



Kai Borgeest

# Elektronik in den Fahrzeugen

Hardware, Software  
und Projektmanagement



Kai Borgeest

**Elektronik in der  
Fahrzeugtechnik**

## Aus dem Programm

### Kraftfahrzeugtechnik

#### **Handbuch Verbrennungsmotor**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

#### **Lexikon Motorentchnik**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

#### **Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik**

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

#### **Bremsenhandbuch**

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

#### **Nutzfahrzeugtechnik**

herausgegeben von E. Hoepke und S. Breuer

#### **Aerodynamik des Automobils**

herausgegeben von W.-H. Hucho

#### **Verbrennungsmotoren**

von E. Köhler und R. Flierl

#### **Automobilelektronik**

herausgegeben von K. Reif

#### **Handbuch Kraftfahrzeugelektronik**

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

#### **Automotive Software Engineering**

von J. Schäuffele und T. Zurawka

Die BOSCH-Fachbuchreihe

- **Ottomotor-Management**
- **Dieselmotor-Management**
- **Autoelektrik/Autoelektronik**
- **Sicherheits- und Komfortsysteme**
- **Fachwörterbuch Kraftfahrzeugtechnik**
- **Kraftfahrtechnisches Taschenbuch**

herausgegeben von ROBERT BOSCH GmbH

**vieweg**

Kai Borgeest

# **Elektronik in der Fahrzeugtechnik**

**Hardware, Software, Systeme  
und Projektmanagement**

Mit 155 Abbildungen und 25 Tabellen

**ATZ/MTZ-Fachbuch**



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.

1. Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008

Lektorat: Reinhard Dapper

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.  
[www.vieweg.de](http://www.vieweg.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.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)

Technische Redaktion: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0207-1

## 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 mit 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 Thurau (VTI Technologies Oy) für die Unterstützung beim Bildmaterial.

Aschaffenburg, im November 2007

*Kai Borgeest*

---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Bordelektrik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Bordnetz .....	3
2.1.1 Leitungen und Kabelbäume .....	4
2.1.2 Verdrahtungspläne .....	6
2.1.3 Steckverbinder .....	7
2.2 Energiespeicher .....	9
2.2.1 Bleiakkumulatoren .....	10
2.2.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren .....	11
2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren .....	12
2.2.4 Li-Ionen-Akkumulatoren .....	12
2.2.5 Natrium-Schwefel-Akkumulatoren .....	12
2.2.6 Kondensatoren als Energiespeicher .....	13
2.2.7 Brennstoffzellen .....	14
2.2.8 Weitere Energiespeicher .....	16
2.3 Mehrspannungs-Bordnetz .....	16
2.4 Generatoren .....	18
2.5 Energiemanagement .....	20
2.6 Starter .....	22
2.7 Starter-Generatoren .....	23
2.8 Hybridfahrzeuge .....	24
<b>3 Beispiel Elektronische Dieselsteuerung (EDC) .....</b>	<b>27</b>
3.1 Aufgaben .....	28
3.2 Einspritzung .....	28
3.2.1 Winkeluhr .....	29
3.2.2 Berechnung der Einspritzmenge .....	32
3.2.3 Berechnung des Spritzbeginns .....	33
3.2.4 Ansteuerung des Einspritzsystems .....	34
3.2.5 Ansteuerung der Injektoren .....	35
3.2.6 Regelung des Raildrucks .....	40
3.3 Drehzahlregelung .....	41
3.4 Regelung des Luftsystems .....	42
3.4.1 Abgasrückführung .....	44
3.4.2 Aufladung .....	47
3.5 Abgasnachbehandlung .....	48
3.5.1 Lambda-Sonde .....	49
3.5.2 NO <sub>x</sub> -Sonde .....	51
3.6 Thermomanagement .....	51

