



Leseprobe

Uwe Probst

Leistungselektronik für Bachelors

Grundlagen und praktische Anwendungen

ISBN (Buch): 978-3-446-44428-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-44532-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44428-7>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur 3. Auflage

Im Rahmen der modularisierten Bachelor- und Masterprogramme wurden die Präsenzphasen an den Hochschulen gekürzt und Studierende zu mehr Eigenarbeit veranlasst. Diese Eigenarbeit anhand von Beispielen und überschaubaren Übungsaufgaben zielgerichtet zu strukturieren sowie mit einfach handhabbaren und über das Internet bedienbaren Simulationsprogrammen zu unterstützen, ist ein wesentliches Ziel dieses Buches.

Die Inhalte basieren auf der gleichnamigen Vorlesung „Leistungselektronik“, die ich seit 2002 an der Technischen Hochschule Mittelhessen in dieser Form anbiete. Mathematische Grundlagen, die für das Verständnis und die Auslegung leistungselektronischer Schaltungen unerlässlich sind, werden im ersten Kapitel vorgestellt. Das Kapitel 2 ist den Leistungshalbleitern gewidmet. Dieser Teil wurde um halbleiterphysikalische Grundlagen und neue Halbleitermaterialien (SiC) erweitert. Hinzugekommen ist auf vielfachen Leserwunsch auch eine detaillierte Erläuterung von Datenblattangaben für Dioden und Transistoren. Kapitel 3 enthält eine umfassende Beschreibung der netzgeführten Stromrichter und ihrer Funktionsweise. Klassische Gleichstromsteller und ihre Steuerverfahren, die eine Grundlage der modernen Schaltnetzteile bilden, sind Gegenstand von Kapitel 4. Im Kapitel 5 werden die Grundschaltungen der Gleichstromsteller zu ein- und dreiphasigen spannungseinprägenden Wechselrichtern und den zugehörigen Steuerverfahren erweitert. Diese sind zentraler Bestandteil der modernen elektrischen Antriebstechnik. Sie finden ebenso Anwendung beim Netzanschluss von umweltfreundlichen Solargeneratoren und Windkraftanlagen.

Gegenüber der zweiten Auflage wurden sowohl Mehrpunktumrichter in Kapitel 6 als auch die Grundlagen des weichen Schaltens mit Hilfe von Resonanzkreisen in Kapitel 7 neu aufgenommen.

Neben vielen Beispielen enthält diese Auflage zusätzliche Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungsvorschlägen. Sie sollen die Studierenden bei der intensiven Auseinandersetzung mit dem behandelten Stoff begleiten. Die Zahl der verfügbaren Applets auf der Homepage zu diesem Buch wurde drastisch erweitert, und deckt nahezu alle besprochenen Schaltungen sowie die neu aufgenommenen Themengebiete ab. Diese Java-Applets zeigen – wie bei Simulationsprogrammen üblich – die charakteristischen Zeitverläufe der Zustandsgrößen, die für die Schaltung entscheidend sind. Zusätzlich bieten sie eine animierte Darstellung der jeweils leitenden Schaltungsarme und erleichtern so das Verständnis ihrer Funktionsweise.

Inzwischen bereichern viele Studierende mit Migrationshintergrund die deutschen Hochschulen. Vor diesem Hintergrund wurde das virtuelle Leistungselektroniklabor, über das die Java-Applets verfügbar sind, grundlegend überarbeitet und mit einer Sprachumschaltung versehen. Die Beschreibungen und Anleitungen der einzelnen Topologien stehen jetzt auch in Englisch und Französisch zur Verfügung.

Der Anhang wurde mit Unterstützung des Kollegen Peter Angermaier um eine Zusammenstellung von wesentlichen Fachbegriffen der Leistungselektronik erweitert. Dieser ist in deutscher und englischer Sprache in beide Richtungen nutzbar.

Dieses Buch richtet sich an Studierende und Mitarbeiter der Elektrotechnik an Universitäten und Fachhochschulen sowie an Ingenieure in der Praxis, die sich einen Einblick in die Wirkungsweise von leistungselektronischen Bauelementen und Schaltungen verschaffen wollen.

Ich danke meiner Lektorin Frau Franziska Jacob für das sorgfältige Korrigieren des Manuskripts sowie allen an dieser Arbeit beteiligten Studierenden und Mitarbeitern der Technischen Hochschule Mittelhessen. Insbesondere haben Dipl.-Ing. Matthias Loth mit seinem engagierten Einsatz bei der Umsetzung wichtiger Schaltungstopologien in praxisgerechte Laborversuche und Dipl.-Ing. Mark Weber mit der Erstellung der Programm-Bibliothek, die Grundlage aller Java-Applets ist, viel zu diesem Werk beigetragen. Schließlich gebührt ein besonderer Dank meiner Familie, die die Arbeit immer unterstützt hat. Mein Sohn Joris hat die neuen Abschnitte korrekturgelesen und mit seinem überragenden Sprachgefühl in die endgültige Form gebracht.

Gießen, im Juni 2015

Uwe Probst

URL der Internetseite mit den Applets zum Buch:

(<http://www.Leistungselektronik.de.vu>)

URL der Internetseite mit Applets zu Modulationsverfahren und Antrieben:

(<http://www.ElektrischeAntriebstechnik.de.vu>)

Inhalt

1	Einführung in die Leistungselektronik	13
1.1	Grundlagen	13
1.2	Eigenschaften des Schaltbetriebs	15
1.2.1	Gleich-, Wechsel-, Mischgrößen	16
1.2.2	Arithmetischer Mittelwert	17
1.2.3	Effektivwert	19
1.2.4	Gesamteffektivwert, Klirrfaktor, Formfaktor und Welligkeit	22
1.2.5	Überschlägige Berechnung bei einfachen Kurvenverläufen	24
1.3	Leistungsbilanz bei Stromrichtern	29
1.3.1	Leistungsfaktor bei sinusförmigen Größen	29
1.3.2	Fourier-Analyse	31
1.3.3	Blindleistung bei Stromrichtern	32
1.4	Betriebsquadranten	38
1.5	Lösungen	39
2	Leistungshalbleiter	44
2.1	Grundlagen der Halbleiterphysik	44
2.1.1	Eigenleitfähigkeit	47
2.1.2	Dotierung	48
2.1.3	Feld- und Diffusionsstrom	50
2.1.4	Kombination von P- und N-dotierten Halbleitern zum PN-Übergang	50
2.1.4.1	Raumladungszone beim stromlosen PN-Übergang	51
2.1.4.2	Raumladungszone beim PN-Übergang in Durchlassrichtung	53
2.1.4.3	Raumladungszone beim PN-Übergang in Sperrrichtung	53
2.2	Neue Halbleitermaterialien	54
2.2.1	Halbleiter mit großem Bandabstand	54
2.2.2	Anwendungsgebiete	56
2.3	Vergleich von idealen und realen Schaltern	56
2.4	Diode	60
2.5	Thyristor	64
2.6	Transistoren	66
2.6.1	MOSFET (Unipolar-Transistor)	67
2.6.2	Bipolar-Transistor	70

