

Kai Borgeest

Elektronik in der Fahrzeugtechnik

Kai Borgeest

Elektronik in der Fahrzeugtechnik

Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 191 Abbildungen und 28 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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.

Das in diesem Werk enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Der Autor übernimmt infolgedessen keine Verantwortung und wird keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

1. Auflage 2008
- 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010

Lektorat: Reinhard Dapper | Walburga Himmel

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Technische Redaktion: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0548-5

Vorwort

Im Sommersemester 2005 hielt ich an der Hochschule Aschaffenburg erstmalig die Vorlesung „Kfz-Elektronik“ für Studenten der Mechatronik und der Elektrotechnik, beide im achten Semester. Das Ziel sollte sein, die Teilnehmer, die bereits Kenntnisse in Elektronik und Informatik mitbringen, zu befähigen, erfolgreich die vielen interessanten Aufgaben bei einem Automobilzulieferer oder einem Autohersteller zu meistern. Aber welche Kenntnisse sind das?

Man könnte nun jedes einzelne elektronische System im Fahrzeug detailliert vorstellen. Das mag sogar ganz interessant erscheinen (deswegen werden wir das auch im Buch tun, aber kurz und bündig), es hilft dem Ingenieur aber nicht unbedingt weiter, zuverlässige Produkte unter den Anforderungen der Automobilbranche zu entwickeln. Oft arbeitet er lange Zeit nur an einem Teilsystem im Fahrzeug, muss dieses Teilsystem aber in all seinen Facetten (Hardware, Software, Gesamtsystem) kennen. Er muss wissen, wie ein Elektronikmodul aufzubauen ist, das mal mit der Temperatur des heißen Motorraums arbeiten muss und mal mit klirrendem Frost. Neben den Temperaturen gibt es noch weitere Anforderungen, die aus anderen Anwendungsfeldern der Elektronik nicht so bekannt sind. Eine ganz besonders wichtige Anforderung ist der Preis. Noch größer sind die Unterschiede bei der Software. Wer sich mit PC gut auskennt, wird schnell bemerken, dass Steuergeräte im Auto im Vergleich zum PC recht eigenartige Rechner sind. Ein Entwicklungsingenieur im Automobilbereich sollte auch einige grundlegende Kenntnisse zum Thema Zuverlässigkeit mitbringen.

Wenn es bei der Entwicklung von Kfz-Elektronik zu Problemen kommt, sind dies aber meist gar keine technischen Probleme. Entwickelt wird nicht alleine in der Dachkammer, sondern in einem Team, dabei arbeiten Zulieferer und Fahrzeughersteller sehr eng zusammen. Ein Entwicklungsingenieur bei einem Zulieferer kann durchaus täglichen Kundenkontakt haben, ein Entwicklungsingenieur bei einem Fahrzeughersteller hingegen hat keinen Kontakt zu seinen Kunden, den späteren Käufern. Neben der reinen Technik spielen Entwicklungsabläufe eine große Rolle. Und ein enormer Zeitdruck. Der Ingenieur muss auch verstehen, „wie“ richtig entwickelt wird.

Damit ist das Programm einer Vorlesung mit 4 Semesterwochenstunden dann auch mehr als gefüllt. Nun fehlt nur noch ein passendes Buch zur Vorlesung. Es gibt einige gute Bücher zu Teilaspekten, es gab aber keines, das unmittelbar zur Vorlesung passte. So entstand dieses Buch. Es ist etwas dicker geworden, an einigen Stellen geht es über die Vorlesung hinaus, es dürfte nun aber alles drin stehen, was man benötigt, um Kfz-Elektronik zu entwickeln.

Kein Buch entsteht allein dadurch, dass man es einfach schreibt. So möchte ich vor allem Herrn Dapper vom Vieweg Verlag für die gute Zusammenarbeit danken.

Wenn im Buch die Bedeutung des Testens für die technischen Systeme im Fahrzeug betont wird, gilt das auch für das Buch selbst. „Testen“ bedeutet hier vor allem, das Buch noch einmal gründlich nach Fehlern und Verbesserungsmöglichkeiten zu durchsuchen. Daher möchte ich auch allen danken, die kleinere oder auch größere Teile noch einmal aus einem anderen Blickwinkel gelesen haben, nämlich den Herren Prof. Dr.-Ing. Jörg Abke, Dipl.-Ing. Björn Arnold, Dipl.-Ing. Marian-Peter Bawol, Dipl.-Ing. Harald Wojtkowiak und Frau Dr.-Ing. Mingli Bai.

Danken möchte ich auch Herrn Schreier (Akkumulatorenfabrik Moll), Frau Dangel und Herrn Dietsche (Robert Bosch GmbH), Herrn Schäfer (Sharp Electronics GmbH) und Herrn Thureau (VTI Technologies Oy) für die Unterstützung beim Bildmaterial.

Aschaffenburg, im November 2007

Kai Borgeest

Vorwort zur 2. Auflage

Seit der 1. Auflage gab es zahlreiche Veränderungen, die in die 2. Auflage eingearbeitet wurden, die erfreulichste: In der Einleitung der 1. Auflage war noch von den ca. 5000 Toten im deutschen Straßenverkehr die Rede, im Jahr 2008 waren es nur noch 4467, nach ersten Schätzungen im Jahr 2009 noch weniger. Zusätzlich gab es seit der 1. Auflage kleinere und größere Weiterentwicklungen sowie neue gesetzliche Vorgaben und Normen.

Die Anregung von Lesern, die Themen Elektro-/Hybridfahrzeuge sowie EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) auszubauen, habe ich gerne aufgegriffen, zumal ich auf letzterem Gebiet tätig war, bevor ich in die Autoindustrie ging.

Aufgrund der Aktualität wurde auch das Thema Abgasnachbehandlung aus Sicht der Elektronik ausgebaut.

Neben diesen Kernpunkten gibt es viele kleinere Erweiterungen. Als alles geschrieben war, betrug der Umfang zeitweilig über 420 Seiten, damit begann die Phase der Layout-Tricks, um möglichst viele neue Inhalte unterzubringen, ohne den Umfang zu sehr zu erweitern.

Zunächst möchte ich Frau Fromm (Fromm MediaDesign) für ihre Unterstützung danken, nach der Ablieferung der 1. Auflage und der 2. Auflage eine Druckvorlage zu bereiten. Für die 2. Auflage danke ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Teigelkötter, der als Experte für elektrische Maschinen das neue Kapitel durchsah und sein Elektrofahrzeug fotogen bereitstellte. Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Bochtler möchte ich für die Fototour in sein EMV-Labor danken, auch wenn aus Platzgründen nicht alle Fotos untergebracht werden konnten.

Aschaffenburg, im Januar 2010

Kai Borgeest

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einleitung	1
2 Bordelektrik	3
2.1 Bordnetz	3
2.1.1 Leitungen und Kabelbäume	4
2.1.2 Verdrahtungspläne	6
2.1.3 Steckverbinder	7
2.1.4 Sicherungen	8
2.2 Energiespeicher	9
2.2.1 Bleiakkumulatoren	11
2.2.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	12
2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren	12
2.2.4 Li-Ionen-Akkumulatoren	12
2.2.5 Natrium-Schwefel-Akkumulatoren	13
2.2.6 Kondensatoren als Energiespeicher	13
2.2.7 Brennstoffzellen	15
2.2.8 Weitere Energiespeicher	17
2.3 Mehrspannungs-Bordnetz	17
2.4 Energiemanagement	19
3 Hybridantriebe und elektrische Antriebe	21
3.1 Elektrische Maschinen	21
3.1.1 Gleichstrommaschinen	23
3.1.2 Synchronmaschinen	24
3.1.3 Asynchronmaschinen	25
3.1.4 Umrichter	26
3.2 Lichtmaschine	27
3.3 Starter	30
3.4 Starter-Generatoren	31
3.5 Hybridfahrzeuge	32
3.6 Elektrofahrzeuge	35
3.6.1 Brennstoffzellen-Fahrzeuge	37
3.6.2 Fahrzeuge mit Aufladung am öffentlichen Netz	37
3.6.3 Solarfahrzeuge	38
4 Beispiel Elektronische Dieselsteuerung (EDC)	39
4.1 Aufgaben	40
4.2 Einspritzung	40
4.2.1 Winkeluhr	41

4.2.2	Berechnung der Einspritzmenge	44
4.2.3	Berechnung des Spritzbeginns	45
4.2.4	Ansteuerung des Einspritzsystems	46
4.2.5	Ansteuerung der Injektoren	47
4.2.6	Regelung des Raildrucks	53
4.3	Drehzahlregelung	54
4.4	Regelung des Luftsystems	55
4.4.1	Abgasrückführung	56
4.4.2	Aufladung	61
4.5	Abgasnachbehandlung	63
4.5.1	Partikelfilter	64
4.5.2	Stickoxid-Filter	66
4.5.3	Lambda-Sonde	68
4.5.4	NO _x -Sonde	70
4.5.5	Ruß-Sensoren	70
4.6	Thermomanagement	70
5	Bussysteme	73
5.1	Zuordnung von Funktionen zu Geräten	73
5.2	Kfz-Elektronik als LAN	75
5.3	CAN-Bus	78
5.3.1	Physikalische Schicht des CAN	80
5.3.2	Sicherungsschicht des CAN	90
5.3.3	Beispiele für aufgesetzte Protokollschichten	98
5.4	Weitere Bussysteme	99
5.4.1	LIN	99
5.4.2	Zeitgesteuerte Bussysteme (Byteflight, TTCAN, TTP, FlexRay)	101
5.4.3	Busse für Rückhaltesysteme	105
5.4.4	Busse für Multimedia-Anwendungen	106
5.4.5	Drahtlose Netze	108
5.5	Praktisches Vorgehen	108
6	Hardware	111
6.1	Steuergeräteschaltungen	111
6.1.1	Rechnerkern	113
6.1.2	Sensorik	122
6.1.3	Auswertung von Sensorsignalen	125
6.1.4	Ansteuerung der Aktoren	132
6.1.5	Spannungswandler	142
6.2	Elektromagnetische Verträglichkeit	145
6.2.1	Störquellen und Störsenken	145
6.2.2	Kopplungsmechanismen	146
6.2.3	EMV-Normen und Gesetzgebung	151
6.2.4	Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV	158
6.2.5	Simulation in der EMV	162
6.2.6	EMV-Mess- und Prüftechnik	163
6.3	Mechanische Anforderungen	166
6.4	Thermische Anforderungen	167