<b>4 Bussysteme</b> .....	53
4.1 Zuordnung von Funktionen zu Geräten .....	53
4.2 Kfz-Elektronik als LAN .....	55
4.3 CAN-Bus .....	58
4.3.1 Physikalische Schicht des CAN .....	60
4.3.2 Sicherungsschicht des CAN .....	67
4.3.3 Beispiele für aufgesetzte Protokollschichten .....	74
4.4 Weitere Bussysteme .....	75
4.4.1 LIN .....	75
4.4.2 Zeitgesteuerte Bussysteme (Byteflight, TTCAN, TTP, FlexRay) .....	77
4.4.3 Busse für Rückhaltesysteme .....	79
4.4.4 Busse für Multimedia-Anwendungen .....	80
4.4.5 Drahtlose Netze .....	81
4.5 Praktisches Vorgehen .....	82
<b>5 Hardware</b> .....	85
5.1 Steuergeräteschaltungen .....	85
5.1.1 Rechnerkern .....	87
5.1.2 Auswertung der Sensoren .....	96
5.1.3 Ansteuerung der Aktoren .....	106
5.1.4 Spannungswandler .....	114
5.2 Elektromagnetische Verträglichkeit .....	116
5.2.1 Störquellen und Störsenken .....	117
5.2.2 Kopplungsmechanismen .....	118
5.2.3 EMV-Normung .....	123
5.2.4 Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV .....	130
5.3 Mechanische Anforderungen .....	132
5.4 Thermische Anforderungen .....	133
5.5 Chemische Anforderungen und Dichtigkeit .....	138
5.6 Anforderungen an den Umweltschutz .....	139
5.7 Aufbau- und Verbindungstechnik .....	140
<b>6 Software</b> .....	143
6.1 Architektur der Steuergeräte-Software .....	143
6.2 Echtzeit-Betriebssysteme .....	146
6.2.1 Aufgaben eines Echtzeit-Betriebssystems .....	146
6.2.2 OSEK/VDX .....	149
6.2.3 AUTOSAR .....	153
6.3 Steuer- und regelungstechnische Funktionen der Software .....	154
6.3.1 Steuerungen .....	154
6.3.2 PI- und PID-Regler .....	156
6.3.3 Modellbasierte Regler .....	160
6.4 Diagnosefunktionen der Software .....	165
6.4.1 Erkennung und Behandlung von Fehlern .....	166
6.4.2 Entprellung und Heilung von Fehlern .....	167
6.4.3 Fehlerspeicher-Management .....	168

---

6.4.4	Kommunikation zwischen Steuergerät und Tester .....	169
6.4.5	On-Board-Diagnose (OBD) .....	175
6.4.6	Programmierung über die Diagnose-Schnittstelle .....	178
6.4.7	ODX .....	179
6.5	Entwicklung der Anwendungs-Software .....	180
6.5.1	Programmierung .....	180
6.5.2	Bypass .....	183
6.5.3	Datensatz und Applikation .....	183
6.5.4	Softwaretests .....	188
6.5.5	Flash-Programmierung .....	196
<b>7</b>	<b>Projekte, Prozesse und Produkte .....</b>	<b>199</b>
7.1	Besonderheiten der Kfz-Branche .....	199
7.2	Stufen der Elektronik-Entwicklung .....	201
7.3	Projekte und Prozesse .....	203
7.4	Projekte in der Praxis .....	205
7.5	Projektphasen .....	206
7.5.1	Akquisitionsphase .....	207
7.5.2	Planungsphase .....	209
7.5.3	Entwicklungsphase .....	225
7.5	Serienbetreuung .....	229
7.5.1	Serienbetreuung durch die Entwicklung .....	229
7.5.2	Produktion .....	230
7.5.3	Service .....	231
7.6	Product Lifecycle Management .....	232
7.7	Qualität .....	233
7.7.1	Qualitätsmanagement .....	235
7.7.2	Qualitätsstandards .....	240
<b>8</b>	<b>Sicherheit und Zuverlässigkeit .....</b>	<b>245</b>
8.1	Ausfälle elektronischer Systeme .....	246
8.1.1	Alterung und Ausfall elektronischer Bauelemente .....	248
8.2	Ausfälle von Software .....	253
8.3	Methoden zur Analyse von Sicherheit und Zuverlässigkeit .....	254
8.3.1	FMEA .....	254
8.3.2	Fehlerbaumanalyse .....	256
8.3.3	Ereignisfolgenanalyse .....	258
8.4	Verbesserungsmaßnahmen .....	259
8.4.1	Qualifizierung von Bauelementen .....	259
8.4.2	Überwachung und Diagnose .....	260
8.4.3	Komplexität und Redundanz .....	261

