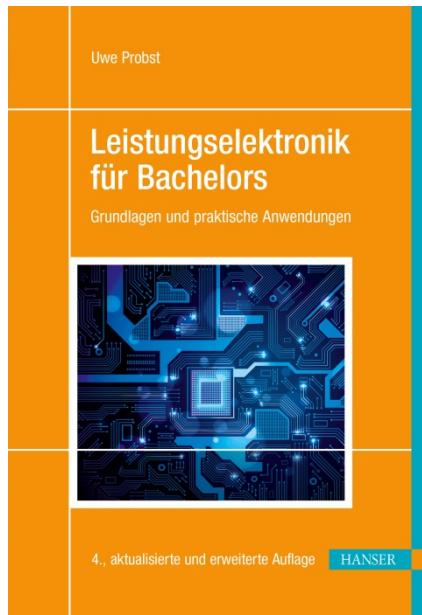


# HANSER



## Leseprobe

zu

**„Leistungselektronik für Bachelors“**  
von Uwe Probst

ISBN (Buch): 978-3-446-46317-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-46366-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446463172>  
sowie im Buchhandel

# Vorwort zur 4. 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 in Kapitel 1 vorgestellt. Das Kapitel 2 ist den Leistungshalbleitern gewidmet. Dieser Abschnitt wurde um neue Halbleitermaterialien (SiC, GaN) erweitert. Hinzugekommen ist auch eine eingehende Beschreibung des IGBT-Leistungstransistors sowie des GaN-HEMT Bauelements. 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. Mehrpunktumrichtern ist das Kapitel 6 gewidmet. Die Grundlagen des weichen Schaltens unter Nutzung von Resonanzkreisen finden sich in Kapitel 7.

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 deckt nahezu alle besprochenen Schaltungen 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 Schaltungszweige und erleichtern so das Verständnis ihrer Funktionsweise.

Studierende mit Migrationshintergrund bereichern das Hochschulleben. Daher wurden die virtuellen Labore, über die 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. Sie 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 meinem Lektor Frank Katzenmayer für die unkomplizierte Kommunikation und das sorgfältige Korrigieren der neuen Manuskriptteile sowie allen an dieser Arbeit beteiligten Studierenden und Mitarbeitern der Technischen Hochschule Mittelhessen. Schließlich gebührt ein besonderer Dank meiner Familie, die die Arbeit immer unterstützt hat.

Gießen, im Januar 2020

Uwe Probst

URL der Internetseite mit den Applets zum Buch:  
(<https://homepages.thm.de/~hg13555/Datenbank/lei/index.php/de/>)

URL der Internetseite mit Applets zu Modulationsverfahren und Antrieben:  
(<https://homepages.thm.de/~hg13555/Datenbank/aat/index.php/de/>)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung in die Leistungselektronik .....</b>	<b>13</b>
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
<b>2</b>	<b>Leistungshalbleiter .....</b>	<b>44</b>
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 .....	54
2.1.5	PiN-Übergang .....	54
2.2	Neue Halbleitermaterialien .....	56
2.2.1	Halbleiter mit großem Bandabstand .....	56
2.2.2	Anwendungsgebiete .....	57
2.3	Vergleich von idealen und realen Schaltern .....	58
2.4	Diode .....	62
2.5	Thyristor .....	65