6.5 Chemische Anforderungen und Dichtigkeit	172
6.6 Anforderungen an den Umweltschutz	174
6.7 Akustische Anforderungen	175
6.8 Aufbau- und Verbindungstechnik	175
7 Software	177
7.1 Architektur der Steuergeräte-Software	177
7.2 Echtzeit-Betriebssysteme	180
7.2.1 Aufgaben eines Echtzeit-Betriebssystems	180
7.2.2 OSEK/VDX	183
7.2.3 AUTOSAR	187
7.3 Steuer- und regelungstechnische Funktionen der Software	188
7.3.1 Steuerungen	188
7.3.2 PI- und PID-Regler	190
7.3.3 Modellbasierte Regler	194
7.4 Diagnosefunktionen der Software	200
7.4.1 Erkennung und Behandlung von Fehlern	202
7.4.2 Entprellung und Heilung von Fehlern	203
7.4.3 Fehlerspeicher-Management	204
7.4.4 Kommunikation zwischen Steuergerät und Tester	204
7.4.5 On-Board-Diagnose (OBD)	210
7.4.6 Programmierung über die Diagnose-Schnittstelle	213
7.4.7 ODX	214
7.5 Entwicklung der Anwendungs-Software	215
7.5.1 Programmierung	215
7.5.2 Bypass	218
7.5.3 Datensatz und Applikation	218
7.5.4 Softwaretests	224
7.5.5 Flash-Programmierung	231
8 Projekte, Prozesse und Produkte	235
8.1 Besonderheiten der Kfz-Branche	235
8.2 Stufen der Elektronik-Entwicklung	237
8.3 Projekte und Prozesse	239
8.4 Projekte in der Praxis	241
8.5 Projektphasen	242
8.5.1 Akquisitionsphase	242
8.5.2 Planungsphase	245
8.5.3 Entwicklungsphase	261
8.6 Product Lifecycle Management	265
8.7 Architekturbasierte Entwicklung	266
8.8 Serienbetreuung	267
8.8.1 Serienbetreuung durch die Entwicklung	267
8.8.2 Produktion	267
8.8.3 Service	269
8.9 Qualität	270
8.9.1 Qualitätsmanagement	272
8.9.2 Qualitätsstandards	277

9 Sicherheit und Zuverlässigkeit	281
9.1 Ausfälle elektronischer Systeme	282
9.1.1 Alterung und Ausfall elektronischer Bauelemente	284
9.2 Ausfälle von Software	289
9.3 Methoden zur Analyse von Sicherheit und Zuverlässigkeit	290
9.3.1 FMEA	290
9.3.2 Fehlerbaumanalyse	292
9.3.3 Ereignisfolgenanalyse	294
9.4 Verbesserungsmaßnahmen	295
9.4.1 Qualifizierung von Bauelementen	295
9.4.2 Überwachung und Diagnose	296
9.4.3 Komplexität und Redundanz	296
10 Anwendungen	299
10.1 Funktionsentwicklung am Beispiel Klimaregelung	299
10.1.1 Prinzip der Klimaregelung	299
10.1.2 Struktur der Klimaregelung (Beispiel)	300
10.1.3 Funktionsentwicklung im Klimasteuergerät (Beispiel)	301
10.2 Systeme im Antriebsstrang	303
10.2.1 Motorsteuergeräte (Otto)	303
10.2.2 Steuergeräte für variable Nockenwellen	306
10.2.3 Getriebesteuergeräte	309
10.2.4 Kupplungssteuergeräte	310
10.2.5 Elektronische Differenzialsperre	310
10.3 Systeme für die Fahrdynamik und die aktive Sicherheit	311
10.3.1 Längsdynamik und Bremsen	312
10.3.2 Querdynamik, Lenkung und ESP	316
10.3.3 Vertikaldynamik	319
10.3.4 Reifenüberwachung	321
10.4 Systeme für die passive Sicherheit	322
10.4.1 Airbag	322
10.4.2 Gurtstraffer	324
10.4.3 Fußgängerschutz	324
10.5 Fahrerassistenz- und Informationssysteme	324
10.5.1 Spurhalte- und Spurwechselassistenten	324
10.5.2 Einparkhilfen	325
10.5.3 Navigationssysteme	325
10.5.4 Telematik	329
10.5.5 Scheibenreinigungssysteme	331
10.5.6 Beleuchtung	331
10.5.7 Nachtsichtsysteme	333
10.6 Mensch-Maschine-Schnittstelle	334
10.7 Komfortsysteme	337
10.8 Unterhaltungselektronik	338
10.9 Diebstahlschutz	339

11 Selbstbau und Tuning	341
12 Zukunftstechnologien im Fahrzeug	343
12.1 Adaptronik	343
12.1.1 Beispiel Motorlagerung	344
12.1.2 Beispiel Strukturversteifung mit Memory-Metallen	346
12.2 Nanotechnologie	346
12.3 Photonik	346
12.4 Weitere Zukunftsentwicklungen	347
A Abkürzungen	348
B Symbole in Formeln und Naturkonstanten	355
C Literaturverzeichnis	358
Sachwortverzeichnis	375

1 Einleitung

Der Ruf des Autos war vor 20 Jahren geprägt durch die hohe Umweltbelastung, durch zahlreiche Verkehrstote und durch wenig komfortables Reisen auf langen Strecken. Zwar belastet der Straßenverkehr auch heute noch die Umwelt, sind auch heute 4467 Verkehrstote jährlich 4467 zu viel¹ und eine weite Reise ist, wenn man nicht die inzwischen gut ausgebauten Hochgeschwindigkeitsnetze der Bahn oder das inzwischen erschwingliche Flugzeug nutzt, immer noch beschwerlich. Trotzdem hat es in diesen 20 Jahren gewaltige Verbesserungen beim Umweltschutz, bei der Sicherheit und beim Komfort gegeben. Während die Verbesserung der passiven Sicherheit maßgeblich auf konstruktive Verbesserungen der Karosserie und des Interieurs zurückzuführen ist, gehen beim Umweltschutz (Motormanagement, Abgasnachbehandlung), bei der aktiven Sicherheit (ABS, ESP) und beim Komfort diese Verbesserungen überwiegend auf das Konto der Elektronik. Und selbst bei den Fortschritten in der passiven Sicherheit durch den Airbag war die Elektronik nicht ganz unbeteiligt.

Diese Entwicklungen sind keinesfalls abgeschlossen, sondern stellen auch zukünftig Ingenieure vor reizvolle Aufgaben. Bei PKW ist mit neuen Antriebskonzepten wie Hybridantriebe zu rechnen, die von japanischen Herstellern bereits in Serie gebracht wurden. Viele Fortschritte, die bei PKW bereits gemacht wurden, werden bei Nutzfahrzeugen und Zweirädern folgen. Während bei der passiven Sicherheit bereits ein hoher Stand erreicht ist, bieten die aktive Sicherheit und vor allem die Kombination aktiver und passiver Sicherheit neue Möglichkeiten. Da immer mehr ältere Menschen Auto fahren, werden Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer informieren, warnen und ggf. auch eingreifen, an Bedeutung gewinnen. Wenn Ingenieure neben ihrer Liebe zum technischen Detail auch permanent den Kundennutzen im Auge behalten, wird es sicher auch noch weitere sinnvolle Verbesserungen im Bereich Komfort und Unterhaltung geben.

Daneben gibt es weitere Fortschritte, so ermöglichen inzwischen auch die traditionell eher mit Traktoren assoziierten Dieselmotoren eine sportliche Fahrweise, 2006 siegte zum ersten Mal ein Dieselfahrzeug in Le Mans. Auch wenn dies dem gewöhnlichen Autofahrer nichts nützt, so erfährt auch dieser in immer mehr Fahrzeugen, dass ein Dieselmotor durchaus Spaß machen kann. Daneben entstehen neuartige Verbrennungsmotoren, die in vielerlei Hinsicht zwischen heutigen Diesel- und Ottomotoren angesiedelt sein werden, zurzeit aber noch den Status von Forschungsprojekten haben. Auch diese lassen sich nur mit Hilfe präziser elektronischer Regelungen realisieren.

Durch elektronische Diagnosesysteme kann eine aufwändige Fehlersuche theoretisch erheblich vereinfacht werden (in der Praxis trifft dies allerdings nicht immer zu).

Weitere Fortschritte, die sich erst anbahnen, liegen in der Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und in der Kommunikation zur Infrastruktur. Damit wachsen Fahrzeuge und die Strassen langfristig zu einem aufeinander abgestimmten System zusammen. Insbesondere im Nutzfahrzeugbereich wird das einzelne Fahrzeug ein integraler Bestandteil von logistischen Konzepten.

Ein nützlicher Nebeneffekt der Weiterentwicklungen ist die Sicherung von Arbeitsplätzen, vor allem, wenn die deutsche Automobilindustrie auch bei zukünftigen Entwicklungen die Nase vorne behält und nicht Entwicklungen verschläft.

1 1998 laut statistischem Bundesamt [Destat09]

Bei aller Freude über die Verbesserungen dürfen jedoch auch die Kehrseiten nicht gelehnet werden.

Ein wesentlicher Nachteil ist die hohe Komplexität. Wo Zuverlässigkeit gefordert ist, gilt nach wie vor der klassische Grundsatz, ein System so einfach wie möglich zu halten. Genau dies geschieht durch den massiven Elektroneinsatz im Fahrzeug nicht mehr. Wer einmal in einer kalten Winternacht aufgrund eines Softwarefehlers mit seinem Fahrzeug liegen blieb, wird die bisherige Marke vermutlich meiden und seine Erfahrungen auch Freunden und Verwandten mitteilen. Wenn ein elektronisches Lenksystem aufgrund eines Softwarebugs beschließt, den nächsten Baum anzusteuern, wäre dies noch weitaus schlimmer. Leider zeigt sich, dass insbesondere in der Oberklasse zunehmend negative Erfahrungen mit der Zuverlässigkeit gemacht wurden. Um auch komplexe Systeme mit hinreichender Zuverlässigkeit zu realisieren, genügt es nicht, nur das fertige Produkt zu betrachten. Vielmehr müssen die Prozesse und Abläufe zur Entwicklung eines Gerätes oder Systems selbst erst entwickelt werden. Der Ingenieur muss also nicht nur im Auge haben, was bei der Arbeit eines Entwicklungsteams am Ende herauskommen soll, sondern auch, auf welchem Wege er dieses Ziel unter schwierigen Randbedingungen (Zeitdruck, Kostendruck) sicher erreicht, ohne Abstriche bei der Qualität hinzunehmen.