<b>9 Anwendungen</b> .....	264
9.1 Funktionsentwicklung am Beispiel Klimaregelung .....	264
9.1.1 Prinzip der Klimaregelung .....	264
9.1.2 Struktur der Klimaregelung (Beispiel) .....	265
9.1.3 Funktionsentwicklung im Klimasteuergerät (Beispiel) .....	266
9.2 Systeme im Antriebsstrang .....	269
9.2.1 Motorsteuergeräte (Otto) .....	269
9.2.2 Steuergeräte für variable Nockenwellen .....	272
9.2.3 Getriebesteuergeräte .....	273
9.2.4 Kupplungssteuergeräte .....	273
9.2.5 Elektronische Differenzialsperre .....	274
9.3 Systeme für die Fahrdynamik und die aktive Sicherheit .....	274
9.3.1 Längsdynamik und Bremsen .....	275
9.3.2 Querdynamik, Lenkung und ESP .....	280
9.3.3 Vertikaldynamik .....	283
9.3.4 Reifenüberwachung .....	284
9.4 Systeme für die passive Sicherheit .....	285
9.5 Fahrerassistenz- und Informationssysteme .....	287
9.5.1 Spurwechselassistent .....	287
9.5.2 Einparkhilfen .....	287
9.5.3 Navigationssysteme .....	288
9.5.4 Telematik .....	291
9.5.5 Scheibenreinigungssysteme .....	293
9.5.7 Nachsichtssysteme .....	295
9.6 Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	296
9.7 Komfortsysteme .....	299
9.8 Unterhaltungselektronik .....	300
9.9 Diebstahlschutz .....	301
<b>10 Selbstbau und Tuning</b> .....	303
<b>11 Zukunftstechnologien im Fahrzeug</b> .....	305
11.1 Adaptronik .....	305
11.2 Nanotechnologie .....	307
11.3 Photonik .....	307
11.4 Weitere Zukunftstechnologien .....	308
<b>A Abkürzungen</b> .....	309
<b>B Symbole in Formeln und Naturkonstanten</b> .....	315
<b>C Literaturverzeichnis</b> .....	317
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	333

# 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 5000 Verkehrstote jährlich 5000 zu viel 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 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. 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 beim Tourenwagenrennen 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.

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

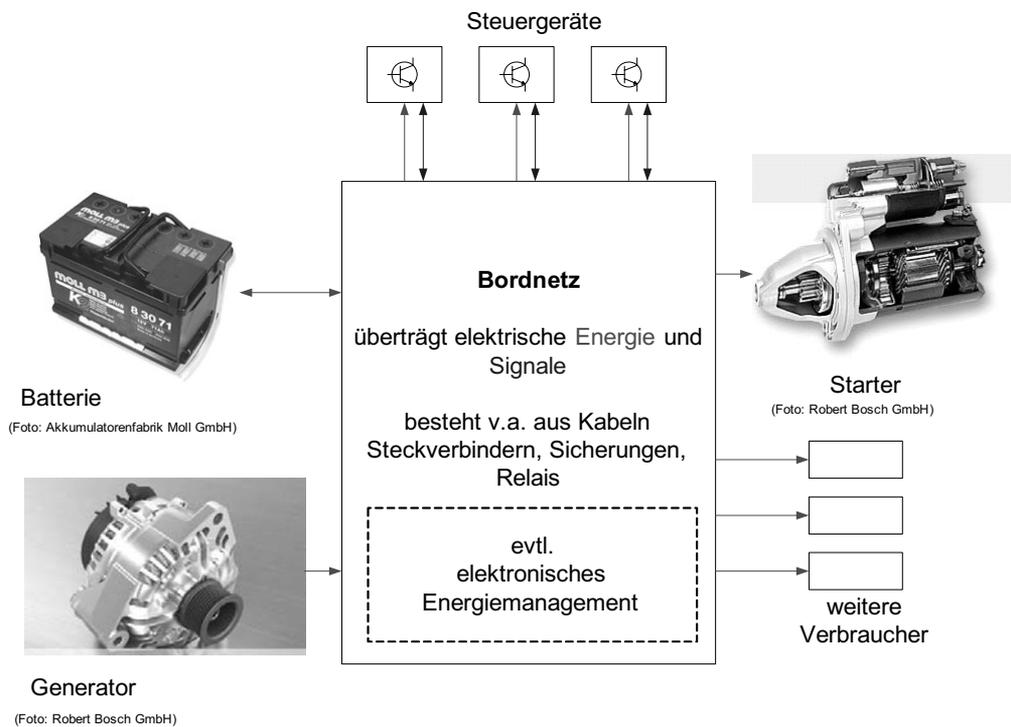
Ein wesentlicher Nachteil ist die hohe Komplexität. Wo Zuverlässigkeit gefordert ist, gilt nach wie vor der klassische Grundsatz, ein System so einfach wie möglich zu halten. Genau dies geschieht durch den massiven Elektronikeinsatz im Fahrzeug nicht mehr. Wer einmal in einer kalten Winternacht aufgrund 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 bereits einfache elektrische und elektromechanische Systeme, z. B. die Beleuchtung oder die Zündung. Diese Systeme mussten mit Energie versorgt werden, was zum einen geeignete Energiequellen, zum anderen die Weiterleitung über Kabel erforderte. Der Begriff *Bordelektrik* wird als Sammelbegriff für diese klassischen elektrischen Anlagen und den modernen elektronisch gesteuerten Systemen verstanden. Da die elektronisch gesteuerten Systeme in späteren Kapiteln vertieft werden, sollen in diesem Kapitel zunächst nur die konventionellen Systeme betrachtet werden, also das Bordnetz, Generatoren, Batterien, Anlasser und weitere Verbraucher. Da es sich bei Zündanlagen heute um elektronische Anlagen handelt, sind diese im Kapitel über Anwendungen 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 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 4 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“ zusammen gefasst, 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 Schmelz- oder elektronische Sicherungen verhindert werden, in einigen Bereichen ist dies allerdings nicht möglich, so z. B. bei den Leitungen zum Anlasser, die einen Strom von über 1 kA leiten müssen.