2.6.3	IGBT	71
2.6.4	Gemeinsamkeiten von Transistoren	72
2.7	Abschaltbare Thyristoren	75
2.7.1	Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO)	75
2.7.2	Integrated-Gate-Commutated-Thyristor (IGCT)	75
2.8	Schutz von Leistungshalbleitern	76
2.8.1	Spannungsbelastbarkeit	76
2.8.2	Überspannungsschutz	77
2.8.3	Schutz gegen Überstrom und Kurzschluss	82
2.8.4	Ein- und Ausschaltentlastung bei Transistoren	83
2.9	Erwärmung und Kühlung von Leistungshalbleitern	86
2.9.1	Durchlassverluste bei Thyristoren und Dioden	87
2.9.2	Verluste bei Transistoren	89
2.9.2.1	Durchlassverluste	89
2.9.2.2	Schaltverluste	91
2.9.3	Wärmetransport und Auslegung der Kühlung	92
2.10	Datenblattangaben für Dioden und Transistoren	98
2.10.1	Verwendete Kurzzeichen und Indizes in Datenblättern	98
2.10.2	Angabe von Kenndaten und Grenzwerten	100
2.10.3	Gleichrichterioden	101
2.10.3.1	Grenzwerte (Absolute maximum ratings)	101
2.10.3.2	Kenndaten (Characteristics)	103
2.10.4	Thyristoren	104
2.10.4.1	Grenzwerte	104
2.10.4.2	Kenndaten	104
2.10.5	Transistormodule	106
2.10.5.1	Grenzwerte für Transistor-Module	107
2.10.5.2	Kenndaten	108
2.11	Lösungen	113

3 Stromrichterschaltungen mit Dioden und Thyristoren 118

3.1	Einpuls-Gleichrichter M1	118
3.1.1	Aufbau der Schaltung	118
3.1.2	Funktionsweise der ungesteuerten M1U-Schaltung	119
3.1.3	Funktionsweise der gesteuerten M1C-Schaltung	121
3.2	Zweiphasige Mittelpunktschaltung M2	124
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise	124
3.2.2	Stromglättung	128
3.2.3	Steuergesetz im nicht lückenden Betrieb	132
3.3	Dreiphasige Mittelpunktschaltung M3	133
3.3.1	M3-Schaltung bei ohmscher Last	133
3.3.1.1	Steuergesetz im nicht lückenden Betrieb	139
3.3.1.2	Steuergesetz im Lückbetrieb	140
3.3.2	M3-Schaltung bei idealer Glättung	141
3.3.3	Glättungsdrossel	145
3.3.4	Wechselrichterbetrieb	147
3.3.5	Auswirkung und Berechnung der Kommutierung	149

3.3.5.1	Kommutierung bei netzgeführten Stromrichtern	149
3.3.5.2	Auswirkung der Überlappung	153
3.3.5.3	Wechselrichtergerenze	156
3.3.5.4	Gleichspannungsersatzschaltbild für Mittelwerte	157
3.3.6	Mittelpunktschaltungen mit verbundenen Anoden	159
3.3.7	Netzströme und Transformatorbauleistung	161
3.4	Brückenschaltungen netzgeführter Stromrichter	163
3.4.1	Vollgesteuerte Drehstrombrückenschaltung B6C	164
3.4.2	Brückenschaltung B2C	168
3.5	Umkehrstromrichter	171
3.6	Lösungen	174

4 Gleichstromsteller 182

4.1	Einführung	182
4.2	Tiefsetzsteller	185
4.2.1	Grundschialtung	185
4.2.2	Realer Tiefsetzsteller	187
4.2.3	Dimensionierung des LC-Filters	188
4.2.4	Stromwelligkeit	189
4.2.5	Betrieb mit lückendem Strom	193
4.3	Hochsetzsteller	198
4.3.1	Grundlegende Arbeitsweise	198
4.3.2	Betrieb mit lückendem Strom	202
4.4	Mehrquadrantensteller	203
4.4.1	Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr	204
4.4.2	Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr	206
4.5	Vollbrücke	212
4.5.1	Allgemeine Einführung	213
4.5.2	Pulsweitenmodulation	216
4.5.2.1	Pulsweitenmodulation mit zwei Spannungsniveaus (PWM2)	217
4.5.2.2	PWM mit drei Spannungsniveaus (PWM3)	220
4.6	Ansteuerschaltungen für MOS-Transistoren	231
4.6.1	Grundlagen	231
4.6.2	CMOS-Gatter	233
4.6.3	Gegentaktstufe	234
4.6.4	Beschleunigtes Abschalten	234
4.6.5	Treiber-ICs	235
4.6.6	Potenzialfreie Ansteuerung mit Impulsübertrager	236
4.7	Lösungen	240

5 Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis 252

5.1	Einführung	252
5.2	Einphasige spannungseinprägende Wechselrichter	255
5.2.1	Halbbrücke mit Grundfrequenztaktung	255
5.2.2	Vierquadrantensteller mit Grundfrequenztaktung	258