Ebenfalls wenig Begeisterung löst der steigende Elektronikumfang bei Autofahrern aus, die bisher zahlreiche Wartungsarbeiten und Reparaturen selbst durchgeführt haben. Diese machen die Erfahrung, dass die elektronische Diagnose zwar hilfreich sein kann, dass eventuell aber viele Arbeiten auch gar nicht mehr selbst, sondern nur noch durch eine Werkstatt durchgeführt werden können. Dies ist leider manchmal sogar beabsichtigt, da der Service eine wichtige Einnahmequelle darstellt. Die Elektronik bietet insofern einen Vorteil für den Hersteller und evtl. einen Nachteil für den Kunden, als der Hersteller inzwischen relativ frei gestalten kann, welche Tätigkeiten er noch dem Halter zugesteht und für welche Tätigkeiten ein zeitaufwändiger, aber lukrativer Werkstattbesuch nötig ist.

2 Bordelektrik

Lange bevor elektronische Steuergeräte Einzug in das Fahrzeug hielten, gab es einfache elektrische und elektromechanische Systeme wie die Beleuchtung oder die Zündung. Diese Systeme benötigten Energie, was geeignete Energiequellen und die Weiterleitung der Energie über Kabel erforderte. Der Begriff *Bordelektrik* wird als Sammelbegriff für klassische elektrische Anlagen und moderne elektronisch gesteuerten Systeme verstanden. Da die elektronischen Systeme später vertieft werden, sollen in diesem Kapitel zunächst nur das Bordnetz, Energiequellen und das Energiemanagement betrachtet werden. Hybridantriebe oder reine Elektroantriebe können als Weiterentwicklung des Energiemanagements und der elektrischen Maschinen im Fahrzeug verstanden werden, setzen dieses Kapitel also logisch fort. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung ist diesen Antrieben nun ein eigenes Kapitel in dieser Auflage gewidmet. Da Zündanlagen heute elektronisch arbeiten, sind diese im Kapitel 10 untergebracht.

2.1 Bordnetz

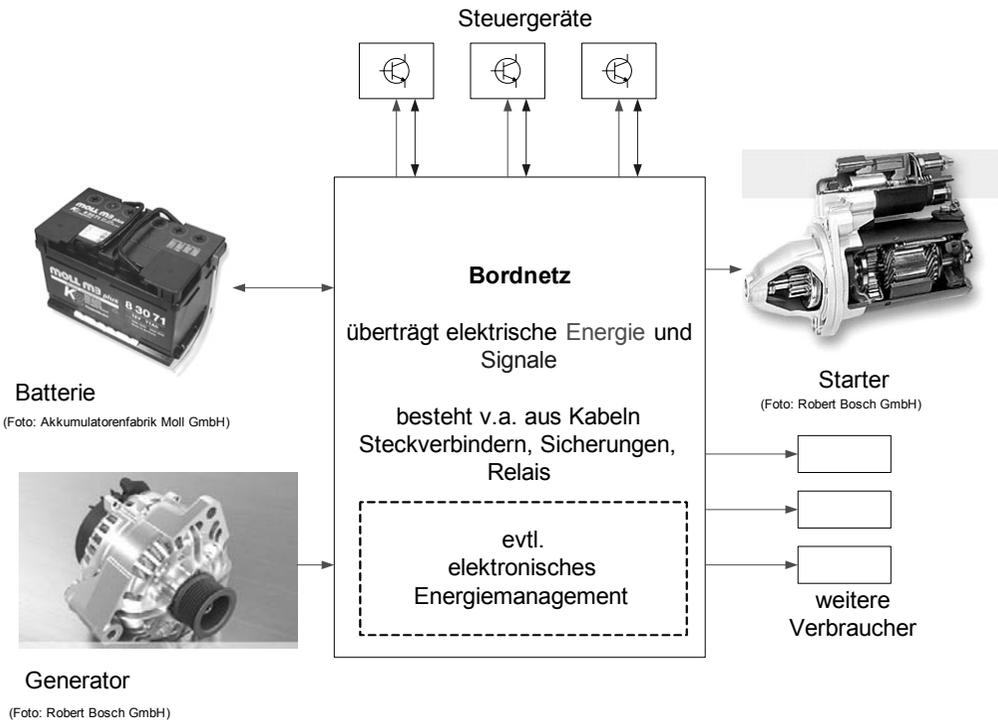


Bild 2-1 Überblick über das Bordnetz

Unter dem Begriff Bordnetz sei hier das System von Leitungen verstanden, das zum einen Energie von den Energiequellen im Fahrzeug (Batterie/Generator) zu den Verbrauchern überträgt, zum anderen aber auch Signale und Informationen elektrisch und in Einzelfällen auch optisch überträgt.

Während sich an den Energieflüssen in den letzten Jahrzehnten bis auf die Zunahme zahlreicher Kleinverbraucher nicht viel geändert hat, ist der Informationsaustausch zwischen den immer mehr werdenden elektronischen Steuergeräten geradezu explodiert. Dies führte dazu, dass Informationen heute über digitale Bussysteme wie den CAN-Bus übertragen werden, die in Kapitel 5 näher vorgestellt werden. Eine weitere Stufe zur Beherrschung der zunehmenden Verkabelung wäre die drahtlose Signalübertragung. In der Praxis scheitert diese aber an den zahlreichen abschirmenden Metallstrukturen im Fahrzeug und an den zu erwartenden Problemen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Die teils hitzig geführte öffentliche Diskussion über eventuelle Gesundheitsrisiken elektromagnetischer Wellen in bestimmten Frequenzbereichen, häufig unter dem unscharfen Schlagwort „Elektrosmog“ zusammengefasst, könnte der Akzeptanz eines Modells mit drahtlosen Techniken schaden.

2.1.1 Leitungen und Kabelbäume

Die häufigste Ursache für Fahrzeugbrände sind Kabelbrände, deshalb müssen alle Leitungen so ausgelegt sein, dass sie sich auch bei den teilweise sehr hohen Strömen nicht unzulässig erwärmen. Kurzschlüsse müssen durch Sicherungen verhindert werden.

Um eine unzulässige Erhitzung von Kabeln im normalen Betrieb zu verhindern, darf die zulässige Stromdichte S nicht überschritten werden. Aus dem Strom I und dem Leitungsquerschnitt A definiert sie sich zu

$$S = \frac{I}{A} \quad (2.1)$$

Die zulässige Stromdichte hängt davon ab, ob es sich um einen Einzelleiter oder eine Litze handelt, vom Leitermaterial (praktisch nur Kupfer), außerdem von der Dicke und vom Material der Isolierung. Als grobe Richtwerte können zulässige Stromdichten von 5 A/mm^2 für den Dauerbetrieb und von 10 A/mm^2 für kurzzeitige Stromspitzen angenommen werden. Wird die zulässige Stromdichte überschritten, führt die Verlustleistung P_V in der Leitung zu einer Überhitzung und damit zum Schmelzen, zur Zersetzung oder zum Brennen des Isoliermaterials oder angrenzender Strukturen. Die Verlustleistung beim Strom I ergibt sich zu

$$P_V = I^2 R \quad (2.2)$$

mit

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.3)$$

Darin ist l die Länge der Leitung, ρ der spezifische Widerstand des Leiters (bei Kupfer $0,0185 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$). Der Strom I kann aus der Leistung des Verbrauchers P und der anliegenden Spannung U bestimmt werden mit der Formel

$$I = \frac{P}{U} \quad (2.4)$$

Tabelle 2.1 Beispiele elektrischer Verbraucher [Bosch07]

Verbraucher	Leistungsaufnahme P
Elektro-Kraftstoffpumpe	250 W
Heckscheibenheizung	200 W
Innengebläse	120 W
Kühlerventilator	120 W
Abblendlicht	110 W
Standlicht	8 W

Ein praktisches Vorgehen ist, nach Berechnung des Stromes den erforderlichen Querschnitt einer Tabelle für den entsprechenden Kabeltyp zu entnehmen. Diese enthalten eventuell auch gleich den zu wählenden Sicherungsnennwert. Solche Tabellen sind für die im Fahrzeug verwendeten Leitungstypen *FLY* und *FLRY* z. B. von den Kabelherstellern zu bekommen. Diese beiden Typen sind speziell für den Einsatz im Fahrzeug genormt [ISO6722].

Neben der Verlustleistung ist zu berücksichtigen, dass die ohmschen Widerstände der Leitungen keinen unzulässigen Spannungsabfall verursachen. Auch dieser kann nach dem ohmschen Gesetz berechnet oder aus Tabellen entnommen werden.

[DIN72552] legt die zu verwendenden Farben der Leitungen fest, z. B. Braun für Masse. Häufig sind Kennzeichnungen zweifarbig.

Leitungen werden nur über kurze Strecken einzeln verlegt, über längere Strecken werden sie in *Kabelbäumen* gebündelt. Der Name beruht auf der verzweigten Struktur mit einem Hauptstrang, in dem viele Leitungen über lange Strecken parallel verlaufen, davon abzweigende kürzere Nebenstränge und daraus wiederum abzweigende Leitungen zu einzelnen Sensoren, Aktoren, Steuergeräten oder anderen elektrischen Einrichtungen. Gebündelt werden Kabelbäume oft in flexiblen Kunststoffschläuchen oder grobmaschigen Textilschläuchen. Heutige Fahrzeuge haben in der Regel mindestens einen Fahrzeugkabelbaum und einen Motorkabelbaum, oft besteht die Verkabelung des Gesamtfahrzeugs aus noch mehr Kabelbäumen. Die aufaddierte Länge der einzelnen Leiter in einem Fahrzeug erreicht heute mehrere Kilometer.

Da die klassischen Kabelbäume immer schwieriger im Fahrzeug unterzubringen sind, ist in der Zukunft zu erwarten, dass die gewöhnlichen isolierten Rundleiter zukünftig durch flache Leiter mit rechteckigem Querschnitt, die auf einer flexiblen Kunststoffolie untergebracht sind, ersetzt werden. In einigen Bereichen, z. B. im Armaturenbrett, werden Flachleiter vereinzelt bereits heute eingesetzt, der Ersatz kompletter Fahrzeugkabelbäume ist in nächster Zukunft noch nicht zu erwarten. Eine höhere Bordnetzspannung käme diesem Ziel entgegen, dann könnten auch Leitungen zur Energieversorgung mit kleinerem Querschnitt ausgeführt werden.