Daraus folgt, dass die zulässige Stromdichte  $S$  nicht überschritten werden darf, die sich aus dem Strom  $I$  und dem Leitungsquerschnitt  $A$  definiert 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 für den Dauerbetrieb und von 10 A/mm 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,  $\rho$  der spezifische Widerstand des Leiters (bei Kupfer 0,0185  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ). 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 $P$
Heckscheibenheizung	200 W
Abblendlicht	110 W
Innengebläse	120 W
Kühlerventilator	120 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].

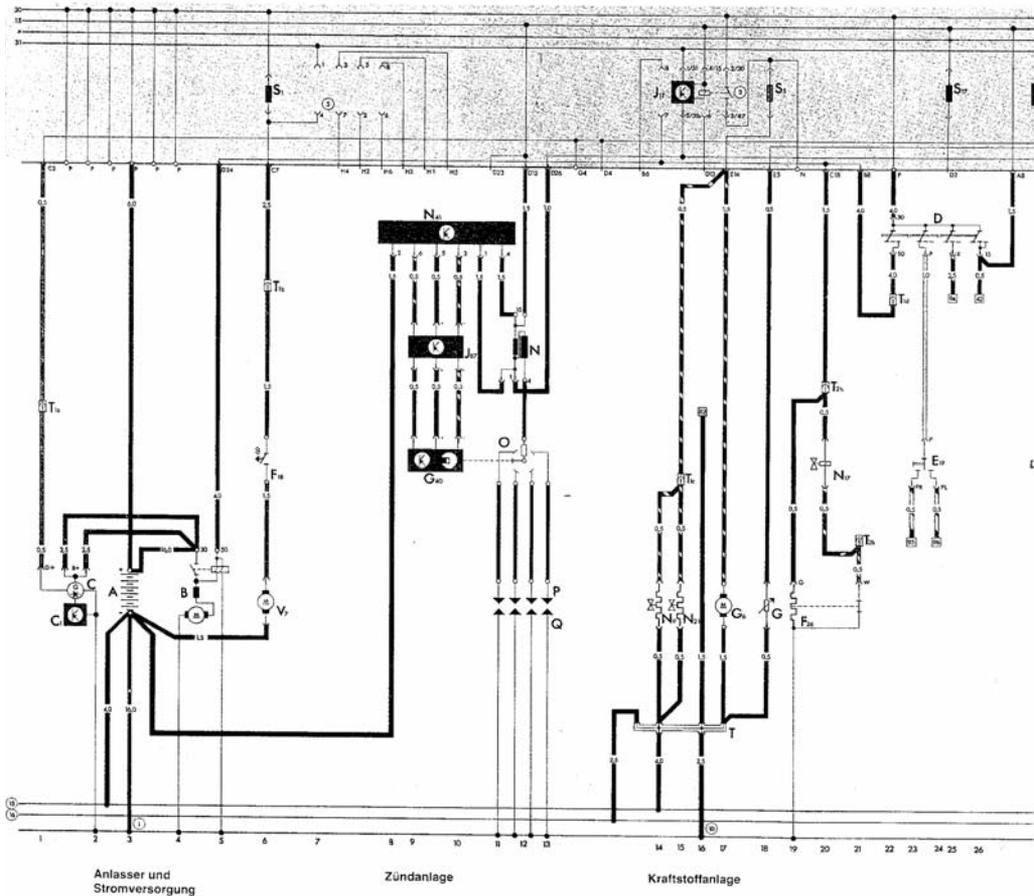
Neben der Verlustleistung ist zu berücksichtigen, dass die ohmschen Widerstände der Leitungen keinen unzulässigen Spannungsabfall verursachen. Auch dieser kann nach dem ohmschen Gesetz berechnet oder aus Tabellen entnommen werden.

