3	Zusammenfassung	67
3.3	Superkondensatoren	68
3.3.1	Aufbau und Funktionsweise	68
3.3.2	Elektrisches Verhalten	70
3.3.3	Alterung	72
3.3.4	Aufbau von Modulen	74
3.3.5	Zukünftige Entwicklungen	75
3.3.6	Zusammenfassung	75
4	Energiemanagement und Regelung	77
4.1	Leistungselektronik	78
4.1.1	Definitionen, Grundfunktionen	78
4.1.2	Leistungselektronische Schaltungen im Fahrzeug	80
4.1.3	Leistungselektronische Bauelemente	83
4.1.4	Zusammenfassung	85
4.2	Batteriesystemtechnik	85
4.2.1	Aufbau von Batteriesystemen	85
4.2.2	Auslegung von Batteriesystemen	86
4.2.3	Flexibilität, Zuverlässigkeit, Standardisierung, Servicefreundlichkeit und Lebensdauer	88
4.2.4	Batteriemanagementsystem und Sicherheit	90
4.2.5	Zusammenfassung	92
4.3	Thermomanagement	93
4.3.1	Wärmeströme im Elektrofahrzeug	93
4.3.2	Elektrifizierungsgrad und Klimatisierung des Innenraums	95
4.3.3	Effizienzsteigerung der Klimatisierung	97
4.3.4	Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien	99
4.3.5	Zusammenfassung	102
5	Brennstoffzelle	105
5.1	Grundlagen der Brennstoffzellentechnik	106
5.1.1	Geschichte und Motivation	106
5.1.2	Definition, Funktion und Einordnung	107
5.1.3	Brennstoffzellentypen	109
5.1.4	Zusammenfassung	113
5.2	Gesamtsystem im Fahrzeug	114
5.2.1	Antriebsstrang mit Brennstoffzelle	114
5.2.2	Wasserstoffinfrastruktur	118

5.2.3	Gesamtwirkungsgrad	120
5.2.4	Zusammenfassung	121
6	Elektromagnetische Verträglichkeit	123
6.1	Einleitung und Definition	124
6.2	Störquellen und Störsenken im Elektro- und Hybridfahrzeug	125
6.3	Koppelmechanismen	126
6.4	Gegenmaßnahmen	128
6.5	Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit	130
6.6	Zusammenfassung	131
7	Getriebe für elektrifizierte Antriebe	133
7.1	Aufgaben des Getriebes	134
7.1.1	Gewährleistung der Fahrleistungsanforderungen	134
7.1.2	Verbesserung des Antriebsstrang-Wirkungsgrads	134
7.2	Wirkungsgradverbesserung durch Elektrifizierung des Antriebs	136
7.3	Einfluss der Elektrifizierung auf das Getriebe	136
7.3.1	Start/Stop-Automatik	137
7.3.2	Rekuperation	138
7.3.3	Betriebspunktverlagerung (BPV)	138
7.3.4	Elektrisches (An-)Fahren	138
7.3.5	Boosten	139
7.4	Anwendungsbeispiele	139
7.4.1	Wandlerautomatikgetriebe (AT) und CVT im HEV (Parallelhybrid)	139
7.4.2	Doppelkupplungsgetriebe (DCT) im HEV (Parallelhybrid)	140
7.4.3	Schaltgetriebe (MT) und Automatisiertes Schaltgetriebe (AMT) im HEV (Parallelhybrid)	141
7.4.4	eCVT in HEV (leistungsverzweigter Hybrid)	141
7.4.5	Getriebe für rein elektrische Antriebe (serieller Hybrid und BEV)	142
7.5	Zusammenfassung	143
8	Anwendung	145
8.1	Ladetechnik	146
8.1.1	Ladeverfahren und deren technische Umsetzung	146
8.1.2	Kontaktgebundenes Laden	147
8.1.3	Kontaktloses induktives Laden	150
8.1.4	Stationäre Ladeszenarios	152
8.1.5	Ausblick	152
8.1.6	Zusammenfassung	153
8.2	Typgenehmigung	153
8.2.1	Prüfung von Pkw mit konventionellem Antrieb	154
8.2.2	Prüfung von Pkw mit elektrischen Antriebskomponenten	157
8.2.3	Zusammenfassung	162
8.3	Akustik	162
8.3.1	Einleitung und Definition	163
8.3.2	Gesetzgebung	165
8.3.3	Akustik von Elektro- und Hybridfahrzeugen	167
8.3.4	Zusammenfassung	171

8.4	Elektrische Sicherheit	171
8.4.1	Arbeitsschutz	171
8.4.2	Funktionale Sicherheit	173
8.4.3	Fahrzeugzulassung	174
8.4.4	Zusammenfassung	176
9	Auswirkungen auf den Verbrennungsmotor	181
9.1	Grundsätzliche Anforderungen an den Verbrennungsmotor im Hybridantrieb	182
9.2	Motorspezifische Maßnahmen	183
9.2.1	Ottomotoren	183
9.2.2	Dieselmotoren	185
9.3	Zusammenfassung	185
10	Emissionspotentiale entlang der Well-to-Wheel-Kette	189
10.1	Grundlagen	190
10.2	Elektrische Energiekette	192
10.3	Energiekette der Biokraftstoffe	194
10.4	Emissionsbilanzen	196
10.5	Lösungsansätze für die CO ₂ -Herausforderung	198
10.6	Zusammenfassung und Ausblick	200
	Sachwortverzeichnis	203