---

2.6	Transistoren .....	68
2.6.1	MOSFET (Unipolar-Transistor) .....	68
2.6.2	Bipolar-Transistor .....	73
2.6.3	IGBT .....	74
2.6.4	Parasitäre Elemente .....	80
2.6.5	Schaltverhalten .....	84
2.6.6	Latch-Up .....	88
2.6.7	Ersatzschaltbild .....	88
2.6.8	Gemeinsamkeiten von Transistoren .....	89
2.7	GaN-Transistoren .....	92
2.8	Abschaltbare Thyristoren .....	95
2.8.1	Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO) .....	95
2.8.2	Integrated-Gate-Commutated-Thyristor (IGCT) .....	96
2.9	Schutz von Leistungshalbleitern .....	96
2.9.1	Spannungsbelastbarkeit .....	97
2.9.2	Überspannungsschutz .....	98
2.9.3	Schutz gegen Überstrom und Kurzschluss .....	103
2.9.4	Ein- und Ausschaltentlastung bei Transistoren .....	104
2.10	Erwärmung und Kühlung von Leistungshalbleitern .....	107
2.10.1	Durchlassverluste bei Thyristoren und Dioden .....	108
2.10.2	Verluste bei Transistoren .....	110
2.10.2.1	Durchlassverluste .....	110
2.10.2.2	Schaltverluste .....	112
2.10.3	Wärmetransport und Auslegung der Kühlung .....	113
2.11	Datenblattangaben für Dioden und Transistoren .....	119
2.11.1	Verwendete Kurzzeichen und Indizes in Datenblättern .....	119
2.11.2	Angabe von Kenndaten und Grenzwerten .....	121
2.11.3	Gleichrichterdioden .....	122
2.11.3.1	Grenzwerte (Absolute maximum ratings) .....	122
2.11.3.2	Kenndaten (Characteristics) .....	124
2.11.4	Thyristoren .....	125
2.11.4.1	Grenzwerte .....	126
2.11.4.2	Kenndaten .....	126
2.11.5	Transistormodule .....	128
2.11.5.1	Grenzwerte für Transistor-Module .....	129
2.11.5.2	Kenndaten .....	130
2.12	Lösungen .....	134

### 3 Stromrichterschaltungen mit Dioden und Thyristoren ..... 139

3.1	Einpuls-Gleichrichter M1 .....	139
3.1.1	Aufbau der Schaltung .....	139
3.1.2	Funktionsweise der ungesteuerten M1U-Schaltung .....	140
3.1.3	Funktionsweise der gesteuerten M1C-Schaltung .....	142
3.2	Zweiphasige Mittelpunktschaltung M2 .....	145
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise .....	145
3.2.2	Stromglättung .....	149
3.2.3	Steuergesetz im nicht lückenden Betrieb .....	153

---

3.3	Dreiphasige Mittelpunktschaltung M3 .....	154
3.3.1	M3-Schaltung bei ohmscher Last .....	154
3.3.1.1	Steuergesetz im nicht lückenden Betrieb .....	160
3.3.1.2	Steuergesetz im Lückbetrieb .....	161
3.3.2	M3-Schaltung bei idealer Glättung .....	162
3.3.3	Glättungsdrossel .....	166
3.3.4	Wechselrichterbetrieb .....	168
3.3.5	Auswirkung und Berechnung der Kommutierung .....	170
3.3.5.1	Kommutierung bei netzgeführten Stromrichtern .....	170
3.3.5.2	Auswirkung der Überlappung .....	174
3.3.5.3	Wechselrichtergrenze .....	177
3.3.5.4	Gleichspannungsersatzschaltbild für Mittelwerte .....	178
3.3.6	Mittelpunktschaltungen mit verbundenen Anoden .....	180
3.3.7	Netzströme und Transformatormauleistung .....	182
3.4	Brückenschaltungen netzgeführter Stromrichter .....	184
3.4.1	Vollgesteuerte Drehstrombrückenschaltung B6C .....	185
3.4.2	Brückenschaltung B2C .....	189
3.5	Umkehrstromrichter .....	192
3.6	Lösungen .....	195

## 4 Gleichstromsteller ..... 203

4.1	Einführung .....	203
4.2	Tiefsetzsteller .....	206
4.2.1	Grundschaltung .....	206
4.2.2	Realer Tiefsetzsteller .....	208
4.2.3	Dimensionierung des LC-Filters .....	209
4.2.4	Stromwelligkeit .....	210
4.2.5	Betrieb mit lückendem Strom .....	214
4.3	Hochsetzsteller .....	219
4.3.1	Grundlegende Arbeitsweise .....	219
4.3.2	Betrieb mit lückendem Strom .....	223
4.4	Mehrquadrantensteller .....	224
4.4.1	Zweiquadrantensteller mit Stromumkehr .....	225
4.4.2	Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr .....	227
4.5	Vollbrücke .....	233
4.5.1	Allgemeine Einführung .....	234
4.5.2	Pulsweitenmodulation .....	237
4.5.2.1	Pulsweitenmodulation mit zwei Spannungsniveaus (PWM2) .....	238
4.5.2.2	PWM mit drei Spannungsniveaus (PWM3) .....	241
4.6	Ansteuerschaltungen für MOS-Transistoren .....	251
4.6.1	Grundlagen .....	251
4.6.2	CMOS-Gatter .....	253
4.6.3	Gegentaktstufe .....	254
4.6.4	Beschleunigtes Abschalten .....	254
4.6.5	Treiber-ICs .....	255
4.6.6	Potenzialfreie Ansteuerung mit Impulsübertrager .....	256
4.7	Lösungen .....	260