[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)<sup>1</sup>. 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

<sup>1</sup> Einige der neuen Bezeichnungen sind noch immer gewöhnungsbedürftig, so wird z. B. eine Drosselspule seit 2000 ebenfalls R statt L genannt. Um den Leser nicht zu verwirren, bleibt es in diesem Buch bei L.

der in der Nähe des Armaturenbrettes, im Kofferraum oder im Motorraum untergebrachte Sicherungskasten, bei modernen Fahrzeugen kann diese Zentralelektrik ein eigenes, intelligentes 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 leichteren Identifikation der Leitungen im Fahrzeug können auch Hinweise auf die Farben gegeben werden, sofern der Plan nicht bereits farbig 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 jedoch oft völlig oder es findet sich lediglich eine herstellerspezifische 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)
<b>15</b>	<b>positive Batteriespannung, über Schlüsselschalter</b>
<b>30</b>	<b>positive Batteriespannung</b>
<b>31</b>	<b>negative Batteriespannung</b>
50	Anlasser (geschaltete Klemme)
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 5).

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.

## 2.2 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 3). 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 auch 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.

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 Wh/l [Kiehn00]	bis 50 Wh/kg [Kiehn00]	2 V
NiCd	bis 60 Wh/l [Kiehn00]	bis 55 Wh/kg [Kiehn00]	ca. 1,3 V
NiMH	bis 240 Wh/l [Emadi05]	bis 80 Wh/kg [Emadi05]	ca. 1,3 V
Li-Ionen	bis 350 Wh/l [Emadi05]	bis 150 Wh/kg [Emadi05]	3,5 V
Natrium-Schwefel	bis 240 Wh/l [Kiehn00]	bis 120 Wh/kg [Kiehn00]	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 Abnahme von 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 [WalRei06]. In der Säure bildet sich auf den Platten sehr schnell das weiße Bleisulfat ( $\text{PbSO}_4$ ). 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 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 Reakti-

ongleichungen 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.

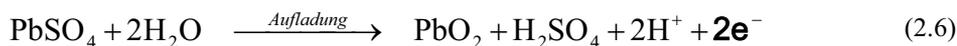
Auf der anderen Seite des Ladestromkreises fließen die Elektronen wieder in die negative Elektrode hinein (oder der Ladestrom fließt hinaus). Bei dieser Elektrode ist die Ladereaktion einfach: Die beiden Elektronen auf der linken Seite der Gleichung werden aus dem äußeren Ladestromkreis zugeführt. Das zunächst noch an die Elektrode gebundene Sulfat nimmt die Elektronen an und geht in Form von Sulfat-Ionen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 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 entsteht Bleioxid ( $\text{PbO}_2$ ), 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 in die entgegengesetzte Richtung ab.

Da beim Ladevorgang Schwefelsäure entsteht und diese dichter ist als Wasser, kann die Säuredichte als Maß für den Ladezustand betrachtet werden und 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 inzwischen 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 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 ähneln<sup>2</sup>, 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.

Die in Serie produzierten Hybridfahrzeuge von Toyota und Honda sind mit NiMH-Akkus bestückt, die Hersteller untersuchen aber bereits den Einsatz von Li-Ionen-Akkus.

### 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 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 wandern wieder in die positive Oxid-Elektrode.

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 nicht konkurrenzfähig. Die in der Tabelle erwähnte Hochstromtauglichkeit stellt noch ein Problem beim Anfahren aus einer Li-Ionen-Batterie dar. Sicherheitsfragen für den Einsatz im Fahrzeug (Brandgefahr bei mechanischer Beschädigung oder Überladung) sind noch ungeklärt.

### 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

---

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.

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 wahrscheinlich Geschichte bleiben.