2.1.2 Verdrahtungspläne

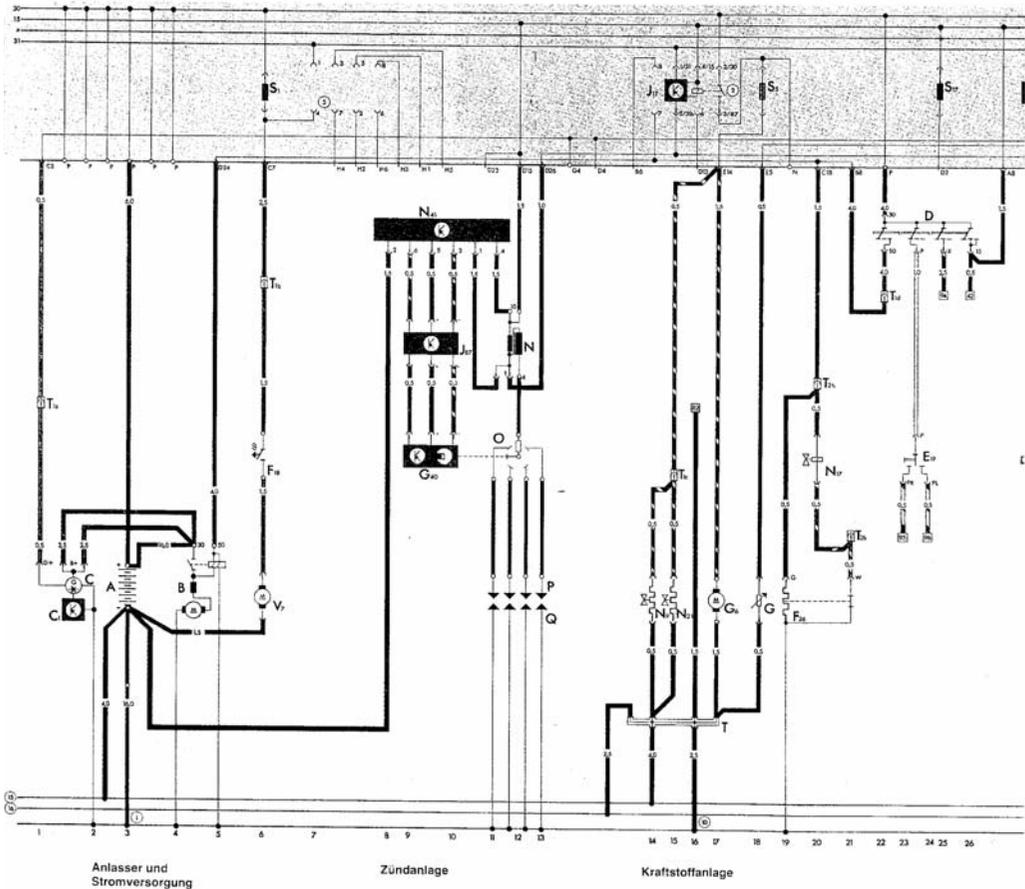


Bild 2-2 Ausschnitt aus einem Verdrahtungsplan mit Stromversorgung, Anlasser, Zündung (noch mit rotierendem Verteiler) und Kraftstoffanlage

Dargestellt werden Verdrahtungspläne in einer standardisierten Weise, die sich auf die Norm [DIN72552] stützt. Die Kennzeichnung von Betriebsmitteln (z. B. R für Widerstände, C für Kondensatoren) ist in [DIN61346] geregelt (vormals DIN 40719)¹. Im oberen Teil sind wichtige Anschlüsse eingezeichnet, auf die alle Systeme im Fahrzeug zugreifen, dies ist v. a. die Spannungsversorgung mit den Klemmen 15, 30 und 31 (Tabelle 2.2). Die graue Färbung soll hier andeuten, dass es sich um die Zentralelektrik handelt, in der neben diesen Leitungen noch einzelne weitere Betriebsmittel vorhanden sind. Bei älteren Fahrzeugen ist die Zentralelektrik der in der Nähe des Armaturenbrettes, im Kofferraum oder im Motorraum untergebrachte Sicherungskasten, bei modernen Fahrzeugen kann diese Zentralelektrik ein eigenes, intelligentes

¹ Einige neue Bezeichnungen sind gewöhnungsbedürftig, so wird z. B. eine Drosselspule seit 2000 R statt L genannt. Um den Leser nicht zu verwirren, bleibt es in diesem Buch bei L.

Steuergerät mit Funktionen wie dem Energiemanagement sein, das evtl. durch einen weiteren Sicherungskasten ergänzt wird. Am unteren Bereich ist die Masse eingezeichnet, die teilweise durch die Karosserie realisiert wird, teilweise auch durch Masseleitungen. Im Bild sind unten zwei Masseleitungen zu sehen, die untere dritte „Leitung“ ist in diesem Falle die Karosserie. Zwischen den beiden durchlaufenden Rändern befinden sich an den von links nach rechts durchnummerierten Positionen die elektrischen Systeme. Zusätzlich sind Leitungsquerschnitte angegeben. Zur Identifikation der Leitungen im Fahrzeug können auch Hinweise auf die Farben gegeben werden, sofern der Plan nicht bereits farblich vorliegt. Aufgrund der ausgeprägten Standardisierung sind auch Pläne unterschiedlicher Fahrzeuge mit etwas Übung schnell zu verstehen. Bei elektronischen Steuergeräten, bei denen nicht immer aus dem Schaltplan ersichtlich ist, welchem Zweck eine Leitung dient, wäre eine zusätzliche Information über die Aufgabe einer Leitung hilfreich, diese fehlt oft oder es findet sich lediglich eine herstellereigene Abkürzung.

[DIN72552] normt in Blatt 2 auch die Bezeichnung von Klemmen, die in nahezu jedem Fahrzeug vorkommen, ggf. mit ergänzenden Indizes. Die Tabelle 2.2 zeigt eine kleine Auswahl. Die Begriffe treten oft auch in zusammengesetzter Form auf, z. B. K15 für Klemme 15.

Tabelle 2.2 Klemmenbezeichnungen nach [DIN72552] (Auswahl)

Nr.	
1	Zündspule (gemeinsame Klemme)
4	Zündspule (Hochspannungsausgang)
15	positive Batteriespannung, über Schlüsselschalter
30	positive Batteriespannung
31	negative Batteriespannung
50	Anlasser (geschaltete Klemme)
54...58	Beleuchtung
B+	positive Generatorklemme zur Batterie
B-	negative Generatorklemme zur Batterie
D+	positive Klemme an Generator und Regler für Regelung und Leuchte
D-	negative Klemme an Generator und Regler für Regelung und Leuchte
DF	„Dynamo Feld“, Klemme an Generator und Regler für Erregerwicklung
U, V, W	Drehstromklemmen des Generators

2.1.3 Steckverbinder

Die Verbindung von Teilkabelbäumen untereinander sowie zwischen einem Kabelbaum und den elektrischen Einrichtungen im Fahrzeug erfolgt lösbar über Steckverbinder. Eine Ausnahme bilden wenige Verbindungen, die durch hohe Ströme belastet werden, z. B. an der Batterie, am Starter, z. T. auch an Generatoren, dort werden aufgeschraubte Kabelschuhe oder andere Schraubverbindungen bevorzugt.

Im Fahrzeug gelten besondere Anforderungen an Steckverbinder, die Vibrationen, widrigen Temperaturbedingungen und Feuchtigkeit ausgesetzt sind. Da Steckverbinder eine häufige

Ursache von Störungen in der Elektrik sind, kommt diesen vernachlässigten Bauteilen eine wesentliche Bedeutung für die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs zu.

Steckverbinder im Auto müssen hinreichend fest schließen, um sich nicht durch Vibrationen zu lösen. Wer schon einmal versucht hat, Steckverbinder im Fahrzeug zu lösen, weiß, dass dies mit Kraftaufwand und gelegentlich mit abgebrochenen Fingernägeln verbunden ist. Vielpolige Stecker an Steuergeräten besitzen deshalb integrierte Öffnungshilfen wie Hebel oder Zugkeile, die sich mit einem Schraubendreher aufhebeln lassen.

Der Schutz vor Feuchtigkeit wird durch Dichtungen und korrosionsfeste Kontakte sichergestellt. Ideal aber teuer sind Goldkontakte. Beide Kontaktpartner müssen aus dem gleichen Werkstoff bestehen, da andernfalls ein unbeabsichtigtes galvanisches Element entsteht. Außerhalb des Innenraumes muss mindestens Schutzklasse IP 67 erfüllt sein (Kapitel 6).

Wenn eine Verpolung zu Funktionsstörungen oder Schäden führen kann, sollte der Steckverbinder z. B. mit Hilfe kleiner Kerben o. ä. asymmetrisch aufgebaut sein, um einen falschen Anschluss im Werk oder im Service zu verhindern. Auch wenn ein Steuergerät mehrere sonst gleichartige Steckverbinder hat, sollte eine Verwechslung durch solch eine *Codierung* vermieden werden.

Üblich sind Bauskastensysteme aus Kunststoffformteilen, in die von hinten Kontakte aus unterschiedlichen Materialien, eventuell auch mit unterschiedlichen Stromtragfähigkeiten eingepresst werden können.

Bei größeren Steckverbindern können unterschiedliche Abgangsrichtungen des Kabels gewählt werden, was angesichts des oft beengten Bauraumes an typischen Orten zur Steuergerätemontage (Motorraum, hinter der Mittelkonsole, hinter dem Handschuhfach, unter den Sitzen oder neben dem Kofferraum) unverzichtbar ist. Der Steckverbinder und der Raum für den Kabelabgang sollten bereits frühzeitig in der Konstruktion eines Fahrzeugs berücksichtigt und in das CAD-System integriert werden, um zu vermeiden, dass sich erst beim Serienanlauf ein Montageort als ungeeignet herausstellt.



Bild 2-3

Beispiel eines Steckers an einem Steuergerät. Der Stecker passt auf den Anschluss links unten. Man erkennt links am Stecker eine aufgezogene Öffnungshilfe. Der Stecker enthält kleine Signalkontakte und einige große Hochstromkontakte.