---

<b>5</b>	<b>Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis .....</b>	<b>272</b>
5.1	Einführung .....	272
5.2	Einphasige spannungseinprägende Wechselrichter .....	275
5.2.1	Halbbrücke mit Grundfrequenztaktung .....	275
5.2.2	Vierquadrantensteller mit Grundfrequenztaktung .....	278
5.2.3	Steuerverfahren zur Verstellung von Frequenz und Amplitude ..	281
5.2.3.1	Pulsamplitudenmodulation .....	281
5.2.3.2	Vierquadrantensteller mit Unterschwingungsverfahren .....	281
5.2.4	Anwendungen .....	293
5.3	Dreiphasiger spannungseinprägender Wechselrichter .....	293
5.3.1	Grundlegender Aufbau und Steuerverfahren .....	293
5.3.1.1	Grundfrequenztaktung .....	294
5.3.1.2	Unterschwingungsverfahren .....	302
5.3.1.3	Raumzeigermodulation .....	309
5.3.1.4	Weitere Steuerverfahren .....	316
5.3.1.5	Flattop-Verfahren .....	318
5.3.2	Ergänzende Komponenten .....	319
5.4	Einsatzgebiete und Anwendungen .....	320
5.4.1	Elektronische Antriebstechnik .....	321
5.4.2	Netzeinspeisung regenerativ erzeugter Energien .....	322
5.5	Lösungen .....	324
<b>6</b>	<b>Mehrpunkt-Wechselrichter .....</b>	<b>329</b>
6.1	Grundlagen und Schaltungsvarianten .....	329
6.2	Dreipunkt-Wechselrichter .....	333
6.2.1	Einphasiger Dreipunkt-Halbbrücken-Wechselrichter .....	334
6.2.1.1	Pulsweitenmodulation der Dreipunkt-Halbbrücke .....	338
6.2.1.2	Steuergesetz und Ausgangsspannung .....	342
6.2.1.3	Spannungs- und Stromverläufe bei der PWM .....	342
6.2.1.4	Bedeutung der Klemmdiode .....	343
6.2.2	Dreiphasiger Dreipunkt-Wechselrichter .....	344
6.2.2.1	Schaltzustände und Ausgangsspannungen .....	345
6.2.2.2	Spannungsraumzeiger .....	349
6.2.2.3	Modulationsverfahren und Steuergesetz .....	353
6.2.2.4	Auswirkung von Verriegelungszeiten auf die Ausgangsspannung .....	354
6.3	Lösungen .....	358
<b>7</b>	<b>Resonantes Schalten .....</b>	<b>363</b>
7.1	Motivation .....	363
7.2	Grundlegende Analyse von LC-Kreisen .....	366
7.3	Grundstrukturen für weiches Schalten .....	375
7.4	Tiefsetzsteller mit ZCS .....	379
7.5	Tiefsetzsteller mit ZVS .....	386
7.6	Lösungen .....	390

<b>A1</b>	<b>Fachbegriffe Deutsch-Englisch/Englisch-Deutsch .....</b>	<b>393</b>
<b>A2</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>400</b>
<b>A3</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>404</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>407</b>
	<b>Index .....</b>	<b>409</b>

# 1

## Einführung in die Leistungselektronik

### ■ 1.1 Grundlagen

#### Lernziele

Die Lernenden ...

- unterscheiden die Begriffe schalten, steuern, umrichten, gleichrichten,
- begründen die Vorteile des Schaltbetriebs,
- kennen die unterschiedlichen Einsatzgebiete der Leistungselektronik.