5.2.3	Steuerverfahren zur Verstellung von Frequenz und Amplitude	261
5.2.3.1	Pulsamplitudenmodulation	261
5.2.3.2	Vierquadrantensteller mit Unterschwingungsverfahren	261
5.2.4	Anwendungen	273
5.3	Dreiphasiger spannungseinprägender Wechselrichter	273
5.3.1	Grundlegender Aufbau und Steuerverfahren	273
5.3.1.1	Grundfrequenztaktung	274
5.3.1.2	Unterschwingungsverfahren	282
5.3.1.3	Raumzeigermodulation	289
5.3.1.4	Weitere Steuerverfahren	296
5.3.1.5	Flattop-Verfahren	298
5.3.2	Ergänzende Komponenten	299
5.4	Einsatzgebiete und Anwendungen	300
5.4.1	Elektronische Antriebstechnik	301
5.4.2	Netzeinspeisung regenerativ erzeugter Energien	302
5.5	Lösungen	304
6	Mehrpunkt-Wechselrichter	309
6.1	Grundlagen und Schaltungsvarianten	309
6.2	Dreipunkt-Wechselrichter	313
6.2.1	Einphasiger Dreipunkt-Halbbrücken-Wechselrichter	314
6.2.1.1	Pulsweitenmodulation der Dreipunkt-Halbbrücke	318
6.2.1.2	Steuergesetz und Ausgangsspannung	322
6.2.1.3	Spannungs- und Stromverläufe bei der PWM	322
6.2.1.4	Bedeutung der Klemmdioden	323
6.2.2	Dreiphasiger Dreipunkt-Wechselrichter	324
6.2.2.1	Schaltzustände und Ausgangsspannungen	325
6.2.2.2	Spannungsraumzeiger	329
6.2.2.3	Modulationsverfahren und Steuergesetz	333
6.2.2.4	Auswirkung von Verriegelungszeiten auf die Ausgangsspannung	334
6.3	Lösungen	338
7	Resonantes Schalten	343
7.1	Motivation	343
7.2	Grundlegende Analyse von LC-Kreisen	346
7.3	Grundstrukturen für weiches Schalten	355
7.4	Tiefsetzsteller mit ZCS	359
7.5	Tiefsetzsteller mit ZVS	366
7.6	Lösungen	370

2

Leistungshalbleiter

■ 2.1 Grundlagen der Halbleiterphysik

Lernziele

Die Lernenden ...

- kennen die grundlegenden Eigenschaften von Halbleitern
- verstehen die Wirkung der Dotierung
- beschreiben die Vorteile neuer Halbleitermaterialien

Halbleiter sind am absoluten Temperaturnullpunkt, also bei 0 K ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), nichtleitend. Dort sind alle Elektronen fest mit dem Atomkern verbunden, können sich nicht frei bewegen und stehen so für einen Ladungstransport nicht zur Verfügung.

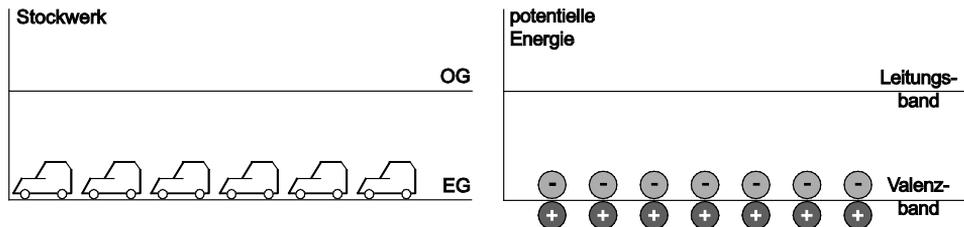


Bild 2.1 Analogie zwischen mehrgeschossigem Parkhaus (links) und Energieniveaus in Halbleitern (rechts)

Steigt die Temperatur des Halbleiterkristalls ausgehend von 0 K an, wird Energie zugeführt. Mit ihrer Hilfe können Elektronen aus der äußeren Hülle die Anziehungskräfte des Atomkerns überwinden und die feste Bindung an den Kern verlassen. Es entstehen Paare aus nun frei beweglichen Elektronen und zurückbleibenden, positiv geladenen Atomrümpfen. Die Anzahl der entstehenden Elektronen-Loch-Paare hängt von der Höhe der Halbleitertemperatur T ab.



Beispiel 2.1 Beweglichkeit von Fahrzeugen in einem Parkhaus

Im linken Teil von Bild 2.1 ist das Erdgeschoss (EG) eines vollbesetzten Parkhauses schematisch dargestellt. Die Fahrzeuge stehen Stoßstange an Stoßstange und können daher weder vorwärts noch rückwärts bewegt werden. Welche Möglichkeiten gibt es, diesen Zustand zu ändern?

Lösung:

Rangiermöglichkeiten werden geschaffen, wenn ein oder mehrere Fahrzeuge nach Bild 2.2 im Obergeschoss (OG) des Parkhauses abgestellt werden. Ist dieses Stockwerk weitgehend leer, so kann sich das Fahrzeug dort ungehindert bewegen. Im Erdgeschoss ist die Situation ebenfalls besser geworden: Obwohl eine große Bewegungsfreiheit der KFZ im EG nach wie vor fehlt, können die Autos links und rechts des freigewordenen Stellplatzes rangieren. Fahren beispielweise die beiden grau schattierten Fahrzeuge im oberen linken Teilbild von Bild 2.2 rückwärts, ist der freie Stellplatz – und damit die Rangiermöglichkeit – faktisch um zwei Positionen nach links gewandert. Durch Anheben eines Autos in das OG ist so auch im nahezu vollbesetzten EG eine eingeschränkte Mobilität möglich geworden.

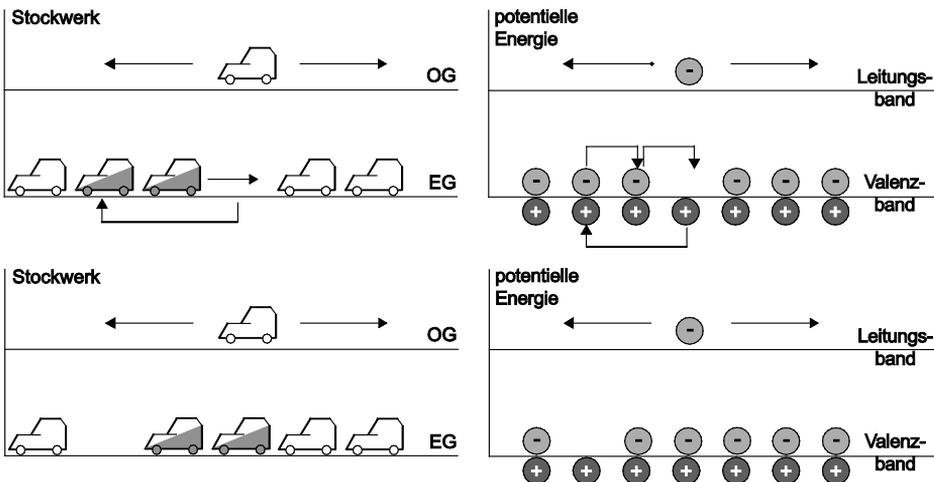


Bild 2.2 Darstellung von Leitungsmechanismen in Halbleiterkristallen; links: Modell eines Parkhauses; rechts: Energiebänder der Festkörperphysik

Diese Erkenntnisse lassen sich auf Halbleiter übertragen. In der Festkörperphysik werden die Stockwerke des Parkhauses durch sogenannte Energiebänder im rechten Teil von Bild 2.1 ersetzt. Je höher ein solches Energieband angeordnet ist, desto größer ist die potentielle Energie der Teilchen, die sich in diesem Energieband befinden.

