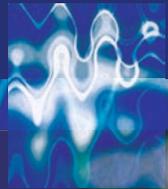


Gert Haggmann

# Leistungselektronik

Grundlagen und Anwendungen in  
der elektrischen Antriebstechnik

6. Auflage



AULA

Gert Hagmann

# Leistungselektronik

Grundlagen und Anwendungen in der  
elektrischen Antriebstechnik

Mit 209 Abbildungen, Aufgaben und Lösungen

6., überarbeitete Auflage



AULA-Verlag

# Inhalt

<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Leistungs-Halbleiterbauelemente</b> .....	<b>2</b>
2.1 Einführung in die Physik der Halbleiter.....	2
2.1.1 Eigenleitung .....	3
2.1.2 Störstellenleitung .....	4
2.1.3 Der pn-Übergang.....	5
2.1.3.1 Sperrrichtung.....	6
2.1.3.2 Durchlassrichtung .....	7
2.2 Dioden .....	7
2.2.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	7
2.2.2 Strom-Spannungs-Kennlinie.....	8
2.2.3 Schaltverhalten von Dioden.....	9
2.2.3.1 Einschaltvorgang .....	10
2.2.3.2 Ausschaltvorgang.....	11
2.3 Bipolare Leistungstransistoren .....	12
2.3.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	12
2.3.2 Der Transistor als Schalter.....	14
2.3.2.1 Einschaltvorgang .....	15
2.3.2.2 Ausschaltvorgang.....	16
2.3.3 Transistoren in Darlington-Schaltung.....	18
2.4 Feldeffekt-Leistungstransistoren.....	19
2.4.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	19
2.4.2 Schaltverhalten von Leistungs-Feldeffekttransistoren.....	22
2.5 Bipolare Transistoren mit isoliertem Steueranschluss (IGBTs).....	24
2.5.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	24
2.5.2 Schaltverhalten.....	26
2.6 Wahl des Halbleitermaterials .....	28
2.7 Thyristoren .....	29
2.7.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	29

2.7.2	Schaltverhalten von Thyristoren .....	32
2.7.2.1	Kritische Stromsteilheit .....	32
2.7.2.2	Kritische Spannungssteilheit.....	32
2.7.2.3	Einschaltvorgang .....	33
2.7.2.4	Ausschaltvorgang.....	34
2.7.3	Zündung von Thyristoren – Phasenanschnittsteuerung .....	36
2.7.4	Thyristorarten.....	38
2.7.4.1	Zweirichtungs-Thyristoren (Triac, Diac).....	39
2.7.4.2	Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR) .....	40
2.7.4.3	Rückwärts leitender Thyristor .....	41
2.7.4.4	Lichtgezündeter Thyristor.....	42
2.7.5	Abschaltbarer Thyristor (GTO-Thyristor) .....	42
2.7.5.1	Aufbau und Arbeitsweise.....	42
2.7.5.2	Schaltverhalten.....	44
2.7.5.3	IGCT-Thyristor .....	47
2.8	Intelligente Leistungshalbleiter (Smart-Power-Elemente).....	47
2.9	Gehäuseformen von Leistungshalbleitern .....	49
2.10	Thermisches Verhalten von Leistungshalbleitern .....	51
2.10.1	Entstehung der Verlustleistungen .....	51
2.10.1.1	Ermittlung der Durchlassverluste .....	52
2.10.1.2	Ermittlung der Schaltverluste .....	55
2.10.2	Abführung der Verlustleistung – thermisches Ersatzschaltbild .....	57
2.10.3	Kühlung.....	61
2.11	Schutz von Leistungshalbleitern .....	62
2.11.1	Überstromschutz .....	62
2.11.2	Überspannungsschutz .....	63
2.12	Reihen- und Parallelschaltung von Leistungshalbleitern .....	64
2.12.1	Reihenschaltung .....	65
2.12.2	Parallelschaltung .....	65
<b>3</b>	<b>Netzgeführte Stromrichter .....</b>	<b>67</b>
3.1	Zweipuls-Mittelpunktschaltung .....	68
3.1.1	Ohmsche Belastung.....	68
3.1.2	Glättung der Gleichspannung durch einen Kondensator .....	70
3.1.3	Glättung des Gleichstromes durch eine Drosselspule.....	72
3.1.4	Bauleistung des Transformators .....	74

3.1.5	Die gesteuerte Schaltung.....	78
3.1.6	Wechselrichterbetrieb .....	88
3.1.7	Kommutierung .....	92
3.1.8	Gleichspannungsänderung bei Belastung .....	98
3.1.9	Steuerwinkelgrenzwert beim Wechselrichterbetrieb .....	102
3.1.10	Steuerblindleistung und Verzerrungsleistung .....	105
3.1.11	Kommutierungsblindleistung.....	111
3.1.12	Bemessung der Induktivität der Glättungsdrossel .....	113
3.1.13	Lückbetrieb .....	117
3.2	Zweipuls-Brückenschaltung.....	123
3.2.1	Vollgesteuerte Schaltung .....	123
3.2.2	Halbgesteuerte Schaltung.....	129
3.3	Dreipuls-Mittelpunktschaltung.....	135
3.3.1	Aufbau und Betrieb bei Vollaussteuerung.....	135
3.3.2	Betrieb bei Teilaussteuerung.....	139
3.3.3	Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivitäten.....	143
3.4	Sechspuls-Brückenschaltung.....	145
3.4.1	Aufbau und Funktion .....	145
3.4.2	Die halbgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung .....	151
3.5	Zwölfpuls-Schaltungen .....	156
3.6	Schaltungen mit verminderter Blindleistungsaufnahme .....	159
3.6.1	Schaltungen mit Freilaufdiode.....	160
3.6.2	Folgesteuerung.....	161
3.7	Netzurückwirkungen .....	163
3.7.1	Grundschwingungs-Blindleistung .....	163
3.7.2	Stromüberschwingungen.....	164
3.7.3	Spannungsüberschwingungen.....	167
<b>4</b>	<b>Wechsel- und Drehstromschalter und -steller.....</b>	<b>170</b>
4.1	Wechsel- und Drehstromschalter .....	170
4.1.1	Wechselstromschalter .....	170
4.1.2	Drehstromschalter .....	173
4.2	Wechsel- und Drehstromsteller .....	174
4.2.1	Wechselstromsteller mit Phasenanschnittsteuerung .....	174
4.2.2	Blindleistungsverhalten des phasenanschnittgesteuerten Wechselstromstellers .....	178
4.2.3	Phasenabschnittsteuerung, Sektorsteuerung .....	181