2.1.4 Sicherungen

Viele Kreise werden noch durch Schmelzsicherungen abgesichert, die meist in einem zentralen Sicherungskasten im Motorraum oder unterhalb des Armaturenbretts untergebracht sind. Zunehmend werden auch – zentral oder in vorhandene Steuergeräte integriert – elektronische

Sicherungen verwendet. Ein Mikrocontroller kann bei Überstrom aufgrund einer digitalen Fehlermeldung eines intelligenten Endstufenbausteins oder sogar basierend auf einer frei programmierbaren Stromkurve über der Zeit entscheiden, ob ein Fehler vorliegt und einen Stromkreis abschalten und nach Behebung des Fehlers wieder einschalten. Daneben bieten elektronische Sicherungen Diagnosemöglichkeiten (sie lassen sich allerdings nicht mehr zum Betrachten oder zur manuellen Überprüfung herausziehen). Bei einer großen Anzahl abgesicherter Kreise in einem zentralen Gerät kann eine eigenständige Mikrocontroller-Lösung preislich mit einem konventionellen Sicherungskasten konkurrieren. In einigen Bereichen ist der Einsatz von Sicherungen nicht möglich, so z. B. bei den Leitungen zum Anlasser, die einen Strom von über 1 kA leiten müssen. Standardisiert sind Fahrzeugsicherungen in der [ISO8820]

2.2 Energiespeicher

Die zum Betrieb des Fahrzeugs erforderliche Energie wird bei laufendem Motor durch den Generator bereitgestellt. Ein hoher Energiebedarf entsteht vor allem beim Starten des Motors durch den Anlasser, bei Dieselmotoren evtl. auch für die Glühkerzen (s. Kapitel 4). Ausgerechnet in dieser energieaufwändigen Phase kann der Generator bei noch stehendem Motor noch keine Energie liefern. Gelöst wird dieses Problem durch die *Starterbatterie*, die im Betrieb durch den Generator aufgeladen wird, um dann beim Start die benötigte Energie bereit zu stellen. Da immer mehr Verbraucher auch im Stillstand des Fahrzeugs Strom verbrauchen, muss die Starterbatterie auch diese Energie liefern oder besser eine zweite Energiequelle (*APU*, *Auxiliary Power Unit*) für diese Verbraucher zur Verfügung gestellt werden. Mit den Fortschritten bei alternativen Antrieben gewinnt außer Starterbatterien eine weitere Anwendung von Batterien im Fahrzeug an Bedeutung, nämlich *Traktionsbatterien*, die den Fahrstrom für einen elektrischen Antrieb liefern.

Eine Batterie, die mehrfach aufgeladen und entladen werden kann, wird als *Akkumulator* (Sammler) oder auch als *Sekundärbatterie* bezeichnet. Alle Akkumulatoren werden *aufgeladen*, indem an ihren Polen eine Spannung angelegt wird, die dann chemische Veränderungen in den Zellen bewirkt. Man spricht auch von einer chemischen Energiespeicherung. Durch Anschließen eines Verbrauchers laufen diese chemischen Reaktionen rückwärts ab (*Entladung*) und die chemisch eingespeicherte Energie wird wieder in elektrische Energie umgewandelt.

Die Spannungen, die bei den elektrochemischen Reaktionen entstehen, erreichen nicht die Größenordnungen, die für Anwendungen im Fahrzeug sinnvoll sind. Deshalb besteht jede Batterie aus einer Reihenschaltung mehrerer elektrochemischer *Zellen*, um auf die benötigte Spannung zu kommen. Die Batteriespannung ist also das Produkt aus der *Zellenspannung* und der Anzahl der Zellen.

Die Anforderungen an eine Starterbatterie sind sehr vielfältig. Zunächst erwartet man von ihr, dass sie eine möglichst hohe Energiedichte besitzt, also möglichst viel elektrische Energie pro Volumeneinheit (und auch pro Gewichtseinheit) speichern können. Sie soll einen hohen *Wirkungsgrad* haben, also einen möglichst hohen Anteil der eingespeicherten Energie auch wieder abgeben können. Die *Selbstentladung* soll gering sein, damit das Fahrzeug auch nach längerer Standzeit sicher wieder gestartet werden kann. Die Batterie muss auch bei extremen Außentemperaturen funktionieren. Die Lebensdauer muss auch unter rauen Betriebsbedingungen mehrere Jahre betragen. Nach dem Betrieb muss die Batterie entsorgt werden, damit gewinnt auch die Umweltfreundlichkeit an Bedeutung.

Dem Leser sind eventuell verschiedenartige Akkumulatoren aus elektrischen Kleingeräten bekannt, z. B. Nickel-Cadmium (NiCd), Nickel-Metallhydrid (NiMH) oder Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ionen). Im Fahrzeug hingegen hat sich der *Bleiakkumulator* bewährt. In Fahrzeugen, bei denen der Antrieb teilweise elektrisch erfolgt (Hybridfahrzeuge) kommen Nickel-Metallhydrid- und Li-Ionen-Akkus zum Einsatz.

Um etwa 1980 herum wurde vor allem im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen intensiv an Natrium-Schwefel-Batterien (Na-S) geforscht. Die Nachteile erwiesen sich als so schwerwiegend, dass die Arbeiten an diesem Batterietyp trotz der hohen erreichbaren Energiedichte eingestellt wurden. In letzter Zeit ist mit der Natrium-Nickelchlorid-Batterie wieder ein denkbarer Nachfolger in die Diskussion gekommen.

Die folgende Tabelle gibt einen Vergleich über die wichtigsten Kenndaten verschiedenartiger Batterien.

Tabelle 2.3 Übersicht über einige Typen von Akkumulatoren (Auswahl). Die Energie- und Leistungsdichten können sich auch bei einem Batterietyp erheblich unterscheiden und hängen zudem von den Betriebsbedingungen (z. B. Temperatur) ab. Die angegebenen Werte sind als Maximalwerte nach dem heutigen Stand zu verstehen.

Typ	Energiedichte		Spezifische Energie		Zellspannung (aufgeladen)
Bleiakkumulator	bis 100 [Kiehn03]	Wh/l	bis 50 [Kiehn03]	Wh/kg	2 V
NiCd	bis 60 [Kiehn03]	Wh/l	bis 55 [Kiehn03]	Wh/kg	ca. 1,3 V
NiMH	bis 240 [Emadi05]	Wh/l	bis 80 [Emadi05]	Wh/kg	ca. 1,3 V
Li-Ionen	bis 350 [Emadi05]	Wh/l	bis 150 [Emadi05]	Wh/kg	3,5 V
Natrium-Schwefel	bis 240 [Kiehn03]	Wh/l	bis 120 [Kiehn03]	Wh/kg	2,1 V

Als langfristige Alternative zu Batterien entwickeln sich Kondensatoren, bei denen die Energie nicht chemisch, sondern mit Hilfe eines elektrischen Feldes gespeichert wird. Zurzeit bieten auch sehr leistungsfähige Kondensatoren noch nicht die Energiedichte einer chemischen Batterie. Die Weiterentwicklung erfolgt jedoch dermaßen rasant, dass Kondensatoren in einigen Jahren in Bereiche vordringen könnten, die bislang Batterien vorbehalten waren.

Ein Verwandter der chemischen Batterie ist die Brennstoffzelle. Auch bei ihr wird die elektrische Energie durch eine chemische Reaktion erzeugt. Der wesentliche Unterschied zur Batterie ist jedoch, dass die reagierenden Substanzen in getrennten Behältnissen gespeichert werden und bei Erzeugung elektrischer Leistung der Zelle permanent zugeführt werden. Dabei verbrauchen sich die reagierenden Substanzen. Da bei heutigen Zellen eine der beiden Substanzen Sauerstoff ist, entspricht die chemische Reaktion einer Verbrennung der anderen Substanz (des „Brennstoffs“), daher werden diese Zellen Brennstoffzellen genannt.

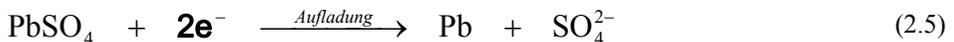
2.2.1 Bleiakkumulatoren

Bleiakkumulatoren haben sich als Starterbatterien etabliert und sind bis heute bei allen Fahrzeugen trotz der in Tabelle 2.3 erkennbaren Einschränkungen Standard. Eine Zelle liefert eine Spannung von 2 V, in einer 12-V-Batterie befinden sich also 6 Zellen. Die Zelle besteht im ungeladenen Neuzustand aus zwei Bleiplatten (Pb) in einem Elektrolyt aus verdünnter Schwefelsäure ($\text{H}_2\text{SO}_4 + n \cdot \text{H}_2\text{O}$). Genau genommen handelt es sich bei den Elektroden nicht um simple Bleiplatten, sondern um Metallgerüste, die als Träger für gepresstes, poröses Blei dienen, das um bestimmte Eigenschaften zu erreichen z. B. mit Calcium oder Antimon legiert wird [WalRei09]. In der Säure bildet sich auf den Platten sehr schnell das weiße Bleisulfat (PbSO_4). In diesem entladenen Zustand sollte die Batterie nicht zu lange gelagert werden, weil sich die Bleisulfat-Schicht verfestigt und später kaum noch zu chemischen Reaktionen imstande ist, man nennt diesen ungewünschten Effekt *Sulfatierung*.

Zum Laden der Batterie wird an den Platten eine Spannung angelegt. Wenn der Pluspol der Batterie an den Pluspol der Ladequelle (Ladegerät oder Generator mit Gleichrichter) und der Minuspol der Batterie an den Minuspol der Ladequelle angelegt werden, dann fließen Elektronen (in Reaktionsgleichungen als e^- bezeichnet) aus der positiven Elektrode heraus. Man bedenke, dass die technische Stromrichtung dem Elektronenfluss entgegengesetzt definiert ist, der Strom fließt also beim Laden in die positive Batterieelektrode hinein.

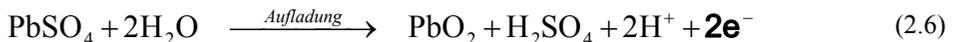
Auf der anderen Seite des Ladestromkreises fließen die Elektronen wieder in die negative Elektrode hinein (oder der Ladestrom fließt hinaus). Bei dieser Elektrode ist die Ladereaktion einfach: Die beiden Elektronen auf der linken Seite der Gleichung werden aus dem äußeren Ladestromkreis zugeführt. Das zunächst noch an die Elektrode gebundene Sulfat nimmt die Elektronen an und geht in Form von Sulfat-Ionen (SO_4^{2-}) wieder in die Lösung. An der Elektrode bleibt graues, metallisches Blei zurück.

Minuspol:



Komplexer ist die Reaktion an der positiven Elektrode, von der beim Laden Elektronen abgezogen werden. Dort entstehen Bleioxid (PbO_2), Schwefelsäure und Wasserstoff sowie die Elektronen, die an den äußeren Ladestromkreis abgegeben werden.

Pluspol:



Der entstehende Wasserstoff bildet mit den Sulfat-Ionen der anderen Elektrode weitere Schwefelsäure. Größere Mengen Wasserstoff (Explosionsgefahr durch Bildung von Knallgas mit dem Luft-Sauerstoff!) werden nur bei zu hoher Ladespannung durch die dann stattfindende Elektrolyse frei. Der genaue Wert dieser *Gasungsspannung* ist temperaturabhängig und liegt pro einzelner Zelle zwischen etwa 2,2 V (40 °C) und 2,5 V (−20 °C). Beim Entladen laufen die beiden Reaktionen umgekehrt ab.