Das untere Energieniveau wird Valenzband genannt und entspricht dem EG des Parkhauses. Elektronen im Valenzband sind fest mit dem Atomkern verbunden und unbeweglich. Durch Energiezufuhr erhalten einige der Valenzelektronen ausreichend Energie, um in das

nächsthöhere Energieband wechseln zu können. Dieses heißt Leitungsband und entspricht sinnbildlich dem OG des Parkhauses.



Halbleiter sind am absoluten Temperaturnullpunkt Isolatoren. Durch Energiezufuhr werden Elektronen ins Leitungsband gehoben und können sich dort frei bewegen. Gleichzeitig kann auch im Valenzband durch das Wandern der entstandenen Löcher ein Ladungstransport stattfinden.

Bändermodell

Bild 2.3 zeigt im Teilbild a) ein vereinfachtes Energiemodell von Metallen und Halbleitern. Die Energieniveaus der einzelnen Ladungsträger sind diskret und können bestimmten Energiebändern zugeordnet werden. Im Valenzband sind die Ladungsträger in der Modellvorstellung fest an die Atomrümpfe gebunden und unbeweglich. Wird dem Valenzelektron ein entsprechender Energiebetrag E_g zugeführt, so kann es den Atomrumpf verlassen, energetisch in das Leitungsband wechseln und sich dadurch frei im Material bewegen. Der hierfür erforderliche Energiebetrag wird Bandabstand genannt und entspricht dem Energieunterschied von Leitungs- und Valenzband.



Das Bändermodell beschreibt grundlegende Eigenschaften von Halbleitern. Elektronen können nur diejenigen Energieniveaus annehmen, die dem jeweiligen Band zugeordnet sind. Um in das nächsthöhere Energieband zu wechseln, ist eine Energiezufuhr erforderlich, die mindestens dem Abstand der betrachteten Bänder entsprechen muss. Der Bereich zwischen zwei aufeinander folgenden Bändern heißt verbotene Zone. In diesem Bereich kann und darf sich kein Elektron aufhalten.

Bei Metallen (Teilbild b) überlappen sich beide Energiebänder, so dass sich Valenzelektronen praktisch ohne Energiezufuhr von den Atomrümpfen lösen und ins Leitungsband wechseln können. Auf dieser Eigenschaft beruht die gute elektrische Leitfähigkeit von Metallen.

Bei Halbleitern (Teilbilder c) und d)) muss den Valenzelektronen dagegen nennenswerte Energie zugeführt werden, damit sie ins Leitungsband wechseln können und zum Ladungstransport beitragen. Der notwendige Energiebetrag ist durch den materialabhängigen Bandabstand festgelegt und bestimmt wichtige elektrische Eigenschaften des Halbleiters. Bei Silizium hat er den Wert von 1.12 eV.

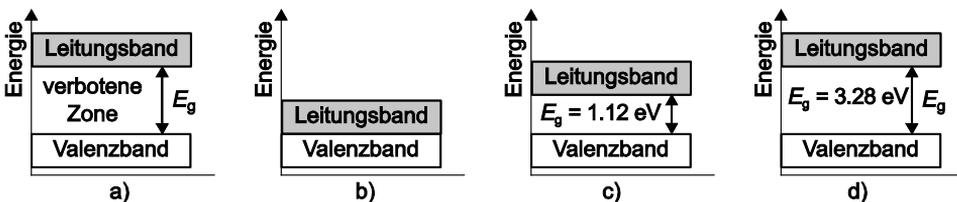


Bild 2.3 Schematische Darstellung des Bändermodells; a) allgemeine Darstellung b) Metalle c) Silizium d) Siliziumkarbid

2.1.1 Eigenleitfähigkeit

Zur mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge werden folgende Größen eingeführt:

n : volumenbezogene Anzahl von Elektronen, die sich im Leitungsband befinden

p : volumenbezogene Anzahl von positiv geladenen Atomrümpfen, die im Valenzband verbleiben

Im thermischen Gleichgewicht ändert sich die Temperatur des Halbleiters nicht mehr, so dass n und p der feste Werte annehmen. Dieser Zustand wird durch den Index 0 gekennzeichnet. In diesem Fall ist die Anzahl der ins Leitungsband angehobenen freien Elektronen n_0 gleich der im Valenzband dadurch freiwerdenden positiv geladenen Atomrümpfe p_0 :

$$n_0 = p_0 = n_i(T) \quad (2.1)$$

Die Anzahl der freien Elektronen-Loch-Paare pro Volumen ist temperaturabhängig. Sie wird Eigenleitungsichte n_i genannt und beträgt für Silizium bei einer Raumtemperatur von 25 °C, also 300 K

$$n_i(T = 300\text{K}) \approx 1.5 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

Innerhalb des Siliziumkristalls befinden sich in einem Elementarwürfel der Kantenlänge 0.543 nm im Mittel 8 Siliziumatome. Daraus lässt sich die Zahl N_{Si} der Si-Atome pro cm^3 bestimmen:

$$N_{\text{Si}} = 8 \cdot \frac{1\text{cm}^3}{[0.543\text{nm}]^3} \approx 5 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

Dividiert man N_{Si} durch die Eigenleitungsichte n_i , so folgt, dass bei Raumtemperatur nur eines von $3.3 \cdot 10^{12}$ Atomen ein Valenzelektron in das Leitungsband entlässt.

$$\frac{N_{\text{Si}}}{n_i} = \frac{5 \cdot 10^{22} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^3}}{1.5 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}} = 3.3 \cdot 10^{12}$$

In einem elektrischen Feld der Feldstärke E bewegt sich ein Ladungsträger mit der mittleren Geschwindigkeit v , die neben der Feldstärke auch vom Halbleitermaterial abhängt. Daher kann eine Ladungsträgerbeweglichkeit μ definiert werden, die von der Ladungsträgerart (Elektron oder Loch) und dem materialspezifischen Kristallgitter abhängt:

$$\mu = \frac{v}{E}$$

Die Beweglichkeit μ_n der Elektronen im Leitungsband ist selbstverständlich höher als die der Löcher im Valenzband. Bei Silizium liegt dieses Verhältnis μ_n/μ_p etwa beim Wert 3.