4.2.4	Wechselstromsteller mit Schwingungspaketsteuerung.....	182
4.2.5	Drehstromsteller.....	184
<b>5</b>	<b>Selbstgeführte Stromrichter .....</b>	<b>188</b>
5.1	Thyristor-Löschung durch Anwendung von Löschsaltungen.....	188
5.2	Gleichstromsteller.....	192
5.2.1	Tiefsetz-Gleichstromsteller.....	192
5.2.2	Hochsetz-Gleichstromsteller.....	197
5.2.3	Hochsetz-Tiefsetz-Gleichstromsteller.....	200
5.2.4	Umkehrung der Energierichtung.....	203
5.2.5	Vierquadranten-Gleichstromsteller.....	204
5.3	Selbstgeführte Wechselrichter.....	209
5.3.1	Spannungs-Wechselrichter .....	209
5.3.1.1	Einphasiger Spannungs-Wechselrichter .....	210
5.3.1.2	Dreiphasiger Spannungs-Wechselrichter.....	213
5.3.1.3	Einphasiger Spannungs-Pulswechselrichter .....	218
5.3.1.4	Dreiphasiger Spannungs-Pulswechselrichter.....	221
5.3.1.5	Dreiphasiger Spannungs-Wechselrichter mit Drei- punktverhalten.....	225
5.3.2	Strom-Wechselrichter .....	226
5.3.2.1	Dreiphasiger Strom-Wechselrichter mit abschalt- baren Leistungshalbleitern.....	227
5.3.2.2	Dreiphasiger Strom-Wechselrichter mit konventi- onellen Thyristoren .....	229
5.3.2.3	Strom-Pulswechselrichter .....	232
5.4	Netzparallel betriebene selbstgeführte Stromrichter .....	234
5.4.1	Wechselstrom-Gleichstrom-Wandler mit sinusförmigem Eingangsstrom.....	235
5.4.2	Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom- Wechselstrom-Wandler mit sinusförmigem Netzstrom.....	238
5.4.2.1	Einphasiger Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstrom-Wandler mit sinus- förmigem Netzstrom .....	238
5.4.2.2	Dreiphasiger Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstrom-Wandler mit sinus- förmigem Netzstrom .....	242
5.4.3	Blindleistungstromrichter.....	245
5.4.4	Netzspannungsstabilisierung.....	248

<b>6 Resonanzstromrichter</b> .....	<b>250</b>
6.1 Schwingkreiswechselrichter .....	250
6.1.1 Lastgeführte Wechselrichter .....	250
6.1.1.1 Parallelschwingkreis-Wechselrichter.....	251
6.1.1.2 Reihenschwingkreis-Wechselrichter .....	254
6.1.2 Schwingkreiswechselrichter mit abschaltbaren Leistungs- halbleitern.....	258
6.2 Strom- und spannungsloses Schalten .....	261
6.2.1 Allgemeines .....	261
6.2.2 Grundformen für strom- und spannungsloses Schalten.....	262
6.2.3 Schaltungsbeispiele für strom- und spannungsloses Schal- ten.....	263
6.2.3.1 Gleichstromsteller nach dem Zero-Current- Switch-Konzept.....	263
6.2.3.2 Gleichstromsteller nach dem Zero-Voltage- Switch-Konzept.....	266
<b>7 Umrichter</b> .....	<b>269</b>
7.1 Zwischenkreis-Wechselstromumrichter .....	269
7.1.1 Wechselstromumrichter mit Gleichspannungs- Zwischenkreis (U-Umrichter) .....	270
7.1.2 Wechselstromumrichter mit Gleichstrom-Zwischenkreis (I-Umrichter) .....	272
7.2 Netzgeführte Direktumrichter .....	274
7.3 Zwischenkreis-Gleichstromumrichter .....	278
7.3.1 Durchflusswandler .....	278
7.3.2 Sperrwandler .....	285
<b>8 Stromrichteranwendungen in der elektrischen Antriebstechnik</b> .....	<b>289</b>
8.1 Gleichstromantriebe .....	289
8.1.1 Schaltungsaufbau und Betriebsverhalten der fremderreg- ten, stromrichtergespeisten Gleichstrommaschine.....	289
8.1.2 Drehrichtungsumkehr mit einem Umkehrstromrichter.....	295
8.1.3 Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb mit fremderregter Gleichstrommaschine.....	297
8.1.4 Drehzahlverstellung und Drehrichtungsumkehr mit einem Vierquadranten-Gleichstromsteller.....	300
8.1.5 Gleichstromantrieb mit Reihenschlussmaschine .....	304

8.2	Reihenschlussmotor mit Wechselstromsteller.....	306
8.3	Drehstromantriebe .....	307
8.3.1	Aufbau und Arbeitsweise von Drehstrommotoren .....	307
8.3.1.1	Drehstrom-Synchronmotor .....	308
8.3.1.2	Drehstrom-Asynchronmotor .....	309
8.3.1.3	Drehstrom-Reluktanzmotor .....	311
8.3.2	Drehzahlverstellung durch Umrichter mit Spannungszwischenkreis (U-Umrichter) .....	311
8.3.2.1	Kurvenform und Verstellung der von Umrichtern erzeugten Ausgangsspannungen .....	312
8.3.2.2	Spannungs-Frequenz-Kennlinien und Kennlinien-Steuerung .....	319
8.3.2.3	Feldorientierte Regelung.....	321
8.3.2.4	Bremsbetrieb .....	324
8.3.2.5	Schlupfkompensation.....	326
8.3.2.6	Überstromschutz .....	326
8.3.3	Drehzahlverstellung durch Umrichter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter) .....	326
8.3.4	Stromrichter motor .....	328
8.3.5	Drehzahlverstellung durch Direktumrichter .....	331
8.3.6	Drehzahlverstellung durch Steuerung der Ständerspannung .....	332
8.3.7	Die untersynchrone Stromrichter kaskade .....	334
8.3.8	Asynchronmaschine mit gepulstem Läuferwiderstand.....	336
8.3.9	Doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit Spannungszwischenkreis-Umrichter .....	338
8.4	Elektronisch kommutierte Maschine (Elektronikmotor) .....	340
8.4.1	Aufbau und Arbeitsweise.....	340
8.4.2	Bestromung der Wicklungen .....	342
8.4.3	Betriebsverhalten .....	342
8.4.4	Gebersysteme .....	343
8.4.4.1	Inkrementalgeber .....	344
8.4.4.2	Resolver .....	345
8.5	Schrittmotoren .....	346
8.5.1	Aufbau und Arbeitsweise.....	346
8.5.2	Vollschrittbetrieb, Halbschrittbetrieb, Mikroschrittbetrieb .....	347
8.5.3	Unipolare und bipolare Ansteuerung .....	348
8.5.4	Strangzahlen und Polpaarzahlen von Schrittmotoren.....	349