### 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  $C = 1$  mF und lädt diesen auf  $U = 100$  V auf, so speichert dieser eine Energie von 5 J. Mit 1 Wh = 3600 Ws = 3600 J kommt man auf eine gespeicherte Energie von 0,0014 Wh. Berücksichtigt man, dass solch ein großer Kondensator bereits einige 100 g wiegt, kommt man auf Energiedichten unter 0,01 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  $\varepsilon_0$  eine Naturkonstante mit der Größe  $8,85419 \cdot 10^{-12}$  As/Vm, die relative Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_r$  eine Materialkonstante mit einem Wert  $\geq 1$ ,  $A$  die Fläche der Elektroden und  $d$  der Elektrodenabstand. Um eine hohe Kapazität zu erreichen, sollte also ein Dielektrikum mit hohem  $\varepsilon_r$  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  $\varepsilon_r$  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 kön-

nen. Angesichts dieser Ähnlichkeit zur Li-Ionen-Batterie stellt sich die Frage, ob es sich denn noch um einen Kondensator handelt, 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.

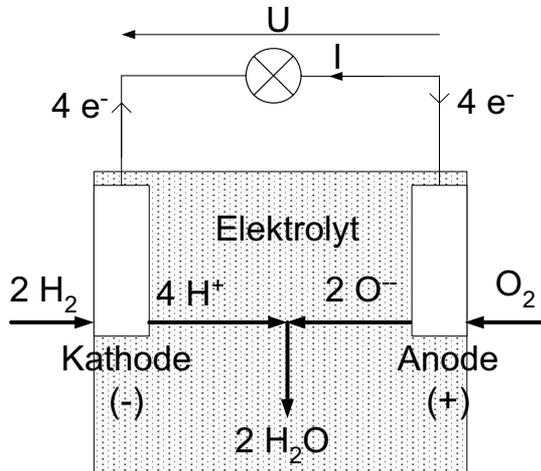
Doppelschichtkondensatoren erreichen spezifische Energien bis 10 Wh/kg, und Energiedichten bis 20Wh/l. Dies ist wenig im Vergleich zu den Batteriekennwerten aus Tabelle 2.3, es werden jedoch ständig neue Typen mit höheren Kapazitäten entwickelt. Eine Stärke ist bereits jetzt, dass sie spezifische Leistungen 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.

### 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.

**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.

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

Bei der **PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)** handelt es sich um eine protonendurchlässige Polymerfolie als Elektrolyt, die Abkürzung wird deshalb auch manchmal **Polymer Exchange Membrane Fuel Cell** gelesen. Diese Zellen sind trotz der Edelmetalle (v. a. Platin), die als Katalysatoren in den Elektroden 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 in flüssiger Form 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 für Ihre Fahrmotoren bei nahezu geräuschloser Fahrt ebenfalls aus PEMFC.

BMW arbeitet daran, eine **SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)** als APU, also als Hilfsenergiequelle 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 sieht 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.

Weitere Arten von Brennstoffzellen, z. B. die für stationäre Großanlagen eingesetzte **MCFC (Molten Carbonate 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.

Der Wasserstoff kann in geeigneten Behältern (in Drucktanks, Kryotanks oder chemisch gebunden als Hydrid) mitgeführt werden. Er kann auch im Fahrzeug in einem Reformer aus anderen Brennstoffen wie Alkohol oder Benzin erzeugt werden. Daneben gibt es auch Brennstoffzellen, die auf den Direktbetrieb mit bestimmten organischen Verbindungen, z. B. Metha-

nol (*DMFC*, **D**irect **M**ethanol **F**uel **C**ell), optimiert sind. Die DMFC zerlegt das Methanol mit Hilfe eines Katalysators in Wasserstoff und Kohlendioxid.

**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 <sup>-</sup> -leitend)	ca. 80 °C
PAFC (Phosphoric Acid)	Phosphorsäure (Protonen leitend)	170 °C bis 200 °C
MCFC (Molten Carbonate)	Schmelzkarbonate (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -leitend)	ca. 700 °C
SOFC (Solid Oxide)	dotiertes Zirkondioxid (O <sup>2-</sup> -leitend)	ca. 800 °C bis 1000 °C

### 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 bereits 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. Schwungrädern als Energiespeicher wurde vor etwa 60 Jahren sogar in einem Serienprodukt, dem Schweizer „Gyrobuss“ 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 Bleiakkumulator) 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 in einem späteren Abschnitt noch diskutiert.

Bis auf einige Oldtimer mit 6-V-Bordnetz und einigen Versuchsfahrzeugen 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 weit verbreitet, wird aber auch dort langsam vom 12-V-Netz verdrängt.