Im Halbleiterkristall existieren die beiden Leitmechanismen aus Bild 2.2 nebeneinander: Valenzelektronen, die ins Leitungsband aufgestiegen sind, können sich nahezu frei bewegen. Jedes aufsteigende Elektron hinterlässt im Valenzband einen positiv geladenen Atomrumpf. Dieser ist in das Kristallgitter eingebunden und eigentlich ortsfest. Allerdings kann das Valenzelektron eines benachbarten Siliziumatoms *seinen* Atomrumpf verlassen und das bestehende Loch neutralisieren. Das wandernde Elektron hinterlässt seinerseits aber einen positiv geladenen Atomrumpf, so dass das Loch um eine Position weitergewandert erscheint. In rechten Teil von Bild 2.2 ist das Loch an Position 4 im oberen Teilbild auf diese Weise scheinbar auf die Position 2 im unteren Bildteil weitergewandert. In der Festkörperphysik wird der positiv geladene Atomrumpf als Loch bezeichnet, in das ein benachbartes Valenzelektron *springen* kann. Diese Art des Ladungsträgertransportes heißt daher *Löcherleitung*.

Unter Verwendung der bisherigen Definitionen sowie der Elementarladung q kann die Eigenleitfähigkeit σ des Halbleiterkristalls bestimmt werden.

$$\sigma = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \quad \text{mit } [\sigma] = \text{C} \cdot \frac{1}{\text{m}^3} \cdot \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{\text{V}}{\text{m}}} = \frac{\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{V} \cdot \text{s}} = \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{m} \cdot \text{V}} = \frac{\text{A}}{\text{V}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$$

2.1.2 Dotierung

Die technische Anwendbarkeit der Halbleiter beruht nicht auf der Eigen- sondern der Störstellenleitung. Zu diesem Zweck werden gezielt Fremdatome in den bestehenden Halbleiterkristall eingebaut. Dieser Vorgang wird Dotierung genannt und mit zwei unterschiedlichen Gruppen von Atomen durchgeführt:

- Atome mit 5 Valenzelektronen
Phosphor, Arsen und Antimon haben nicht nur 4 sondern 5 Valenzelektronen. Werden sie in einen Siliziumkristall eingebracht (Bild 2.4, links), so ist ihr 5. Valenzelektron nur lose im Kristall gebunden. Schon bei Raumtemperatur erhalten diese Elektronen ausreichend Energie, um ins Leitungsband aufzusteigen. Fremdatome, die einfach Elektronen abgeben können, werden Donatoren genannt. Durch ihren Einbau entsteht ein N-dotierter Halbleiterkristall.
- Atome mit 3 Valenzelektronen
Bor, Gallium, Indium und Aluminium besitzen im Gegensatz dazu lediglich 3 Valenzelektronen. Werden sie in einen Siliziumkristall integriert (Bild 2.4, rechts), bleibt ein Gitterplatz im Gefüge leer. Diese Leerstelle kann leicht durch ein Elektron aus dem Leitungsband gefüllt werden, das die vierte Bindung eingeht. Dreiwertige Atome heißen daher Akzeptoren und bewirken einen P-dotierten Halbleiter.

Die Dotierungsdichte N von Donatoren und Akzeptoren ist sehr viel höher als die Eigenleitungsdichte n_i und wird durch die Indizes D und A gekennzeichnet.

- N_D : Dotierungsdichte eines N-dotierten Halbleiters; der Halbleiter hat einen Überschuss von $n = N_D$ freien Elektronen pro Volumeneinheit
- N_A : Dotierungsdichte eines P-dotierten Halbleiters; der Halbleiter hat einen Überschuss von $p = N_A$ freien Löchern pro Volumeneinheit

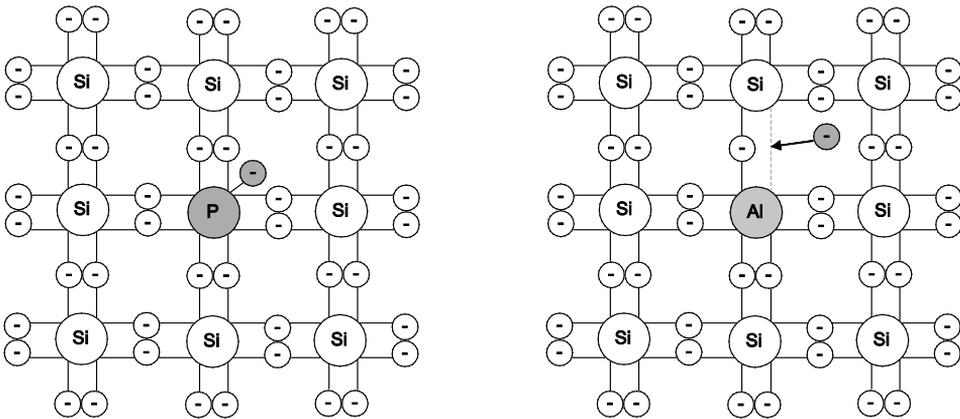


Bild 2.4 Schematische Darstellung der Dotierung eines Siliziumkristalls; links: N-dotiert mit Phosphor als Donator; rechts: P-dotiert mit Aluminium als Akzeptor

Mit ihrer Hilfe kann die Leitfähigkeit des dotierten Materials sehr genau eingestellt werden. Auch für dotierte Halbleiter gilt Gl. (2.1), nach der das Produkt aus Elektronen- und Löcherdichte gleich dem Quadrat der Eigenleitungsichte n_i ist.

$$n \cdot p = n_i^2(T) \quad (2.2)$$

Dadurch ergibt sich ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen Löcher- und Elektronenkonzentration: Wird die Elektronenkonzentration durch Dotierung um den Faktor 10^7 erhöht, so sinkt die Löcherdichte im N-dotierten Material gleichzeitig um 10^7 ab.