---

8.5.5	Ausführungsformen (Bauformen).....	350
8.5.6	Bestromung der Wicklungen .....	352
8.5.6.1	Blockbestromung .....	353
8.5.6.2	Sinusbestromung.....	356
8.5.7	Anwendung und Betrieb von Schrittmotoren .....	357
<b>Verzeichnis der wichtigsten Symbole .....</b>		<b>359</b>
<b>Literatur .....</b>		<b>363</b>
<b>Sachverzeichnis.....</b>		<b>364</b>



# 1 Einführung

Unter **Leistungselektronik** versteht man dasjenige Teilgebiet der Elektrotechnik (bzw. der elektrischen Energietechnik), das sich mit dem Schalten, der Umformung und der Steuerung von elektrischen Größen (wie zum Beispiel Strom oder Spannung) unter Verwendung von **elektronischen** Bauelementen befasst. Diese werden hierbei in der Regel so eingesetzt, dass sie (in ruhendem Zustand) Stromkreise (bzw. Stromzweige) schließen oder öffnen, also als **elektronische Schalter** arbeiten. Die meisten dieser auch als **Stromrichterventile** bezeichneten Bauelemente – zu ihnen gehören Dioden, Transistoren, Thyristoren – sind so konzipiert, dass sie den elektrischen Strom nur in *einer* Richtung führen können. Einrichtungen, mit denen elektrische Größen (Strom, Spannung) unter Verwendung von Stromrichterventilen geschaltet, umgeformt oder gesteuert werden können, bezeichnet man auch als **Stromrichter** oder als **Stromrichterschaltungen**. Sie ermöglichen die nachstehenden Umformungen:

## 1. Gleichrichten

Beim *Gleichrichten* wird Wechsel- oder Drehstrom in Gleichstrom umgeformt.

## 2. Wechselrichten

*Wechselrichten* liegt dann vor, wenn Gleichstrom in Wechsel- oder Drehstrom umgewandelt wird.

## 3. Wechselstromumrichten

Beim *Wechselstromumrichten* wird Wechsel- oder Drehstrom mit gegebener Spannung und Frequenz in Wechsel- oder Drehstrom mit anderer Spannung und (vielfach auch) anderer Frequenz umgeformt.

## 4. Gleichstromumrichten

*Gleichstromumrichten* bedeutet die Umformung von Gleichstrom mit gegebener Spannung und Polarität in Gleichstrom mit anderer Spannung und (gelegentlich auch) anderer Polarität.

Neben diesen Umformungen gibt es noch weitere Einsatzgebiete für Stromrichterschaltungen. Beispielhaft seien hier nur die **Blindleistungskompensation** und die **aktive Oberschwingungskompensation** erwähnt.

Nachfolgend werden zunächst der Aufbau, die Funktion sowie das Verhalten der verschiedenen Stromrichterventile (Leistungs-Halbleiterbauelemente) erläutert. Daran schließt sich die Beschreibung der Stromrichterschaltungen an. Schließlich wird gezeigt, wie Stromrichter in dem wichtigsten Anwendungsbereich der Leistungselektronik, der elektrischen Antriebstechnik, eingesetzt werden.

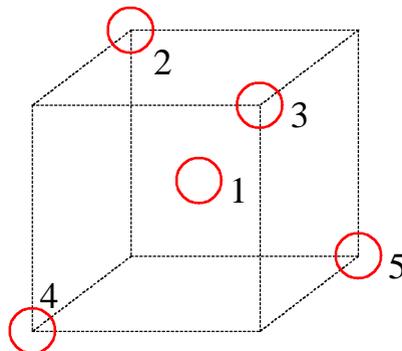
## 2 Leistungs-Halbleiterbauelemente

Bei den in der Leistungselektronik verwendeten Stromrichterventilen handelt es sich um **Leistungs-Halbleiterbauelemente**. Zu ihnen gehören **Dioden, bipolare Leistungstransistoren, Feldeffekt-Leistungstransistoren, bipolare Transistoren mit isoliertem Steueranschluss, nicht abschaltbare und abschaltbare Thyristoren**. Bevor auf diese Elemente näher eingegangen wird, sollen nachfolgend zunächst einige wichtige Erläuterungen zur Physik der Halbleiter gegeben werden.

### 2.1 Einführung in die Physik der Halbleiter

Halbleiterstoffe – zum Beispiel Silizium oder Germanium – sind Materialien, die im periodischen System der Elemente zwischen den Metallen und den Nichtmetallen eingeordnet sind. Sowohl Silizium- als auch Germaniumatome sind vierwertig. Das bedeutet, dass die äußere Elektronenschale vier Elektronen enthält. Man bezeichnet sie als **Valenzelektronen**.

Innerhalb des Halbleitermaterials sind die Atome – wie bei den meisten Stoffen – in ganz bestimmter Weise räumlich angeordnet. Man bezeichnet diese Anordnung als **Kristallgitter** oder auch kurz als **Gitter**. So ist jedes einzelne Silizium- oder Germaniumatom im Gitter tetraederförmig von vier Nachbaratomen umgeben. In Bild 2.1 ist schematisch dargestellt, wie ein betrachtetes Atom (1) von vier Nachbaratomen (2 bis 5) umgeben ist.



**Bild 2.1** Anordnung von Silizium- oder Germaniumatomen im Gitter (schematisch).  
1 betrachtetes Atom, 2 bis 5 Nachbaratome

Jedes Atom verwendet dabei jeweils ein Valenzelektron der vier Nachbaratome, um es zeitweise in seine äußere Elektronenschale einzubauen. Durch die dadurch bewirkten Bindungskräfte zwischen den Atomen werden diese im Kristallgitter zusammengehalten.