Da beim Ladevorgang Schwefelsäure entsteht, die dichter ist als Wasser, kann die Säuredichte als Maß für den Ladezustand bei Batterien mit Wartungsöffnungen mit Hilfe eines Säurehebers gemessen werden. Aufgrund der höheren Dichte der Säure nimmt die Säurekonzentration von unten nach oben etwas ab (*Schichtung*). Beim Umgang mit Bleiakkus ist zu bedenken, dass die Schwefelsäure ätzend ist. Ein Schwappen oder gar Auslaufen der Säure kann durch Bindung in einem Gel oder einem Vlies verhindert werden. Solche Akkumulatoren werden vereinzelt

eingesetzt bei Anwendungen, bei denen im Betrieb mit einer starken Schräglage der Batterie zu rechnen ist, sind aber teurer als normale Akkus mit freiem Elektrolyt.

Blei belastet die Umwelt, deshalb existiert für die Bleiplatten aus Akkumulatoren eine nahezu geschlossene Recycling-Kette.

2.2.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren

Nickel-Cadmium-Akkus bestehen aus einer positiven Elektrode aus Nickel, einer negativen Elektrode aus Cadmium. Der Elektrolyt ist Kalilauge. Nickel-Cadmium-Akkus waren lange Zeit in Kleingeräten verbreitet.

Ein NiCd-Akku verliert an Kapazität, wenn er in nur teilweise entladem Zustand wieder nachgeladen wird. Er „verlernt“ quasi, seinen maximalen Energieinhalt abzugeben. Dieser Effekt wird deshalb *Memory-Effekt* genannt und stünde einem sinnvollen Energiemanagement in einem Elektro- oder gar einem Hybridfahrzeug entgegen.

Da Cadmium Krebs auslösen kann, sind NiCd-Akkus in der EU seit 2006 in Neufahrzeugen verboten. Inzwischen wurden NiCd-Akkus durch Nickel-Metallhydrid-Akkus abgelöst.

2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren

Die Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren sind eine Weiterentwicklung der Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. Die negative Cadmium-Elektrode wurde durch eine Legierung ersetzt, die in der Lage ist, Wasserstoff-Ionen zu binden.

Die Tabelle zeigt, dass sich die Energiedichte und die spezifische Energie dadurch erhöhten. Da die Zellspannung gleich wie beim NiCd-Akku ist und sich sogar das Lade- und Entladeverhalten ähneln², ließen sich NiCd-Akkus leicht durch NiMH-Akkus ablösen. Weitere Vorteile sind der Entfall des gefährlichen Cadmiums. NiMH-Akkus zeigen einen Effekt, der dem Memory-Effekt von NiCd-Akkus ähnelt, allerdings wesentlich schwächer ausgeprägt ist. Nachteilig ist, dass die Freisetzung des Wasserstoffs aus dem Metall bei tiefen Temperaturen nachlässt und damit auch die Leistungsfähigkeit mit sinkender Temperatur stärker sinkt als bei anderen Akkumulatoren. Schwierig ist weiterhin das Aufladen bei hohen Temperaturen, weil der Wasserstoff dann schlechter an die Legierung bindet.

Die in Serie produzierten Hybridfahrzeuge von Toyota und Honda sind noch mit NiMH-Akkus bestückt, Daimler setzt bereits Li-Ionen-Akkus ein.

2.2.4 Li-Ionen-Akkumulatoren

Lithium ist ein Metall, das aufgrund seiner Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe schon in den 30er Jahren das Interesse der Batteriehersteller weckte und deshalb recht bald zur Entwicklung von Primärelementen eingesetzt wurde. Akkumulatoren unter Verwendung von Lithium sind hingegen noch eine recht neue Technik.

Die positive Elektrode besteht aus einem Lithium-Mangan-Oxid, die negative Elektrode aus Kohlenstoff, z. B. in Form von Graphit. Zwischen den Elektroden befindet sich ein organischer Elektrolyt (eine Flüssigkeit oder bei Li-Polymer-Akkus ein nahezu festes Gel), der Lithium-Ionen transportieren kann. Beide Elektroden sind in der Lage, in ihrer atomaren Gitterstruktur

2 Dies gilt leider nicht für die in Kleingeräten oft durchgeführte Schnellladung. Aus diesem Grunde sind trotz der Ähnlichkeit beide Akku-Typen nicht immer beliebig austauschbar.

Lithium-Ionen einzuladen. Beim Laden wandern diese vom Oxid in das Graphit und nehmen dort ein Elektron auf. Beim Entladen hinterlassen sie dieses Elektron wieder in der negativen Graphit-Elektrode und kehren in die positive Oxid-Elektrode zurück.

Nach Tabelle 2.3 haben Li-Ionen-Akkumulatoren unter den dort verglichenen Typen die höchste Energiedichte und die höchste spezifische Energie. Sie gelten deshalb als Favoriten für Elektro- oder Hybridfahrzeuge. Die Kosten sind allerdings zurzeit noch deutlich höher, als bei anderen Batteriesystemen. Die in der Tabelle erwähnte Hochstromtauglichkeit stellt noch ein Problem beim Anfahren aus einer Li-Ionen-Batterie dar. Bei mechanischer Beschädigung oder Überladung können Li-Ionen-Akkus in Brand geraten.

Wichtiger als bei anderen Batterietypen ist, dass alle Zellen innerhalb einer Batterie vergleichbar beansprucht werden (Cell Balancing), dies könnte im einfachsten Fall durch ein integriertes Widerstandsnetzwerk zu Lasten des Wirkungsgrades geschehen, tatsächlich aber enthalten kommerzielle Li-Ionen-Batterien für den Automobilbereich zu diesem Zweck aufwändige Überwachungs- und Ausgleichsschaltungen, die in der Regel einen eigenen Mikrocontroller enthalten [KuWiDN99, BauFer08].

Continental ist mit einem Lithium-Ionen-Akku für den Mercedes S400 BlueHybrid in Serie, SB LiMotive Co. Ltd., ein Gemeinschaftsunternehmen von Bosch und Samsung, plant die Serienproduktion ab 2011. Johnson Controls – Saft Advanced Power Solutions ist ebenfalls in diesem Markt tätig.

2.2.5 Natrium-Schwefel-Akkumulatoren

In den 70er und 80er Jahren galten Natrium-Schwefel-Akkus mit ihrer damals als geradezu sensationell geltenden Energiedichte als die Erfolg versprechenden Energiequellen für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb. Die positive Elektrode besteht aus flüssigem Schwefel, die negative Elektrode aus flüssigem Natrium. Als Elektrolyt dient ein zylindrischer Keramikbecher, das Natrium befindet sich innen, der Schwefel außerhalb.

Dieser Aufbau verdeutlicht auch die Probleme. Der Akku muss auf ca. 300 °C beheizt werden, damit sowohl das Natrium als auch der Schwefel flüssig sind. Natrium ist ein Gefahrstoff, der chemisch heftig reagieren kann und sogar beim Kontakt mit Feuchtigkeit anfängt zu brennen.

Der Nickel-Metallhydrid-Akku kommt bei vergleichbaren Leistungsdaten ohne Heizung und eine aufwändige Sicherheitskonstruktion aus, damit wird der Natrium-Schwefel-Akku Geschichte bleiben.

Geforscht wird weiterhin an Natrium-Nickelchlorid-Batterien, diese arbeiten ebenfalls bei ca. 300 °C mit flüssigem Natrium, man verspricht sich aber Energiedichten bis 140 Wh/kg [Daimler09].

2.2.6 Kondensatoren als Energiespeicher

Kondensatoren speichern Energie nicht chemisch, sondern im elektrischen Feld zwischen zwei Elektroden. Die Elektronik kennt zahlreiche Bauformen von Kondensatoren. Folienkondensatoren und Keramikkondensatoren haben typische Kapazitäten von einigen pF bis hin zu einem μF . Die größeren Elektrolytkondensatoren haben typische Kapazitäten von 1 μF bis hin zu 1 mF. Die im Feld gespeicherte Energie W beträgt

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (2.7)$$

Benutzt man also einen sehr großen Elektrolytkondensator von $C = 1 \text{ mF}$ und lädt diesen auf $U = 100 \text{ V}$ auf, so speichert dieser eine Energie von 5 J . Mit $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Ws} = 3600 \text{ J}$ kommt man auf eine gespeicherte Energie von $0,0014 \text{ Wh}$. Berücksichtigt man, dass solch ein großer Kondensator bereits einige 100 g wiegt, kommt man auf Energiedichten unter $0,01 \text{ Wh/kg}$. Das wäre gerade einmal $1/500$ der Energiedichte eines Bleiakkus. Damit erschien die Energiespeicherung durch Kondensatoren lange Zeit unrealistisch.

Dies änderte sich, als in den 90er Jahren eine neue Gattung von Kondensatoren, die *Doppelschichtkondensatoren*, mit den Markenbezeichnungen UltraCap (Epcos), GoldCap (Panasonic) oder Supercap (WIMA) auf den Markt kam, die Kapazitäten von mehreren F auf kleinem Bau- raum ermöglicht. Diese können als Weiterentwicklung bisheriger Elektrolytkondensatoren betrachtet werden. Wie lassen sich solche Kapazitäten erreichen?

Die Kapazität C eines Plattenkondensators beträgt

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.8)$$

Darin ist die Dielektrizitätskonstante ε_0 eine Naturkonstante mit der Größe $8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$, die relative Dielektrizitätskonstante ε_r eine Materialkonstante mit einem Wert ≥ 1 , A die Fläche der Elektroden und d der Elektrodenabstand. Um eine hohe Kapazität zu erreichen, sollte also ein Dielektrikum mit hohem ε_r gewählt werden, die Elektroden sollten großflächig sein und der Abstand gering. Der Elektrodenabstand lässt sich nicht beliebig reduzieren, weil dadurch die Spannungsfestigkeit sinkt. Die Grenzen beim ε_r sind weitgehend ausgereizt und lassen sich durch neue Materialien nur noch geringfügig erweitern. Stattdessen hat man bei diesen neuartigen Kondensatoren die Oberfläche extrem erhöht, indem ein hochgradig poröses Elektrodenmaterial, nämlich Kohle statt Metall, verwendet wird.

Während ein gewöhnlicher Plattenkondensator die Ladung an den Elektrodenoberflächen durch Influenz speichert, geschieht dies bei den hochkapazitiven Kondensatoren stattdessen durch organische Ionen, die sich in einem Elektrolyt zwischen den Elektroden bewegen können und sich beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden anlagern. Angesichts dieser Ähnlichkeit zur Li-Ionen-Batterie stellt sich die Frage, ob es sich denn noch um einen Kondensator handele, oder ob man nicht auch hier von einer Batterie sprechen müsste. Die Ionen werden aber bei diesen Kondensatoren nicht chemisch gebunden (bei Li-Ionen-Akkus geschieht dies an der positiven Oxid-Elektrode), sondern durch lokale Influenzladungen an der Grenzschicht zum Elektrolyten, deshalb werden sie Doppelschichtkondensatoren genannt.