In N-dotierten Halbleitern ist die Elektronenkonzentration sehr viel größer als die der Löcher. Daher werden Elektronen bei N-Dotierung Majoritätsträger genannt. Löcher werden als Minoritätsträger bezeichnet. Bei P-Dotierung kehren sich die Verhältnisse um: Löcher sind jetzt Majoritäts- und Elektronen Minoritätsträger.



Beispiel 2.2 Bestimmung der Löcherkonzentration

Bei Raumtemperatur hat ein N-dotierter Siliziumkristall eine Eigenleitungsichte $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Die Dotierungsdichte beträgt $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Bestimmen Sie Majoritäts- und Minoritätsträger. Wie groß wird die Löcherdichte?

Lösung:

Der Kristall ist N-dotiert, daher sind Elektronen Majoritäts- und Löcher Minoritätsträger. Mit den gegebenen Zahlenwerten und Gl. (2.2) erhält man für die Löcherkonzentration p :

$$n = N_D \Rightarrow N_D \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{[10^{10} \text{ cm}^{-3}]^2}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} = \underline{\underline{10^4 \text{ cm}^{-3}}}$$

2.1.3 Feld- und Diffusionsstrom

In Abschnitt 2.1.1 wurde erläutert, dass der Ladungstransport innerhalb von Halbleitern durch Elektronen *und* Löcher gleichzeitig erfolgt und damit *zwei* Mechanismen der Ladungsträgerbewegung existieren. Für die tatsächliche Bewegung von Ladungsträgern und damit für einen Stromfluss sorgen zwei Leitungsmechanismen.

- Aus der klassischen Elektrotechnik ist bekannt, dass ein Stromfluss zwischen zwei leitend miteinander verbundenen Punkten dann einsetzt, wenn ein Potentialunterschied – also eine elektrische Spannung – zwischen diesen Punkten vorliegt. Ist dies der Fall, so besteht ein elektrisches Feld zwischen den beiden Punkten. Nach dem ohmschen Gesetz wird die Höhe des fließenden Stromes von der Potentialdifferenz der beiden Punkte, also der elektrischen Feldstärke E und vom Leiterwiderstand beeinflusst. Dieser Strom wird Feld- oder Driftstrom genannt.
- Ändert sich die Ladungsträgerkonzentration ortsabhängig innerhalb des Halbleiters, so setzt ein Diffusionsvorgang ein, der den Ausgleich des Konzentrationsunterschiedes zum Ziel hat. Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes im Halbleiter kommt ebenfalls ein Stromfluss zustande, der als Diffusionsstrom bezeichnet wird.

2.1.4 Kombination von P- und N-dotierten Halbleitern zum PN-Übergang

Werden P- und N-dotierte Halbleiter miteinander kombiniert, entstehen sogenannte PN-Übergänge. Im Folgenden werden die grundsätzlichen Eigenschaften eines PN-Übergangs mit weitgehenden Vereinfachungen erläutert, so dass anhand von Bild 2.5 die grundlegenden Effekte verstanden werden können. Vertiefende analytische Betrachtungen zu den Vorgängen bei PN-Übergängen sind in [Schröder06], [Semikron98], [Semikron10] und [Semikron11] zu finden.

Es werden keine räumlichen Ausbreitungsvorgänge betrachtet, sondern lediglich Effekte entlang der Ortskoordinate x . Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wird ebenfalls unterstellt, dass der Halbleiterkristall im n- und p-Bereich homogen dotiert ist und der Übergang zwischen P- und N-dotiertem Material bei der Ortskoordinate $x = 0$ abrupt erfolgt. In Bild 2.5 sind drei verschiedene Fälle wiedergegeben:

1. PN-Übergang (I) im stromlosen Zustand
2. PN-Übergang in Durchlassrichtung beschaltet (II)
3. PN-Übergang in Sperrrichtung beschaltet (III)

Jeder der betrachteten Fälle ist in die Einzelheiten a) bis d) unterteilt:

- Schematische Darstellung der P- und N- dotierten Gebiete sowie der Raumladungszone
- Verlauf der Raumladungsdichte $\rho(x)$ über der Ortskoordinate x
- Verlauf der elektrischen Feldstärke $E(x)$ entlang der Ortskoordinate x
- Verlauf des elektrischen Potentials $\phi(x)$ entlang der Ortskoordinate x

Index

A

- abschaltbare Thyristoren 75
- Abwärtswandler 185
- aktiver Bereich 72f.
- Ansteuerleistung 71
- Ansteuerschaltungen
 - beschleunigtes Abschalten 234
 - CMOS-Gatter 233
 - Gegentaktstufe 234
 - Grundlagen 231
 - High-Side-Treiber 235
 - Impulsübertrager 236
 - Treiber-IC 235
- Ansteuerstufen 232
- Applet
 - B2C-Schaltung 169
 - B6C-Schaltung 166, 168
 - charakteristische Zeitverläufe 21 f., 24 f., 28
 - dreiphasiger Wechselrichter 287
 - dreiphasiger Wechselrichter mit Raumzeiger 290
 - Dreipunkt-Halbbrücken-Wechselrichter 315
 - einphasiger WR 270
 - Fourier-Synthese 32
 - hartes Schalten 78
 - Hochsetzsteller 202
 - Kommutierung 151
 - M3-Schaltung 144, 177
 - PWM mit modifizierten Steuer-
spannungen 298
 - Raumzeigerverfahren 296
 - sinusförmige PWM 262
 - Tiefsetzsteller 187, 198
 - Tiefsetzsteller mit ZCS 363
 - Tiefsetzsteller mit ZVS 369

- Turn-Off-Snubber 86
- Turn-On-Snubber 86
- Vollbrücke 215, 219, 226 f.
- VQS-GM 223
- Wechselstromsteller 32, 35 f.
- Arbeitspunkt 73
- arithmetischer Mittelwert 16
- Ausgangskennlinienfeld 72
- Ausschaltenergie 92
- Ausschaltverluste 73
- Aussteuergrad 264 ff., 268, 271, 284 f., 289, 305

B

- B2C 168, 171
 - Mittelwert 170
 - Ventilspannung 170
 - Welligkeit 170
- B6C 164, 171
 - Mittelwert 165 f.
 - Welligkeit 165 f.
- Bahnwiderstand 89
- Basisstrom 70
- Betriebsquadranten
 - bei Stromrichtern 38
- Bipolar-Transistor 70, 72, 240
 - Kennlinien 70
 - mit isoliertem Steueranschluss 71
 - Schaltbedingungen 71
 - Schaltverhalten 71
 - Schaltzeichen 70
- Blindleistung 30, 32 ff., 163
- boost converter 201
- Brückenschaltung 163, 168
- Buck Converter 185

D

- Diode 60, 62
 - Datenblattangaben 64
 - Durchlassverluste 88
 - Ersatzschaltbild 62, 87
 - ideales Schaltverhalten 62
 - Kennlinien 61
 - reales Schaltverhalten 63
 - Schaltbedingung 62
 - Schaltverluste 91
 - Schaltzeichen 61
 - Verlustleistung 61
 - verschiedene Typen von Dioden 63
- Drehstrombrückenschaltung 164
- Durchlassspannung 58, 61, 63, 65, 71
- Durchlassverluste 59, 61, 69, 71, 73, 86 f.