### 2.1.1 Eigenleitung

Bei sehr niedriger Temperatur – in der Nähe des absoluten Nullpunkts – sind alle Valenzelektronen von Halbleitern wie Silizium oder Germanium gebunden. Hier stellt das Material einen Isolator dar. Bei höherer Temperatur werden durch die dann vorhandenen Wärmebewegungen (Schwingungen) der Atome im Kristallgitter einzelne Bindungen aufgerissen. Das bedeutet, dass einzelne Valenzelektronen sich vom Atom lösen und sich frei im Material bewegen. Man bezeichnet sie als **freie Elektronen**, häufig auch nur kurz als *Elektronen*. Durch sie bekommt das Halbleitermaterial eine elektrische Leitfähigkeit.

Jedes Valenzelektron, das zu einem freien Elektron geworden ist, hinterlässt an seinem früheren Platz ein positiv geladenes Atom. Man bezeichnet es als **Loch** oder als **Defektelektron**. Es kann nun leicht ein Valenzelektron eines Nachbaratoms aufnehmen. Dadurch wird das Nachbaratom zu einem positiven Atom. Somit können sich auch Löcher fortbewegen. Die eigentliche Bewegung von Löchern ist ein ständiges Springen der Valenzelektronen von Nachbaratomen in freie Plätze, so dass scheinbar positive Ladungsträger weiterwandern. Das Halbleitermaterial bekommt durch diese Löcher eine zusätzliche Leitfähigkeit. Diese ist allerdings sehr viel geringer als die durch die freien Elektronen verursachte Leitfähigkeit.

Fließt in einem Halbleitermaterial ein elektrischer Strom, so besteht der Ladungstransport somit aus zwei Trägerbewegungen.

1. Die freien Elektronen bewegen sich *entgegengesetzt* der physikalischen Stromrichtung. Man spricht auch von **Elektronenleitung**.
2. Die Löcher bewegen sich *in* Stromrichtung. Man spricht hierbei von **Löcherleitung**.

Elektronen- und Löcherleitung bezeichnet man – zusammengefasst – als **Eigenleitung**. Die Bildung von freien Elektronen und von Löchern geschieht stets *paarweise*. Man nennt diese Erscheinung auch **thermische Generation** oder **thermische Ionisation**. Reines Halbleitermaterial enthält stets genauso viele freie Elektronen wie Löcher. Neben der thermischen Generation gibt es auch den umgekehrten Vorgang. Ein freies Elektron kann sich mit einem Loch vereinigen. Dadurch sind beide verschwunden. Einen solchen Prozess nennt man **Rekombination**.

In allen Halbleitern finden ständig Generationen und Rekombinationen statt. Im stationären Zustand verschwinden pro Zeiteinheit ebenso viele freie Elektronen

und Löcher durch Rekombination wie solche Ladungsträger durch Generation erzeugt werden. Die Zahl der in einem Halbleiter vorhandenen freien Elektronen und Löcher nimmt mit der Temperatur stark zu, so dass auch die elektrische Leitfähigkeit mit steigender Temperatur deutlich größer wird.

### 2.1.2 Störstellenleitung

Die Leitfähigkeit von reinen Halbleitern lässt sich durch den Zusatz von Fremdstoffen – also durch den Einbau von Fremdatomen in das Kristallgitter – wesentlich vergrößern. Man bezeichnet die Fremdatome auch als **Störstellen** und deren Einbau in das Halbleiter-Kristallgitter als **Dotierung**. Dabei werden zwei Arten von Dotierungen unterschieden.

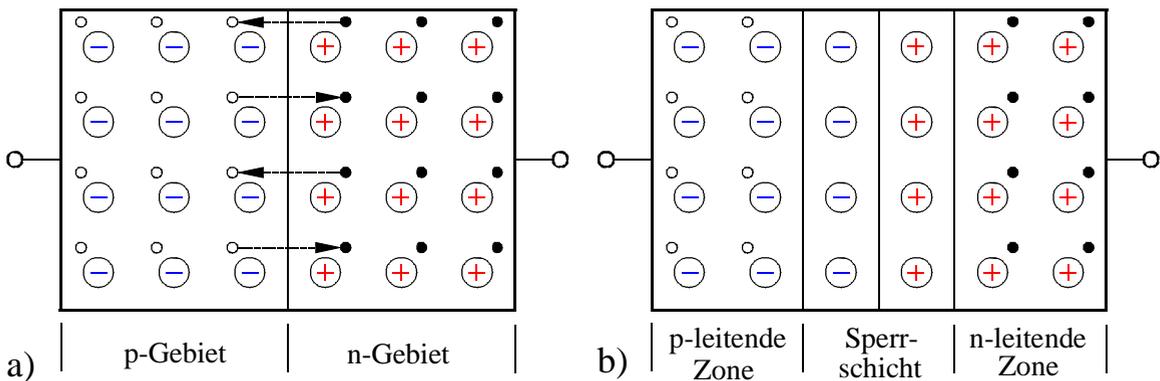
Ersetzt man beispielsweise im Kristallgitter von Silizium einen (geringen) Teil der Atome durch fünfwertige Fremdatome wie Phosphor (P), Arsen (As) oder Antimon (Sb), so werden in jeder Störstelle zur Herstellung der Bindung nur vier der vorhandenen fünf Valenzelektronen benötigt. Das „überzählige“ Elektron jeder Störstelle ist nur locker am Atom gebunden und wird schon bei Raumtemperatur zu einem freien Elektron. Jedes fünfwertige Fremdatom „schenkt“ also dem Halbleiter ein freies Elektron. Derartige Fremdatome heißen deshalb **Donatoratome** oder **Donatoren** (von donare, lat. schenken). Die in dieser Weise dotierten Halbleiter nennt man **n-leitend**. n steht für *negativ* und bedeutet, dass die Zahl der im Halbleitermaterial vorhandenen freien Elektronen größer ist als die Zahl der vorhandenen Löcher. Hierbei bezeichnet man die freien Elektronen – da sie in der Überzahl sind – als **Majoritätsträger** und die Löcher als **Minoritätsträger**.