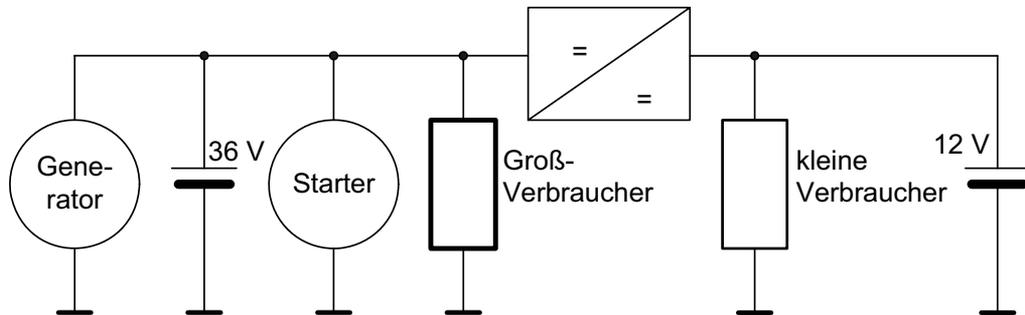
In Zukunft ist mit neuen Fahrzeugsystemen wie „Brake-by-Wire“ oder „Steer-by-Wire“ (Kapitel 9) zu rechnen, die einen hohen Bedarf an elektrischer Energie haben. Damit steigen auch die Ströme im Bordnetz an und so auch quadratisch die Leitungsverluste (2.2). Durch Einsatz einer höheren Bordnetzspannung kann die gleiche Leistung mit reduzierten Strömen übertragen werden. Je höher die Spannungen sind, umso geringer werden die Leitungsverluste, aus Sicherheitsgründen dachte man aber 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 allen anderen Bordnetzen aber nach der höheren Ladespannung von 42 V benannt wurde). Diese Spannung fällt auch außerhalb des Automobils noch in die Definition einer gefahrlos berührbaren Spannung (*SELV*, *Safe Extra Low Voltage*, früher Schutzkleinspannung) nach [DIN61140].

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

Dieses Konzept, bei erhöhtem Leistungsbedarf die Spannung anzuheben, ist auch bei 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 womöglich direkt versorgt werden. Für kleine Verbraucher würden dann Stichleitungen mit kleineren Spannungen abzweigen. Dieses Konzept 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 heruntersgesetzt 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

## 2.4 Generatoren

Die ersten Generatoren waren noch Gleichstrommaschinen, heute werden sowohl in PKW als auch in LKW ausschließlich dreiphasige Maschinen (Drehstrommaschinen) verwendet. Angetrieben wird der Generator vom Verbrennungsmotor über einen Riementrieb. Er liefert im Betrieb die gesamte Energie für das Bordnetz und lädt die Batterie. Übliche Leistungen liegen zwischen 1 kW bei kleinen PKW und 4 kW bei LKW oder besonders ausgestatteten PKW. Da die Beleuchtung einer der wichtigsten Stromverbraucher ist, wird der Generator umgangssprachlich auch *Lichtmaschine* (kurz *LiMa*) genannt.

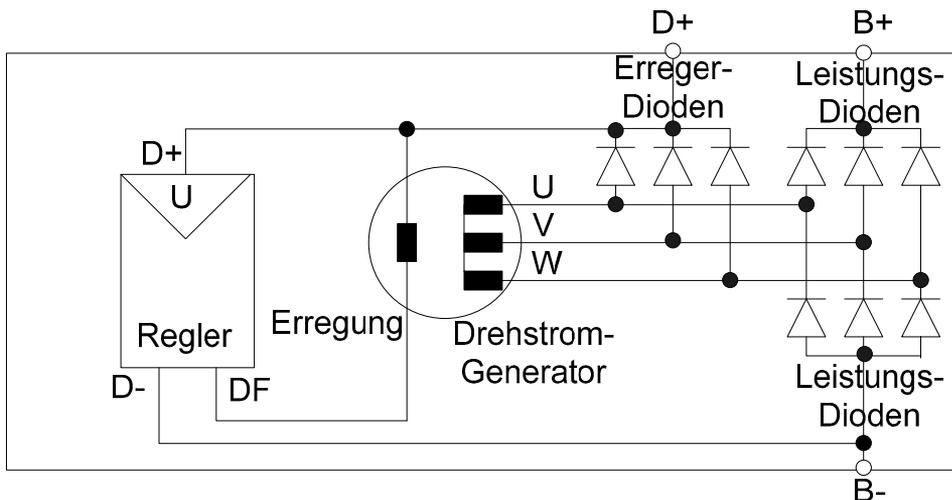
Die Erregerwicklungen zur Erzeugung des Magnetfeldes befinden sich auf dem Läufer und werden über Schleifringe versorgt. Generatoren für batterielose Zweiräder benutzen Permanentmagnete anstelle der Erregerwicklung. Während einige große Generatoren für Nutzfahrzeuge auch Einzelpole haben, enthalten fast alle anderen Lichtmaschinen 12, manchmal auch 16 *Klauenpole*. Klauenpole sind Finger aus einem magnetisierbaren Material, die sich von den beiden Enden einer zylindrischen Erregerwicklung außen über die Wicklung erstrecken. Über den Umfang verteilt läuft immer abwechselnd ein am Nordpol der Wicklung und ein am Südpol ansetzender Finger durch. Die drei Drehstromwicklungen U, V und W, in denen die erzeugte Spannung induziert wird, befinden sich im Ständer. Der innere Aufbau ist ausführlich beschrieben in [Bosch07E].