E

- Effektivwert 16, 19, 39 ff., 144
 - Abschätzung 27
 - Berechnung 21
 - RMS 19
 - überschlägige Berechnung 24
- einphasiger Wechselrichter
 - Ausgangsspannung 259
- Einraststrom 66
- Einschaltverluste 73, 92
- entlastetes Schalten 83
- Ersatzschaltbild
 - für Mittelwerte 158
 - Kühlkörper 93
 - Schaltzustände beim dreiphasigen Wechselrichter 276
- Erwärmung 86

F

- Formfaktor 22, 24
- Fourier 31, 36, 256
 - Zerlegung 32
- Freilaufdiode 198, 204
- Frequenzverhältnis 264 ff., 268 ff., 286, 289, 304, 307

G

- Gate-Emitter-Spannung 73
- Gate-Source-Kapazität 68
- Gatestrom 65
- Gate-Turn-Off-Thyristor 75
- Gesamteffektivwert 22
- Gesamtverlustleistung 98
- Glättungsdrossel 130
- Glättungszeitkonstante 131
- Gleichgröße 16
- Gleichrichter
 - als Einspeisung für Tiefsetzsteller 184
 - bei Zwischenkreisumrichter 252
 - M1 118
 - Toleranz der Netzspannung 197
 - vollgesteuert 175
 - Wechselanteil 23
- Gleichspannungs-Zwischenkreis 252
- Gleichstromsteller 182
 - Anwendungen 183
- Grundfrequenztaktung 256
- GTO 60, 75, 183, 270

H

- Haltestrom 65 f.
- Helligkeitssteuerung
 - mit Stromrichter 13
 - mit Vorwiderstand 13
- Hochsetzsteller 198 ff., 204
 - Lückbetrieb 202
 - Schaltbild 199
 - Zeitverläufe 200

I

- ideale Stromglättung 130
- ideelle Gleichspannung 122
- IGBT 71 f., 183, 231, 240
 - Berechnung der Verluste 92
 - Datenblattangaben 72
 - Durchlassverluste 90
 - Kennlinien 72
 - Schaltbedingungen 72
 - Schaltverhalten 73
 - Schaltverluste 91

- Schaltzeichen 72
- SOA-Diagramm 74
- Verlustberechnung 115
- Verluste 89
- IGCT 60, 75, 183
- Integrated-Gate-Commutated-Thyristor 75
- Inversdiode 69

K

- Klirrfaktor 22f.
- Kommutierung 149, 152
 - bei M3C 155
 - Berechnung der Spannungsänderung 155
 - Ersatzschaltbild 150
 - fremdgeführter Stromrichter 182
 - selbstgeführter Stromrichter 183
 - Spannungsabfall bei Kommutierung 156
 - Spannungsabfall durch Kommutierung 153
 - Ventilstromverlauf 152
 - Wechselrichtergerenze 156
- Kommutierungsinduktivität 156
- kritische Spannungssteilheit 66
- Kühlkörper 93f., 96
- Kühlung 86, 92

L

- Leistung
 - beim Wechselstromsteller 34f.
- Leistungsbilanz 29
- Leistungsfaktor 31
 - bei sinusförmigen Größen 29
- Leistungshalbleiter 60, 86
- Lückbetrieb
 - Hochsetzsteller 203
 - Tiefsetzsteller 193, 195
- Lückgrenze
 - Hochsetzsteller 202
 - Tiefsetzsteller 196

M

- M1 118, 171
 - Welligkeit 123
- M1C 121
- M1U 119
- M2 124, 171
 - arithmetischer Mittelwert 128
 - Mittelwert 127
 - natürlicher Zündzeitpunkt 125
 - Teilaussteuerung 127
 - Vollaussteuerung 126
 - Welligkeit 127
- M3 133, 164, 171
 - arithmetischer Mittelwert 135
 - mit verbundenen Anoden 159
 - Strangströme 142
 - Teilaussteuerung 139
 - Ventilspannung 137f.
 - Ventilströme 142
 - Vollaussteuerung 135
 - Welligkeit 136
- Mischgröße 16
- Mittelpunktschaltung
 - M1 118
 - M2, M2C 124
 - M3, M3C 133
- Mittelwert 16f., 32, 36, 40f., 87, 120f., 185, 194, 216, 219, 222
 - Abschätzung 27
 - Berechnung 21
 - Berechnung durch Treppenfunktion 17
 - exakte Berechnung 18
 - überschlägige Berechnung 24
- MOSFET 67, 72, 182, 185, 187, 240
 - Ansteuerschaltungen 231
 - Ausschalten 68
 - Datenblattangaben 69
 - Durchlassverluste 89
 - Durchlasswiderstand 69
 - Einschalten 67
 - Kennlinie 68
 - Schaltbedingungen 69
 - Schaltverluste 91
 - Schaltzeichen 68
 - selbstleitend 67
 - selbstsperrend 67

N

natürlicher Zündzeitpunkt 121, 125
 netzgeführte Stromrichter 182
 N-Kanal-FET 69
 N-Kanal-MOSFET 69, 113, 232, 235, 240
 N-Kanal-MOS-Transistoren 231
 NPN 182
 NPN-Transistor 70 f.