Werden für die Dotierung statt fünfwertiger Fremdatome dreiwertige Fremdatome wie Bor (B), Aluminium (Al), Gallium (Ga) oder Indium (In) verwendet, so fehlt zur Herstellung der Bindung in jeder Störstelle jeweils ein Valenzelektron. Jedes dreiwertige Fremdatom liefert also dem Halbleiter ein Loch, welches somit ein Valenzelektron „annehmen“ kann. Derartige Fremdatome heißen deshalb **Akzeptoratome** oder **Akzeptoren** (von accipere, lat. annehmen). Die in dieser Weise dotierten Halbleiter nennt man **p-leitend**. p steht für *positiv* und bedeutet, dass die Zahl der vorhandenen Löcher größer ist als die Zahl der vorhandenen freien Elektronen. Hier sind die Löcher die **Majoritätsträger** und die freien Elektronen die **Minoritätsträger**.

Die *Stärke* der Dotierung wird durch den **Dotierungsgrad** gekennzeichnet. Er gibt das Verhältnis der Zahl der Fremdatome zur Gesamtzahl der Atome an. Verwendet werden Dotierungsgrade von  $10^{-6}$  bis  $10^{-10}$ . Dabei bedeutet zum Beispiel der Wert  $10^{-8}$ , dass jedes  $10^8$ -te Atom ein Fremdatom ist.

### 2.1.3 Der pn-Übergang

Kommt eine p-leitende Halbleiterschicht mit einer n-leitenden in Berührung, so bezeichnet man den entstehenden Übergang als **pn-Übergang**. Bei der Berührung wandern (diffundieren) freie Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet und rekombinieren hier mit Löchern. Die Wanderung hat zur Folge, dass in der Randzone des n-Gebietes die positiven Ladungen der Störstellenatome nicht mehr durch die abgewanderten Elektronen kompensiert werden. Die Randzone lädt sich also positiv auf. In gleicher Weise diffundieren Löcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet und rekombinieren hier mit freien Elektronen. Die Randzone des p-Gebietes lädt sich negativ auf. In Bild 2.2a ist der Zustand vor der Diffusion von Löchern und freien Elektronen in das jeweils benachbarte Gebiet dargestellt. Bild 2.2b zeigt den Zustand nach der Diffusion.



**Bild 2.2** Darstellung der Vorgänge am pn-Übergang (schematisch)

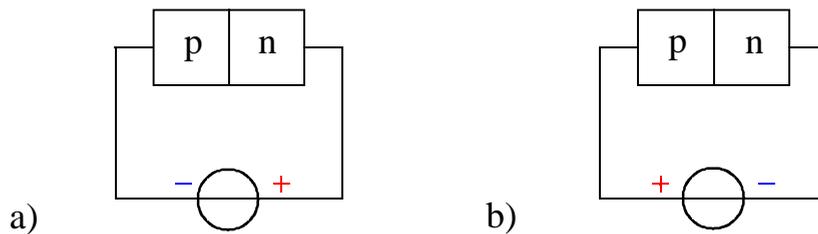
- a) Zustand vor der Diffusion von Löchern und freien Elektronen in das jeweils benachbarte Gebiet  
 b) Zustand nach der Diffusion von Löchern und freien Elektronen in das jeweils benachbarte Gebiet  
 ⊖ dreiwertige (negative) Störstellenatome, ⊕ fünfwertige (positive) Störstellenatome  
 ○ Löcher, ● freie Elektronen

Ursache für diese Diffusionsvorgänge sind die unterschiedlichen Ladungsträgerkonzentrationen in den beiden Gebieten. Die durch die Diffusionsvorgänge auf beiden Seiten des pn-Übergangs entstehenden Ladungen bauen ein elektrisches Feld auf, das vom n-Gebiet zum p-Gebiet verläuft. Es zieht alle beweglichen Ladungsträger aus dem betreffenden Bereich heraus. Dadurch entsteht auf beiden Seiten des pn-Übergangs eine dünne, nichtleitende Schicht, die als **Sperrschicht** bezeichnet wird.

Das in der Sperrschicht vorhandene elektrische Feld ist so gerichtet, dass es dem Übertritt weiterer Majoritätsträger entgegenwirkt. Das Feld erreicht schließlich eine solche Stärke, dass kaum noch Majoritätsträger den pn-Übergang passieren können. Befinden sich aber Minoritätsträger in der Sperrschicht, so werden diese durch das elektrische Feld auf die andere Seite gezogen. Dabei stellt sich ein

Gleichgewichtszustand ein, bei dem der durch Diffusion verursachte Strom der Majoritätsträger (Diffusionsstrom) und der durch das elektrische Feld verursachte Strom der Minoritätsträger (Feldstrom) sich genau gegenseitig aufheben.

Wir wollen jetzt einen pn-Übergang unter der Voraussetzung betrachten, dass er mit einer äußeren elektrischen Spannung beansprucht wird. Je nach der Polarität dieser Spannung spricht man entweder von einer Beanspruchung in *Sperrrichtung* oder von einer Beanspruchung in *Durchlassrichtung*.



**Bild 2.3** Elektrische Beanspruchung eines pn-Übergangs a) in Sperrrichtung, b) in Durchlassrichtung

### 2.1.3.1 Sperrrichtung

Zunächst möge die Spannung entsprechend Bild 2.3a gepolt sein. In diesem Fall wird das in der Sperrschicht vorhandene elektrische Feld verstärkt. Die beweglichen Ladungsträger werden dadurch vom Übergang abgezogen. Die Sperrschicht wird breiter, und der Übergang bleibt gesperrt. Man bezeichnet die Richtung, in der der pn-Übergang elektrisch beansprucht wird, als **Sperrrichtung**.

Allerdings sperrt der pn-Übergang nicht völlig; es fließt noch ein – wenn auch sehr geringer – Strom, der **Sperrstrom**. Er wird durch die im p-Gebiet vorhandenen freien Elektronen und durch die im n-Gebiet vorhandenen Löcher (also durch die Minoritätsträger) verursacht. Beide Ladungsträgerarten werden aufgrund der in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen *thermischen Generation* gebildet. Werden sie in der Sperrschicht erzeugt, oder gelangen sie durch Diffusion aus den angrenzenden Gebieten in die Sperrschicht, so werden sie durch das vorhandene elektrische Feld auf die andere Seite gezogen. Da die Erzeugung der genannten Ladungsträger mit der Temperatur kräftig zunimmt, steigt auch der Sperrstrom mit der Temperatur stark an.