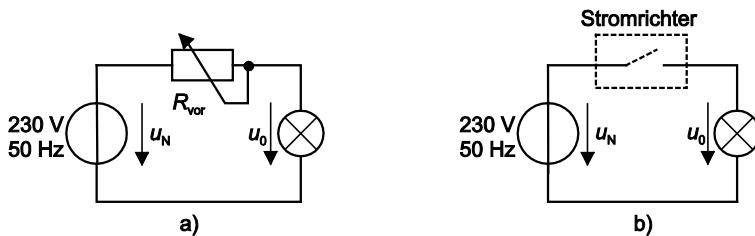
Die Leistungselektronik ist ein wesentliches Teilgebiet der Automatisierungstechnik. Zudem findet man sie in vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens. Moderne Traktionsanwendungen (U-Bahnen, Straßenbahnen, ICE), einfache drehzahlregelbare elektrische Bohrmaschinen, Computernetzteile oder der Dimmer zur Helligkeitssteuerung von Glühbirnen basieren auf leistungselektronischen Schaltungen. Zunehmend mehr Haushaltsgeräte (Waschmaschinen, Kühlschränke, Geschirrspüler) werden zur Verbesserung ihres Wirkungsgrades mit Motoren ausgestattet, deren Drehzahl über Stromrichter energieeffizient gesteuert werden kann.

Gegenwärtig beträgt der Anteil der elektrischen Energie am Gesamtenergieverbrauch etwa 40 %, wird aber bis 2040 auf 60 % anwachsen. Gleichzeitig wird der Anteil der elektrischen Energie, die über leistungselektronische Schaltungen gesteuert wird, von 40 % im Jahr 2000 auf 80 % im Jahr 2015 ansteigen. Damit entwickelt sich die Leistungselektronik zu einer der Schlüsseltechnologien der kommenden Jahre.

Leistungselektronische Schaltungen werden eingesetzt, um möglichst verlustarm elektrische Energie einer Spannungsebene in elektrische Energie mit einer anderen Spannung umzuwandeln.

Am Beispiel der Helligkeitssteuerung einer Glühlampe wird dies deutlich: Sie leuchtet umso heller, je größer der Strom ist, der durch den Glühdraht fließt. Um die Höhe des Stromes und damit die Leuchtstärke der Lampe zu beeinflussen, muss die Spannung, mit der die Lampe versorgt wird, geändert werden können.

Bild 1.1 zeigt dafür prinzipiell verschiedene Möglichkeiten auf. Im Teilbild a) wird ein einstellbarer Vorwiderstand verwendet. Je nach Stellung des Schleifers fällt am Vorwiderstand ein mehr oder weniger großer Teil der Netzspannung ab. Die Spannung  $u_0$  an der Lampe ist um diesen Betrag kleiner als die Netzzspannung. Somit kann durch Verändern der Schleiferstellung die Größe der Spannung  $u_0$  gesteuert werden.



**Bild 1.1** Helligkeitssteuerung einer Glühlampe a) mit Vorwiderstand b) mit Schaltbetrieb (Dimmen)

$$u_0 = \frac{R_{\text{Glühlampe}}}{R_{\text{Vor}} + R_{\text{Glühlampe}}} \cdot u_N$$

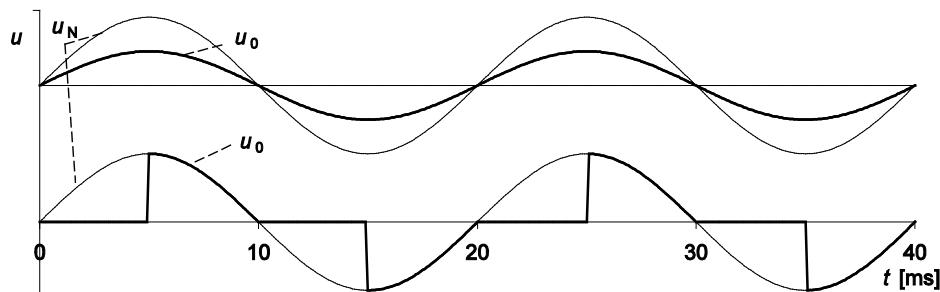
Unabhängig von der Stellung des Schleifers fließt hierbei immer Strom durch Lampe und Vorwiderstand. Diese Art der Helligkeitssteuerung ist nicht optimal, weil der Spannungsabfall am Vorwiderstand in Verbindung mit dem fließenden Strom in Wärme umgesetzt wird und somit Energie nutzlos verloren geht.