O

Oberschwingung 23, 32 ff., 36, 188, 254,
 256, 259, 304
 - Grundfrequenztaktung 260, 279
 - Unterschwingungsverfahren 286
 - Zeitverläufe 257
 Ordnungszahl 32, 257, 259, 268, 279,
 286, 289, 304

P

P-Kanal-MOSFET 70, 89, 113
 PNP 182
 Pulsamplitudenmodulation 261, 305
 Pulsweitenmodulation 187, 216, 233,
 261 ff., 284, 305
 - bipolar 258
 - bipolar, zwei Spannungsniveaus 217 ff.,
 227
 - Steuerbereiche 272
 - synchronisiert 269
 - unipolar, drei Spannungsniveaus
 220 ff., 225, 229
 - unsynchronisiert 270
 - Unterschwingungsverfahren 264, 267
 PWM2 217
 PWM3 222, 229

R

Raumzeiger 289
 Rückstromspitze 79 f.

S

Sägezahnspannung 185, 187

Sättigungsbereich 72 f.
 Schaltbetrieb 15
 Schalter 14, 65, 119, 182 f., 198, 204,
 206 f., 211, 220
 - aktiv 60
 - Eigenschaften von realen Schaltern 59
 - eingeschaltet 214
 - gesperrt 57
 - ideal 56
 - leitend 57
 - öffnen 57
 - passiv 60
 - real 56, 58
 - Schaltvorgang idealer Schalter 58
 - Schaltvorgang realer Schalter 59
 - schließen 57
 - Steuersignal 57
 - stromführend 214
 Schaltfrequenz 187
 - idealer Schalter 57
 Schalthandlung 57
 Schaltleistung 75
 Schaltverluste 59, 86, 89, 91, 231
 Schaltvorgang 57
 Scheitelwert 16, 36, 76, 261
 Schleusenspannung 61 f., 64, 66, 231
 selbstgeführte Stromrichter 182
 selbstsperrend 69 f., 113
 SOA-Diagramm 73 f.
 Spannungsbelastbarkeit 76
 Spannungsspitze 80
 Speicherladung 79
 Speicherzeit 79
 Sperrschicht 92, 96
 Sperrschichttemperatur 60, 66, 69, 74,
 86, 92, 96 f., 117
 Sperrspannung 59, 63 f., 66, 76
 Sperrstrom 58, 61
 Sperrverluste 59, 86
 Sperrwandler 200 f.
 Step-Down Converter 185
 steuerbare Stromrichter 119
 Steuerblindleistung 34, 37
 Steuergesetz 121
 Steuerimpuls 75
 Steuerkreis 60

Steuersignal 60
 Steuerverluste 59, 86
 Steuerwinkel 121
 Stromabriss 79
 stromgesteuertes Bauelement 71
 Stromglättung 128
 Stromgrundschwingung 33
 Stromrichter 182
 Stromwärmeverluste 89
 Stromwelligkeit 128

T

Tastgrad 195, 203
 THD 23, 43
 Thyristor 60, 64 ff., 75, 135
 - Abschalten 65
 - Abschaltvorgang 79
 - Blockieren 65
 - Datenblattangaben 66
 - Durchlassverluste 88
 - Ersatzschaltbild beim Abschaltvorgang 79
 - kontrolliertes Zünden 65
 - Leiten 65
 - Schaltbedingungen 66
 - Schaltzeichen 64
 - Sperren 64
 - Sperrspannung 64
 - unkontrolliertes Zünden 65
 - Verlustleistung 88
 Tiefpassfilter 189
 Tiefsetzsteller 57, 185, 300
 - Ausgangsspannung 194
 - Berechnung der Stromwelligkeit 190
 - grundlegende Zeitverläufe 186
 - Grundschtaltung 185
 - Kennlinien 196 f.
 - Lückbetrieb 193 f.
 - Lückbetrieb bei konstanter Ausgangsspannung 197
 - Lückbetrieb bei konstanter Eingangsspannung 195
 - realer Aufbau 187
 - Stromwelligkeit 189
 Trägerspeichereffekt 79
 Transformatorbauleistung 161

Transistor 60, 66 f., 182
 - Durchlassverluste 89
 - Gemeinsamkeiten der versch. Typen 72
 - sicherer Arbeitsbereich 73
 - Verluste 89
 Treiberschaltungen 232
 TSE-Beschaltung 79

U

Überlappung 152
 Überspannungsschutz 76 f.
 Umgebungstemperatur 96
 Umkehrstromrichter 171, 308
 - mit B6C 171
 Umrichten von Wechselstrom 252
 Umrichter 252
 Umschaltverluste 183
 Unterschwingungsverfahren 263, 265, 267, 271
 - dreiphasiger Wechselrichter 282
 - linearer Steuerbereich 284
 - Oberschwingungen 266
 - Spektren 268
 - synchronisierte Taktung 268
 - unsynchronisierte Taktung 270
 - Vierquadrantensteller 261

V

Ventilspannung 125, 138
 Verluste 15, 29, 56, 60, 299
 Verschiebungsblindleistung 34
 Verzerrungsblindleistung 34 ff.
 Vierquadrantensteller 213
 - einphasiger Wechselrichter 258
 Vollaussteuerung 122
 Vollbrücke 212

W

Wärmetransport 92
 Wärmewiderstand 93, 96, 116
 Wechselanteil 122
 Wechselgröße 16
 Wechselrichter
 - Bremsbetrieb 299

- dreiphasig 273
- dreiphasig mit Grundfrequenztaktung 275
- einphasig 255
- Ersatzschaltbild 277
- Grundfrequenztaktung 261
- linearer Steuerbereich 268
- mit einer Halbbrücke 255
- mit Vierquadrantensteller 258
- Photovoltaikmodul 254
- Pulsweitenmodulation 283
- spannungseinprägend 252
- Spektren 285
- Steuerbereich 289
- synchronisierte Taktung 286
- unterbrechungsfreie Stromversorgung 254
- Unterschwingungsverfahren 261
- Vollbrücke 213

- Zerhacken einer Gleichspannung 253
- Zusatzkomponenten 300
- Wechselrichterbetrieb 147
 - bei netzgeführtem Stromrichter 172
- Wechselrichtergrenze 156
- Welligkeit 22 f.

Z

- Zündimpuls 66
- Zündwinkel 121, 123
- Zweiquadrantensteller
 - mit Spannungsumkehr 206
 - mit Stromumkehr 204
 - synchrone Taktung 207
 - Taktung eines Transistors 211
 - zeitlich versetzte Taktung 208
- Zwischenkreisumrichter 252
 - mit eingepprägter Spannung 253