Der Sperrstrom ist von der Höhe der am pn-Übergang liegenden Spannung weitgehend unabhängig. Erreicht diese jedoch hohe Werte, so werden einzelne in der Sperrschicht vorhandene freie Elektronen so stark beschleunigt, dass sie beim Auftreffen auf Atome Valenzelektronen herausschlagen. Diese werden dann ebenfalls beschleunigt und stoßen wieder auf andere Atome. Die Zahl der beweglichen

Ladungsträger nimmt dadurch lawinenartig zu (**Lawineneffekt**), so dass auch der Sperrstrom stark ansteigt. Diejenige Spannung, die zu einer derartigen Zunahme des Sperrstromes führt, wird als **Durchbruchspannung** bezeichnet. Grundsätzlich darf bei einem pn-Übergang die Durchbruchspannung nicht überschritten werden, da dies infolge der dann auftretenden hohen Verlustleistung in der Regel zur Zerstörung des Halbleiters führt.

### 2.1.3.2 Durchlassrichtung

Die an einem pn-Übergang liegende Spannung möge jetzt entsprechend Bild 2.3b gepolt sein. Nehmen wir an, dass die Spannung von Null aus langsam gesteigert wird, so wird zunächst das in der Sperrschicht vorhandene elektrische Feld geschwächt, und die Sperrschichtdicke nimmt ab. Bei wachsender Spannung wird die Sperrschicht schließlich ganz abgebaut, und der dann fließende Strom nimmt stark zu. Der pn-Übergang ist *leitend*. Die vorliegende Richtung, in der der Übergang hierbei beansprucht wird, heißt **Durchlassrichtung**. Diejenige Spannung, die im leitenden Zustand am pn-Übergang anliegt, bezeichnet man als **Durchlassspannung**. Sie beträgt bei einem Silizium-pn-Übergang ungefähr 0,7 V.

pn-Übergänge sind für Halbleiterbauelemente von besonderer Bedeutung, da die betreffenden Bauelemente nämlich in der Regel mindestens einen pn-Übergang, meistens sogar mehrere pn-Übergänge enthalten. Nachfolgend sollen der Aufbau, die Funktion sowie das Verhalten der verschiedenen Leistungs-Halbleiterbauelemente näher betrachtet werden.

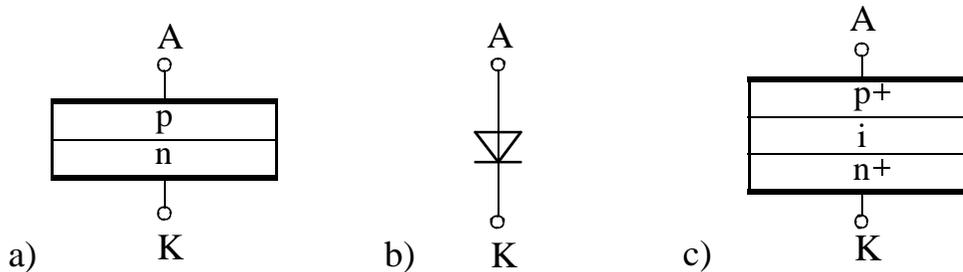
## 2.2 Dioden

### 2.2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Ein pn-Übergang ist – wie beschrieben – in der Lage, in Sperrrichtung eine hohe Spannung aufzunehmen, ohne dass ein merklicher Strom fließt. Dagegen kann die Anordnung in Durchlassrichtung bei nur geringer anliegender Spannung einen hohen Strom führen. Der pn-Übergang stellt damit ein **elektrisches Ventil** dar, das prinzipiell nur in *einer* Richtung einen Stromfluss zulässt. Man bezeichnet die technische Ausführung eines solchen Ventils als **Diode**. Ihr Aufbau ist in Bild 2.4a schematisch dargestellt. Bild 2.4b zeigt das verwendete Schaltzeichen.

Das Halbleitermaterial hat meistens die Form einer dünnen (meist einige Zehntel Millimeter starken) kreisrunden Scheibe, in der die p-leitende und die n-leitende Schicht aneinandergrenzen. Der zum p-Gebiet führende Anschluss heißt **Anode** (A), der zum n-Gebiet führende Anschluss **Kathode** (K). Je größer der Durchmesser der Siliziumscheibe ist, umso höher ist der Strom, den die Diode in

Durchlassrichtung führen kann (ohne überlastet zu sein). Beispielsweise können Hochleistungsdioden einen Scheibendurchmesser von 100 mm (oder mehr) haben.



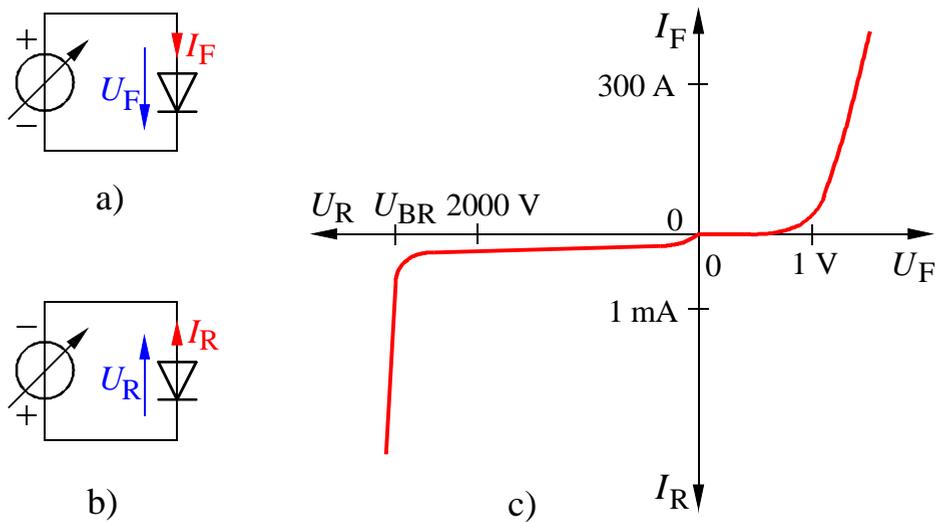
**Bild 2.4** a) Aufbau einer Diode (schematisch),  
 (p = p-leitendes Gebiet, n = n-leitendes Gebiet, A = Anode, K = Kathode),  
 b) Schaltzeichen, c) Diode mit stark dotierten Randzonen und schwach dotiertem Mittelgebiet

Die Sperrfähigkeit einer Diode hängt vom *Dotierungsgrad* der Halbleiterschichten ab. Je höher der Dotierungsgrad ist, umso geringer ist die zulässige Sperrspannung (Durchbruchspannung). Das liegt daran, dass bei stark dotierten Halbleiterschichten eine geringe Sperrschichtdicke auftritt. Dadurch ergeben sich schon bei relativ niedriger Sperrspannung hohe Feldstärkewerte. Zur Erzielung hoher zulässiger Sperrspannungen sind demzufolge niedrige Dotierungsgrade erforderlich. Damit ist jedoch der Nachteil verbunden, dass der Widerstand der Halbleiterschichten für den Durchlassstrom (Bahnwiderstand) relativ groß wird.