In Bild 1.1 b) wird statt des Vorwiderstandes als einfachste Variante eines Stromrichters ein elektronischer Schalter verwendet. Ist der Schalter geschlossen, so liegt die Netzspannung an der Lampe. Ist der Schalter geöffnet, dann ist die Spannung an der Lampe null und es fließt kein Strom. Diese Betriebsart heißt Schaltbetrieb.

$$\text{Schalter ein: } u_0 = u_N \quad \text{Schalter aus: } u_0 = 0$$

Die grundlegenden Unterschiede zwischen beiden Betriebsarten werden in den Zeitverläufen in Bild 1.2 deutlich. Ist der Widerstandswert des Vorwiderstandes gleich dem der Lampe, so erhält man für  $u_0(t)$  den oberen Zeitverlauf. Wird der Schalter 5 ms nach jedem Nulldurchgang der Netzspannung bis zum nächsten Spannungsnulldurchgang geschlossen und danach wieder geöffnet, ergibt sich für die Spannung  $u_0(t)$  an der Lampe der unten dargestellte Zeitverlauf.

Beide Zeitverläufe führen zu unterschiedlichen Helligkeiten der Lampe im Vergleich zum Betrieb mit voller Netzspannung. Anstatt mit Vorwiderstand kann die Helligkeit beim Schaltbetrieb ebenso durch Verändern der Einschaltzeitdauer des Schalters relativ zur Periodendauer der Netzspannung gesteuert werden.

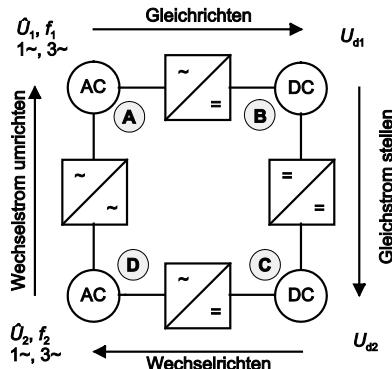


**Bild 1.2** Zeitverläufe von  $u_0(t)$ : oben mit Vorwiderstand; unten mit Schaltbetrieb

Dadurch fließt beim Schaltbetrieb aber nur zeitweise Strom; der Vorwiderstand und die damit verbundenen Verluste entfallen. An diesem einfachen Beispiel wird bereits deutlich, wie wichtig der Schaltbetrieb für die Leistungselektronik ist. Auch wenn der Schalter zunächst idealisierend als verlustfrei angesehen wird, erhält man als qualitatives Ergebnis dieser einführenden Betrachtung:



Durch den *Schaltbetrieb* (switching mode) bleiben die Verluste in Stromrichtern gering. Die erreichbaren Wirkungsgrade sind sehr hoch.



**Bild 1.3** Anwendungsgebiete der Leistungselektronik

Bild 1.3 fasst die Anwendungsgebiete der Leistungselektronik zusammen. Neben der Amplitudenverstellung von Gleich-, Wechsel- oder Drehspannungen (Stellen) ermöglicht sie auch die Umwandlung von Wechsel- oder Drehspannung in Gleichspannung (Gleichrichten) und die Erzeugung von Wechsel- oder Drehspannungen mit variabler Frequenz und Amplitude aus Gleichspannungen (Wechselrichten). Des Weiteren kann eine Wechsel- oder Drehspannung einer Amplitude und Frequenz in eine Wechsel- oder Drehspannung anderer Amplitude und anderer Frequenz gewandelt werden (Umrichten). Dazu werden unterschiedliche Schaltungen eingesetzt.

## ■ 1.2 Eigenschaften des Schaltbetriebs

### Lernziele

Die Lernenden ...

- kennen die Unterschiede zwischen Mittel- und Effektivwert,
- berechnen Mittel- und Effektivwerte von Strömen und Spannungen für Zeitverläufe, die für die Leistungselektronik charakteristisch sind,
- berechnen Kenngrößen (Welligkeit, Klirrfaktor) von Schaltungen.