Doppelschichtkondensatoren erreichen spezifische Energien bis 10 Wh/kg , und Energiedichten bis 20 Wh/l . Dies ist wenig im Vergleich zu den Batteriekennwerten aus Tabelle 2.3, es werden jedoch ständig neue Typen mit höheren Kapazitäten entwickelt. Eine Stärke ist bereits jetzt, dass sie spezifische Leistungen bis 6 kW/kg und Leistungsdichten bis 10 kW/l ermöglichen, die von Batterien nicht annähernd erreicht werden [Emadi05]. Dies ist z. B. wichtig, um kurzzeitig einen hohen Anfahrstrom bereit zu stellen. Als Anwendung erscheint also vor allem die Fahrstromversorgung bei Hybridfahrzeugen, bei denen der Elektromotor nur kurzzeitig zum Anfahren und Beschleunigen eingesetzt wird, realistisch.

Eine weitere Anwendung von Doppelschichtkondensatoren könnte die Pufferung des Bordnetzes bei Lastschwankungen sein, um die Zeiten, bis die Lichtmaschinenregelung nach Zuschalten oder Abschalten von Lasten die reguläre Bordnetzspannung wieder eingestellt hat, zu überbrücken.

2.2.7 Brennstoffzellen

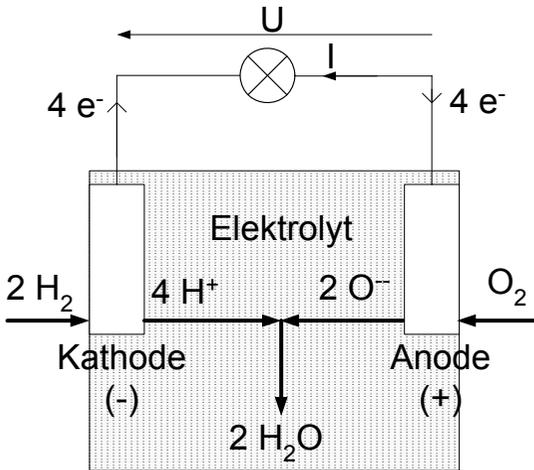
Bei einer Brennstoffzelle wird permanent ein „Brennstoff“, z. B. Wasserstoff und der zum „Verbrennen“ erforderliche Sauerstoff zugeführt. Würde man diese beiden Stoffe einfach in einem Behälter miteinander reagieren lassen, bekäme man eine stark exotherme Reaktion, bei Wasserstoff und Sauerstoff auch bekannt als Knallgas-Explosion.

Die Idee der Brennstoffzelle ist, diese Energie nicht wie bei chemischen Reaktionen üblich, als Wärme frei werden zu lassen, sondern als elektrische Energie. Dies geschieht durch eine Aufteilung der Verbrennungsreaktionen in Teilreaktionen und einen Eingriff in die Reaktionskette zum Abgreifen der dabei frei werdenden Ladungsträger. Gelingt dies, erzeugt die Brennstoffzelle elektrische Energie und kaum Wärme. Aus diesem Grunde wurden die Begriffe „Brennstoff“ und „verbrennen“ oben in Anführungsstriche gesetzt, da es sich um eine *kalte Verbrennung* ohne Flammen handelt.

Bild 2-4 soll dieses Prinzip am einfachsten Fall verdeutlichen, nämlich einer Brennstoffzelle, in der nur Wasserstoff und Sauerstoff reagieren. Die oben erwähnten Zwischenreaktionen sind die Reaktion an der positiven Elektrode, nämlich die Umwandlung molekularen Sauerstoffs (reiner Sauerstoff oder aus der Umgebungsluft) unter Aufnahme von Elektronen in Sauerstoff-Ionen, die Reaktion an der negativen Elektrode, nämlich die Umwandlung molekularen Wasserstoffs unter Abgabe von Elektronen in positiv geladene Wasserstoff-Ionen und die abschließende Reaktion, nämlich die Bildung von Wasser. Insbesondere die Reaktion an der Minus-Elektrode würde nicht selbsttätig stattfinden und erfordert ein Elektrodenmaterial, das katalytisch die Abspaltung von Elektronen unterstützt. Eine mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle liefert in der Praxis eine Spannung von ca. 1 V. Werden die Brennstoffzellen, die jeweils nur einige mm dick sind, gestapelt und in Serie geschaltet, lassen sich beliebige Spannungen erzeugen. Um eine Brennstoffzelle optimal zu betreiben müssen ggf. die Drücke und Volumenströme der zugeführten Gase sowie die Feuchtigkeit und Temperatur geregelt werden.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal, nach dem die verschiedenen Arten von Brennstoffzellen benannt werden, ist der verwendete flüssige oder feste Elektrolyt.

Bei der **PEMFC** (**P**roton **E**xchange **M**embrane **F**uel **C**ell) handelt es sich um eine protonendurchlässige Polymerfolie mit einer Dicke von einigen 10 µm bis etwas über 100 µm als Elektrolyten, die Abkürzung wird deshalb auch **P**olymer **E**xchange **M**embrane **F**uel **C**ell oder **P**olymer **E**lectrolyte **M**embrane **F**uel **C**ell gelesen. Diese Zellen sind trotz der Edelmetalle (v. a. Platin), die als Katalysatoren zwischen den Elektroden und der Membran erforderlich sind, am preisgünstigsten und benötigen für den Betrieb keine Heizung. Sie sind robust gegenüber den im Fahrzeug auftretenden Beanspruchungen, eine Verunreinigung mit CO, auch in Spuren, muss aber vermieden werden. Ein Nachteil ist, dass aufgrund der geringen Betriebstemperaturen das Wasser als Flüssigkeit entsteht und schwieriger abzuführen ist als Dampf. Der Wirkungsgrad ist geringer als bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Der PEMFC werden die größten Chancen eingeräumt, die Traktionsenergie für Elektrofahrzeuge zu liefern oder auch als Zusatzquelle in Hybridfahrzeugen eingesetzt zu werden. Die 2004 von der Bundeswehr in Betrieb genommenen U-Boote der Klasse U212 beziehen den Strom ihrer Fahrmotoren bei nahezu geräuschloser Fahrt ebenfalls aus PEMFC. Für den Betrieb im Fahrzeug ist es wichtig, dass die Brennstoffzelle durch Einfrieren keinen Schaden nimmt und schnell betriebsbereit ist. Um die Lebensdauer zu erhöhen, müssen zwei Phänomene beherrscht werden, die schleichende Vergiftung der Katalysatoren mit Fremdstoffen (vor allem Kohlenmonoxid und Schwefeloxide) und die ursächlich noch nicht vollständig geklärte Ausdünnung der Membran über die Lebensdauer.

**Bild 2-4**

Vereinfachtes Prinzip der Brennstoffzelle. Bei technisch realisierten Brennstoffzellen leitet der Elektrolyt nur entweder Anionen oder Kationen, die Bildung des Wassers erfolgt dann innerhalb einer der Elektroden.

BMW arbeitete daran, eine *SOFC* (Solid Oxide Fuel Cell) als Hilfsenergiequelle (APU) zu nutzen. Die SOFC arbeitet mit einer Zirkonium-Oxid-Keramik als Elektrolyt und gehört mit ihrer Betriebstemperatur von ca. 800 °C zu den Hochtemperaturbrennstoffzellen. Die BMW-Lösung sah einen Reformer vor, der den zum Betrieb nötigen Wasserstoff aus Benzin erzeugt. Da sie ohnehin permanent beheizt wird, kann die dabei entstehende Wärme auch für die Standheizung oder die Scheibenenteisung benutzt werden. BMW stellte das Projekt 2008 ein.

Weitere Arten von Brennstoffzellen, z. B. die für stationäre Großanlagen eingesetzte *MCFC* (Molten Carbonate Fuel Cell), die u. a. in der Raumfahrt eingesetzte *AFC* (Alkaline Fuel Cell) oder die ebenfalls in Großanlagen eingesetzte phosphorsaure Brennstoffzelle (*PAFC*, Phosphoric Acid Fuel Cell) werden in den nächsten Jahren vermutlich nicht ins Fahrzeug einziehen.

Tabelle 2.4 Brennstoffzellen (Fuel Cells)

Art	Elektrolyt	Betriebstemperatur
PEMFC (Proton Exchange Membrane)	Protonen leitende Polymerfolie	Umgebungstemperatur
DMFC (Direct Methanol)	Protonen leitende Polymerfolie	Umgebungstemperatur
AFC (Alkaline)	Kalilauge (OH ⁻ -leitend)	ca. 80 °C
PAFC (Phosphoric Acid)	Phosphorsäure (Protonen leitend)	170 °C bis 200 °C
MCFC (Molten Carbonate)	Schmelzcarbonate (CO ₃ ²⁻ -leitend)	ca. 700 °C
SOFC (Solid Oxide)	dotiertes Zirkondioxid (O ²⁻ -leitend)	ca. 800 °C bis 1000 °C

Der Wasserstoff kann in geeigneten Behältern (in Drucktanks, Kryotanks³ oder chemisch gebunden als Hydrid) mitgeführt werden. Er kann auch im Fahrzeug in einem Reformier aus anderen Brennstoffen wie Alkohol oder Benzin erzeugt werden. Daneben gibt es Brennstoffzellen, die auf den Direktbetrieb mit bestimmten organischen Verbindungen, z. B. Methanol (*DMFC*, **D**irect **M**ethanol **F**uel **C**ell), optimiert sind. Die DMFC zerlegt das Methanol mit Hilfe eines Katalysators in Wasserstoff und Kohlendioxid.

2.2.8 Weitere Energiespeicher

Grundsätzlich gibt es viele Möglichkeiten Energie zu speichern. Durchgesetzt hat sich nur die zuvor beschriebene Speicherung in chemischer Form oder in einem elektrischen Feld. Die Physik kennt jedoch eine Vielzahl weiterer Energieformen, die einzige Voraussetzung zur Speicherung ist die Rückführbarkeit in elektrische Energie.