Eine Verbesserung ergibt sich dadurch, dass Dioden mit einer Schichtenfolge nach Bild 2.4c versehen werden. Dabei befindet sich zwischen zwei stark dotierten Randzonen ( $p^+$  und  $n^+$ ) ein sehr schwach dotiertes Mittelgebiet (i). Es wird meistens n-dotiert, kann aber auch mit einer p-Dotierung versehen werden. Da die Ladungsträger in dieser Schicht zu einem erheblichen Teil von der *Eigenleitung* herrühren, spricht man von einer i-Zone. Dabei steht i für *intrinsic* (eigenleitend). Die gesamte Anordnung wird – entsprechend der Schichtenfolge – als **pin-Diode** bezeichnet. Das schwach dotierte Mittelgebiet führt zu einer hohen Sperrfähigkeit. Im Durchlasszustand wird das Mittelgebiet von den Randzonen her mit Ladungsträgern überschwemmt und dadurch gut leitfähig.

## 2.2.2 Strom-Spannungs-Kennlinie

Wird eine Diode – sowohl in Durchlassrichtung als auch in Sperrichtung – mit einer Spannung beansprucht, so erhält man zu jedem Spannungswert einen entsprechenden Stromwert. Der genaue Zusammenhang, der hierbei zwischen Spannung und Strom besteht, lässt sich durch eine **Strom-Spannungs-Kennlinie** beschreiben. Man bezeichnet sie auch als **Diodenkennlinie**.



**Bild 2.5** Betrieb einer Diode a) in Vorwärtsrichtung, b) in Rückwärtsrichtung.  
c) Beispiel einer Diodenkennlinie

Bild 2.5a zeigt den Betrieb einer Diode in Durchlassrichtung. Man spricht hierbei auch von **Vorwärtsrichtung**. Die anliegende Spannung (Durchlassspannung) wird mit  $U_F$  (forward voltage) bezeichnet, der fließende Strom (Durchlassstrom) mit  $I_F$  (forward current). Der Verlauf der zugehörigen Strom-Spannungskennlinie ist in Bild 2.5c im I. Quadranten beispielhaft dargestellt.

Bei Beanspruchung der Diode in Sperrrichtung (Rückwärtsrichtung; Bild 2.5b) werden die Sperrspannung mit  $U_R$  (reverse voltage) und der Sperrstrom mit  $I_R$  (reverse current) bezeichnet. Die zugehörige Kennlinie ist in Bild 2.5c im III. Quadranten beispielhaft angegeben.  $U_{BR}$  ist die **Durchbruchspannung** der Diode.

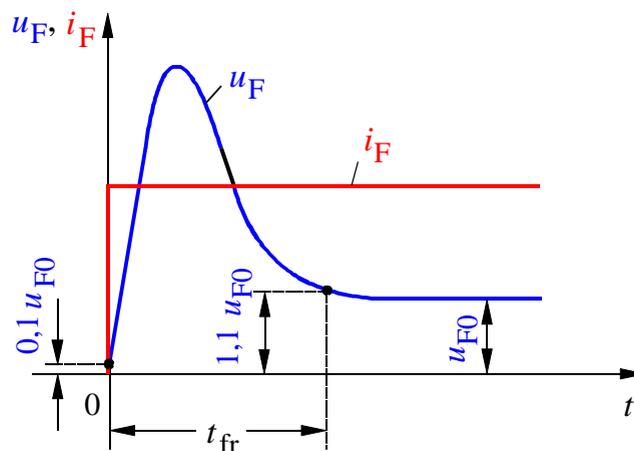
### 2.2.3 Schaltverhalten von Dioden

Wie schon erwähnt, arbeiten die in der Leistungselektronik eingesetzten Halbleiter-Bauelemente als **elektronische Schalter**. Das trifft auch für Dioden zu. Eine Diode kann *dann* als *eingeschalteter Schalter* angesehen werden, wenn sie in Durchlassrichtung einen Strom führt. Zwar tritt dann an der Diode noch ein Spannungsabfall von etwa einem Volt auf, dieser ist jedoch meistens gegenüber der in der Schaltung verwendeten Versorgungsspannung (Betriebsspannung) vernachlässigbar klein. Führt eine Diode in Durchlassrichtung dagegen *keinen* Strom (oder liegt in Sperrrichtung eine Spannung an), so hat die Diode einen sehr hohen Widerstand. Dann stellt sie einen *ausgeschalteten Schalter* dar.

### 2.2.3.1 Einschaltvorgang

Unter dem *Einschalten* einer Diode versteht man den Übergang vom gesperrten in den leitenden (stromführenden) Zustand. Beim Einsetzen des Stromes ist die Sperrschicht des pn-Übergangs zunächst noch nahezu frei von beweglichen Ladungsträgern und daher hochohmig. Erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit – wenn sich genügend freie Elektronen und Löcher in Richtung pn-Übergang bewegt haben – erreicht die Diode ihre volle Leitfähigkeit.

Häufig werden Dioden mit nahezu rechteckförmigen Stromimpulsen (Stromblöcken) beansprucht. Wir wollen daher nachfolgend annehmen, dass einer Diode ein steil ansteigender Strom  $i_F$  (Bild 2.6) aufgezwungen wird. Dann nimmt die an der Diode liegende Durchlassspannung  $u_F$  einen Verlauf an, wie er prinzipiell in Bild 2.6 dargestellt ist.