Bild 2-6 zeigt, wie die dreiphasige Spannung, die durch die drei Wicklungen erzeugt werden, durch sechs Leistungsdioden in *B6-Schaltung* gleichgerichtet wird. Dabei handelt es sich um Leistungsdioden im Metallgehäuse, die zwecks Wärmeabfuhr in zwei Metallplatten (Diodenplatten) innerhalb des Generatorgehäuses eingepresst sind. Zwischen den Klemmen B+ und B- wird dann eine pulsierende Gleichspannung abgegeben.

Die Spannung an den Generatorklemmen hängt von der Drehzahl, der Feldstärke bzw. Flussdichte des rotierenden Magnetfeldes und auch der elektrischen Last ab. Um die Bordnetzspannung konstant zu halten, bedarf es einer Regelung. Dabei sind Drehzahl und Last Störgrößen, deren Einfluss durch die Regelung zu kompensieren ist. Da der Erregerstrom beliebig einstellbar ist, kann er als Stellgröße benutzt werden, um das Magnetfeld und damit die Spannung im gewünschten Sinne zu beeinflussen. Zu diesem Zweck wird die Regelgröße, also die Bordnetzspannung zwischen den Klemmen D+ und B- der Lichtmaschine abgegriffen und dem

Regler über dessen Klemmen D+ und D- zugeführt. Der Regler vergleicht die gemessene Regelgröße  $U$  mit dem Sollwert der Bordnetzspannung (bis 14 V bei hohen Temperaturen, bei geringen Temperaturen auch mehr) und passt den Erregerstrom an, bis der Sollwert erreicht ist. Der Regler ist heute eine elektronische Schaltung, die über einen Leistungstransistor den Erregerstrom stellt. Da der Strom durch die Induktivität der Erregerwicklung sich nicht schlagartig ändern kann, geschieht die Einstellung des Stromes durch Einschalten und Ausschalten des Transistors (Zweipunktregelung). In der Schaltung Bild 2-6 befindet sich der Transistor im Regler zwischen den Klemmen DF und D-. Wenn er durchschaltet, steigt der Erregerstrom an, wenn er sperrt, sinkt der Erregerstrom. Bei Reglern, die den Transistor zwischen DF und D+ haben, muss die Erregerwicklung nicht wie im Bild, sondern zwischen DF und B- angeschlossen werden. Der Regler ist meist zusammen mit den Schleifern zur Stromzuführung der Erregerwicklung in den Generator integriert.

Moderne Regler werden teilweise auch vom Generator getrennt als Softwarefunktionen in Steuergeräten, z. B. einem Energiemanagement-Steuergerät untergebracht.



**Bild 2-6** Drehstrom-Generator mit Regler

Das folgende Bild zeigt, wie die Lichtmaschine in das Bordnetz integriert wird. Die Klemmen B+ und B- werden direkt mit den beiden Batteriepolen zusammengeschaltet. Der Anschluss D+ wird über den Schlüsselschalter (Zündung ein) und die Ladekontrollleuchte mit dem positiven Pol der Batterie verbunden. Dieser *Vorerregerstromkreis* ist nötig, weil die Lichtmaschine beim Start noch nicht den eigenen Erregerstrom erzeugen kann. Sie muss zunächst von der Starterbatterie *fremderregt* werden. Sobald an B+ und D- die volle Bordnetzspannung erzeugt wird, erlischt die Ladekontrollleuchte. Der Strom im Vorerregerkreis kann durch zusätzliche Widerstände, im Bild gestrichelt, angepasst werden, v. a. um die Kontrollleuchte zu schonen. Ein Widerstand parallel zur Ladekontrollleuchte ermöglicht auch dann die Vorerregung, wenn die Leuchte defekt ist. Da heute fast ausschließlich LED verwendet werden, tritt dieses Problem aber kaum mehr auf.