Zwei weitere Techniken wurden experimentell untersucht, führten aber nicht zur Anwendungsreife, nämlich in Analogie zum Kondensator die Speicherung in einem Magnetfeld und die Speicherung als kinetische Energie mit Hilfe von Schwungrädern in Bussen. Die induktive Speicherung käme, wenn überhaupt, nur mit gekühlten supraleitenden Spulen in Frage und erscheint damit für mobile Anwendungen ungeeignet. Schwungräder als Energiespeicher wurde vor etwa 60 Jahren sogar in einem Serienprodukt, dem Schweizer „Gyrobus“ eingesetzt. Die wenigen verkauften Fahrzeuge bewährten sich aber nicht im Einsatz. Es gab und gibt weitere Versuche und Neuentwicklungen. [vBurg98] gibt für Schwungradspeicher eine Energiedichte bis 50 Wh/kg (entspricht einem guten Bleiakкумуляtor) und eine Leistungsdichte bis 1800 W/kg an. In näherer Zukunft werden diese Speicher vermutlich keine große Bedeutung erlangen.

2.3 Mehrspannungs-Bordnetz

Sowohl im Zusammenhang mit Hybridfahrzeugen als auch mit leistungsstarken Verbrauchern kommt die Problematik auf, mehrere Spannungen im Bordnetz vorzuhalten. Das Thema Hybridfahrzeuge wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Bis auf einige Oldtimer mit 6-V-Bordnetz und einige Versuchsfahrzeuge haben derzeit zugelassene PKW eine 12-V-Batterie und einen Generator, der eine höhere Ladespannung von 14 V in das Bordnetz einspeist (12-V-Bordnetz). Bei LKW sind diese Werte doppelt so hoch, wobei dort 2 Batterien zu je 12 V in Reihe geschaltet sind. Bei Zweirädern ist das 6-V-Netz noch heute verbreitet, wird aber auch dort langsam vom 12-V-Netz verdrängt.

In Zukunft ist mit neuen Fahrzeugsystemen wie „Brake-by-Wire“ oder „Steer-by-Wire“ (Kapitel 10) zu rechnen, die einen hohen Bedarf an elektrischer Energie haben. Damit steigen auch die Ströme im Bordnetz an und so auch quadratisch die Leitungsverluste (2.2). Durch Einsatz einer höheren Bordnetzspannung kann die gleiche Leistung mit reduzierten Strömen übertragen werden. Je höher die Spannungen sind, umso geringer werden die Leitungsverluste. Aus Sicherheitsgründen dachte man in der Autoindustrie an eine Spannung, die noch gefahrlos berührt werden kann, damit war zumindest gedanklich das 42-V-Bordnetz geboren, das mit einer Batteriespannung von 36 V ($3 \cdot 12$ V) arbeitet (im Gegensatz zu anderen Bordnetzen aber nach der höheren Ladespannung von 42 V benannt wurde). Diese Spannung fällt auch außer-

3 Kältetanks

halb des Automobils noch in die Definition einer gefahrlos berührbaren Spannung (*SELV*, Safe Extra Low Voltage), früher Schutzkleinspannung nach [DIN61140]⁴.

Neben dem Berührungsschutz, gibt es bei der Wahl der Spannung einen zweiten Aspekt. Bei Spannungen ab 18 V können Lichtbögen entstehen, wenn ein Leiter unter Last getrennt wird. Abgesehen von zunehmendem Schalterverschleiß durch Kontaktabbrand, kann ein Lichtbogen unter ungünstigen Umständen, wenn z. B. eine Leitung durch Unfallwirkung getrennt wird, Benzindämpfe entzünden. Dieses Problem wird aber als beherrschbar betrachtet.

Das Konzept, bei erhöhtem Leistungsbedarf die Spannung anzuheben, ist auch in elektrischen Energieversorgungsnetzen üblich. So werden Fernleitungen nicht mit 230 V, sondern in Deutschland mit bis zu 380 kV betrieben. Es liegt zunächst nahe, dies im Bordnetz eines Fahrzeugs ähnlich zu tun, also einen zentralen Strang mit hoher Spannung (natürlich keine 380 kV) zu legen, aus dem leistungsstarke Verbraucher auch direkt versorgt werden. Für kleine Verbraucher würden dann Stickleitungen mit kleineren Spannungen abzweigen. Dies funktioniert aber nicht, weil Transformatoren, die in Energienetzen die Spannungen umsetzen, auch in wesentlich kleinerer Ausführung zu schwer und damit für den mobilen Einsatz ungeeignet sind. Deshalb ist es auch nicht sinnvoll, das Netz im Fahrzeug mit Wechselspannungen zu betreiben.

Es wäre aber auch ungeschickt, alle Verbraucher im Fahrzeug einheitlich mit 42 V zu betreiben. In vielen Steuergeräten arbeiten Bausteine, die für Spannungen von 5 V oder weniger vorgesehen sind. In jedem Gerät müsste dann die Spannung sehr weit von 42 V auf 5 V heruntergesetzt werden. Dies könnte mit einem linearen Spannungsregler geschehen oder mit einem Schaltnetzteil [TieSch02]. Ein linearer Spannungsregler setzt die Differenz in Verlustleistung um. Selbst bei wenigen Steuergeräten wären so die Verlustleistungen in den Steuergeräten höher als die durch die 42 V eingesparten Leitungsverluste. Schaltregler haben bessere Wirkungsgrade, sind aber teuer, benötigen Platz und können EMV-Probleme verursachen.

Die Lösung des Problems ist eine Kombination aus einem 12-V-Netz für Kleinverbraucher und einem 42-V-Netz für Großverbraucher. Zweckmäßigerweise werden beide Netze über einen Schaltwandler gekoppelt. Dieser eine Schaltwandler wird bezüglich der Kosten, der Unterbringung und der elektromagnetischen Verträglichkeit unkritischer bewertet als viele einzelne Wandler in den Steuergeräten. Damit entfallen auch die hohen Entwicklungskosten für die Umrüstung aller Steuergeräte. Fällt eine Batterie aus, kann die andere Batterie beide Teilsysteme stützen.

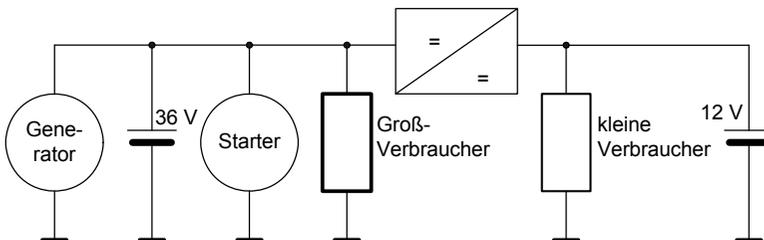


Bild 2-5 Struktur eines künftigen Mehrspannungsbordnetzes

4 Nachdem das 42-V-Netz seit über 10 Jahren angekündigt wurde, bis heute aber nicht serienmäßig realisiert wurde, wird in der Fachwelt bezweifelt, ob es überhaupt jemals kommen wird.

2.4 Energiemanagement

Das Energiemanagement lässt sich in mehrere Stufen einteilen. Die einfachste Stufe ist eine reine Batterieüberwachung, die den Fahrer über den Batteriezustand informiert. Möglich ist ein Eingriff in die Laderegelung, das Energiemanagement wäre so ein intelligenter Regler für die Lichtmaschine. Sinnvoll ist auch ein Eingriff in das Motormanagement, um zum Aufladen der Batterie eine Mindestdrehzahl zu erzwingen. Die nächste Stufe ist, automatisch Verbraucher je nach Wichtigkeit und Leistungsbedarf abzuschalten oder auch wieder einzuschalten. Der Zulieferer Continental bietet einen „Power-Trader“ an, der wie an einer Börse oder auf einem Markt Leistung quasi an die Verbraucher „verkauft“, wobei sich der „Preis“ nach dem Angebot richtet und jeder Verbraucher nach Wichtigkeit „bietet“. Die Steuerung eines hybriden Antriebssystems schließlich kann als die höchste Stufe des Energiemanagements betrachtet werden.

Die reine Batterieüberwachung unterscheidet drei Ziele, die Bestimmung des Ladezustandes (*State of Charge, SOC*), der Restlebensdauer der Batterie (*State of Health, SOH*) und als komplexere Messgröße die Funktionsfähigkeit der Fahrzeugfunktionen, vor allem des Startens (*State of Function, SOF*).

Zur Gewinnung dieser Informationen benötigt ein Energiemanagement-Steuergerät von der Batterie Informationen über Temperatur, Spannung und Strom. Aus diesen drei Messgrößen werden mit Hilfe von Simulationsmodellen in der Steuerung die drei Zielgrößen abgeleitet. Ein messtechnisch und rechnerisch aufwändiges Verfahren ist die Impedanzspektroskopie. Bei dieser wird die Impedanz (Realteil und Imaginärteil) der Batterie bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Man gewinnt so eine für den Batteriezustand charakteristische Ortskurve.



Bild 2-6
Energieversorgung eines Oberklassefahrzeugs (neben dem Kofferraum)

Die Simulationsmodelle sind auf die jeweilige Batterie angepasst. Das Batteriemanagement lässt sich nicht hinreichend genau realisieren, wenn mit nur einem Modell alle Batterien auf dem Markt abgedeckt werden sollen. Eine extreme Lösung wäre, nur genau einen Batterietyp im Modell zu implementieren, möglicherweise eine Batterie, die nur über die eigene Serviceorganisation des Herstellers vertrieben wird (und deren Preis meist über dem marktüblichen Niveau liegt). Diese Lösung würde langfristig die Kundenzufriedenheit beeinträchtigen, da viele Fahrzeughalter es von Fahrzeugen ohne Energiemanagement gewohnt sind, Batterien beliebiger Marken einzusetzen. Eine mögliche Lösung ist, über den Diagnosetester dem Energiemanagement mitzuteilen, welcher Batterietyp eingebaut wurde. Auch wenn es im kurzfristigen wirtschaftlichen Interesse der Serviceorganisation liegt, dass zum Batteriewechsel die Fachwerkstatt aufzusuchen ist, sollte das Batteriemanagement auch mit einer nicht programmierten Batterie, die der Halter selbst eingebaut hat, arbeiten können, dann evtl. mit reduzierter Genauigkeit.

Leider benutzen die Hersteller uneinheitliche Bezeichnungen für dieses Steuergerät. Verbreitet ist auch die Bezeichnung „Bordnetzsteuergerät“, die bei anderen Herstellern aber wiederum eine ganz andere Bedeutung hat.

In Bild 2-6 ist das kleine Steuergerät hinten das Energiemanagement-Steuergerät. Schräg darunter befindet sich der Fremdstartbolzen, der bei Starthilfe anstelle des Batterie-Minuspol zu verwenden ist, damit das Steuergerät den Fremdstart registriert und bei seinen Berechnungen berücksichtigt. Rechts ist die Zentralelektrik mit einigen Sicherungen zu erkennen. Vor der Batterie befindet sich ein Relais, das bei einem schweren Unfall (Signal vom Airbag-Steuergerät) das Bordnetz spannungsfrei schaltet.