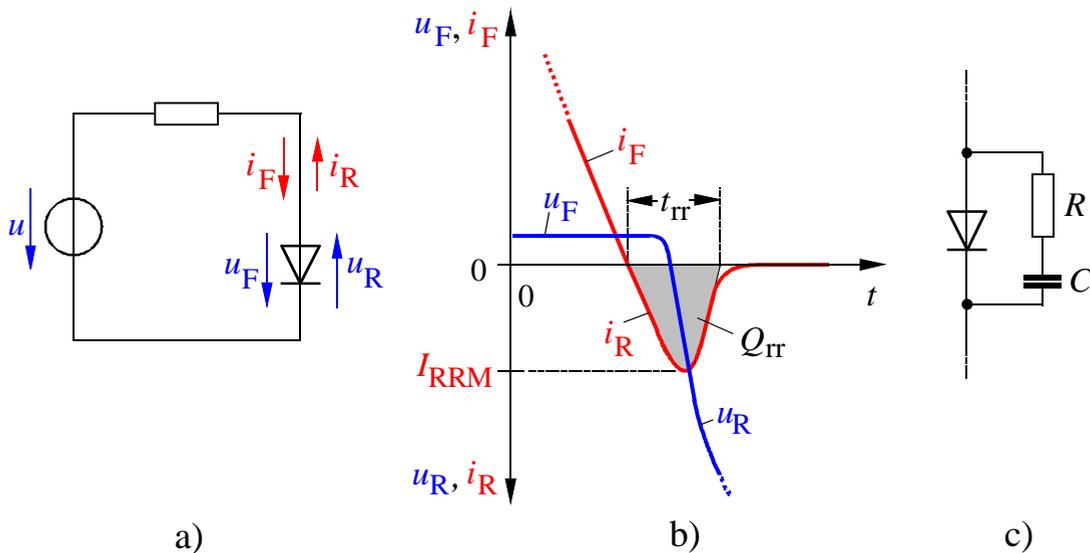
**Bild 2.6** Verlauf der an einer Diode auftretenden Durchlassspannung bei einem eingepprägten, sprunghaft ansteigenden Durchlassstrom

Es kommt nach dem Einsetzen des Stromes zu einer kurzzeitigen Überhöhung der Durchlassspannung, bevor diese in die statische Durchlassspannung ( $u_{F0}$ ) übergeht. Dadurch tritt während des Einschaltvorganges eine erhöhte Durchlassverlustleistung  $u_F \cdot i_F$  auf. Man bezeichnet sie auch als **Einschaltverlustleistung**. Führt eine Diode Stromimpulse mit relativ hoher Frequenz, so kann es durch die Einschaltverlustleistung zu einer merklichen zusätzlichen Erwärmung kommen.

Eine wichtige, das Einschaltverhalten einer Diode kennzeichnende Größe ist die sich aus Bild 2.6 ergebende Zeit  $t_{fr}$ . Man bezeichnet sie als **Durchlasserholzeit**. Für höhere Frequenzen werden vorwiegend spezielle („schnelle“) Dioden eingesetzt, die sich dadurch auszeichnen, dass sie eine niedrige Durchlasserholzeit und eine geringe Einschaltverlustleistung haben.

### 2.2.3.2 Ausschaltvorgang

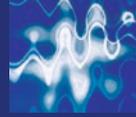
Unter dem *Ausschalten* einer Diode versteht man den Übergang vom leitenden in den gesperrten Zustand. Zur Betrachtung der dabei auftretenden Vorgänge geben wir die in Bild 2.7a dargestellte Schaltung vor.



**Bild 2.7** Zur Erläuterung des Ausschaltvorganges bei einer Diode.  
a) Betrachtete Schaltung, b) zeitlicher Verlauf von Diodenstrom und -spannung,  
c) RC-Beschaltung zum Schutz gegen Überspannungen

Die vorhandene Spannungsquelle möge eine sinusförmige Wechselspannung  $u$  liefern. Geht diese am Ende der positiven Halbschwingung auf Null zurück, so fällt der fließende Strom  $i_F$  in der Nähe des Stromnulldurchgangs etwa linear auf Null ab. Bei relativ langsamem Stromabfall haben die auf beiden Seiten des pn-Übergangs vorhandenen Minoritätsträger (Löcher im n-Gebiet und freie Elektronen im p-Gebiet) jeweils genügend Zeit zu rekombinieren, so dass eine Sperrschicht aufgebaut wird und die Diode beim Erreichen von  $i_F = 0$  sperrt.

In der Regel geht der Strom jedoch so steil auf Null zurück, dass der pn-Übergang beim Erreichen von  $i_F = 0$  noch mit Minoritätsträgern überschwemmt ist. Dies hat zur Folge, dass nach Bild 2.7b kurzzeitig ein Strom ( $i_R$ ) in negativer Richtung fließt. Hierdurch werden die im p-Gebiet vorhandenen freien Elektronen sowie die im n-Gebiet vorhandenen Löcher (Minoritätsträger) auf die jeweils andere Seite des pn-Übergangs transportiert (und somit *ausgeräumt*). Man bezeichnet  $i_R$  daher als **Ausräumstrom**. Er fällt nach Erreichen eines Höchstwertes ( $I_{RRM}$ ) relativ steil auf Null ab, und die Diode ist jetzt wieder in der Lage, Sperrspannung ( $u_R$ ) aufzunehmen. Die in Sperrrichtung fließende, in Bild 2.7b durch die gekennzeichnete Fläche dargestellte Ladung  $Q_{rr}$  heißt **Ausräumladung** oder



Dieses Buch stellt neben den Grundlagen auch die Anwendung der Leistungselektronik in der elektrischen Antriebstechnik vor. Nach Beschreibung der verwendeten Halbleiterbauelemente werden netzgeführte Stromrichter sowie Wechsel- und Drehstromsteller behandelt. Es schließen sich Ausführungen zu selbstgeführten Stromrichtern an, zu denen Gleichstromsteller, Spannungs- und Stromwechselrichter, Stromrichter mit sinusförmigem Netzstrom, Schaltungen zur aktiven Oberschwingungs- und Blindleistungskompensation gehören. Ferner werden Resonanzstromrichter sowie Wechselstrom- und Gleichstromumrichter erläutert. Die weiteren Kapitel befassen sich mit der Anwendung der Leistungselektronik in der elektrischen Antriebstechnik, dem wichtigsten Einsatzgebiet dieser Disziplin. Das Buch zeichnet sich durch eine klare, gut verständliche Präsentation des Stoffes aus. Aufgaben mit kompletten Lösungswegen helfen, den dargestellten Stoff besser zu verstehen und erleichtern das Einarbeiten.

# Leistungselektronik



Best.-Nr.: 315-01206  
ISBN 978-3-89104-827-6

**AULA**

[www.aula-verlag.de](http://www.aula-verlag.de)