### 1.2.1 Gleich-, Wechsel-, Mischgrößen

Die Gemeinsamkeit aller Schaltungen der Leistungselektronik ist der Schaltbetrieb. Daraus resultiert, dass sich Spannungs- und Stromverläufe, die das Schaltungsverhalten beschreiben, aus Teilabschnitten mit teilweise sprungförmigen Übergängen zusammensetzen. Man erkennt dies am Zeitverlauf von  $u_0(t)$  in Bild 1.2 unten.

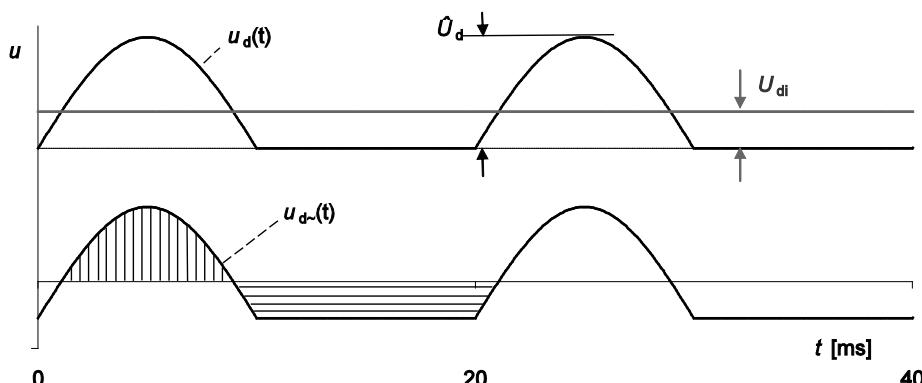
Der Prozess besteht hier aus zwei Teilen der sinusförmigen Netzspannung für  $5 \text{ ms} < t < 10 \text{ ms}$  und  $15 \text{ ms} < t < 20 \text{ ms}$  sowie null während der restlichen Zeit und ist eine reine Wechselgröße. Typische Zeitverläufe bei anderen Schaltungen der Leistungselektronik können sich aus reinen Gleich- oder reinen Wechselgrößen oder Kombinationen von beiden zusammensetzen. Besteht ein Zeitverlauf aus Gleich- und Wechselanteilen, spricht man von einer Mischgröße.

Bild 1.4 zeigt den Verlauf einer solchen Mischspannung  $u_d(t)$ . Sie besteht nur aus den positiven Halbwellen einer sinusförmigen Spannung und hat daher einen positiven Mittelwert. Dieser arithmetische Mittelwert  $U_d$  der Spannung  $u_d(t)$  wird auch Gleichanteil genannt. Er entspricht dem Flächeninhalt zwischen dem Zeitverlauf  $u_d(t)$  und der Zeitachse  $t$ , wobei Flächen oberhalb der Zeitachse positiv und Flächen unterhalb der Zeitachse negativ gezählt werden. Dieser Flächeninhalt wird auch als Spannungs-Zeit-Fläche bezeichnet.

Subtrahiert man den Mittelwert  $U_d$  vom Zeitverlauf  $u_d(t)$ , so ergibt sich der Wechselanteil  $u_{d-}(t)$  der Mischgröße. Dieser Wechselanteil zeichnet sich dadurch aus, dass positive und negative Spannungs-Zeit-Flächen gleich groß sind. Insgesamt kann man sich vorstellen, dass eine Mischgröße aus der Addition eines reinen Wechselanteils zu einem Gleichanteil entsteht.

$$u_d(t) = U_d + u_{d-}(t) \quad (1.1)$$

Die Zeitverläufe, um die es in der Leistungselektronik geht, können Gleich-, Wechsel- oder Mischgrößen sein, die ihrerseits Mittelwert, Effektivwert und Scheitelwert haben. Um den Überblick zu behalten, werden alle zeitlich veränderlichen Größen ( $u_d(t)$ ,  $u_{d-}(t)$  in Bild 1.4) mit Kleinbuchstaben bezeichnet. Größen, die nicht zeitabhängig sind (Scheitelwert  $\hat{U}_d$ , Mittelwert  $U_d$  in Bild 1.4), erhalten Großbuchstaben.



**Bild 1.4** Zeitverlauf einer Mischspannung, oben: Mischspannung  $u_d(t)$ , arithmetischer Mittelwert  $U_d$ ; unten: Wechselanteil  $u_{d-}(t)$

Zur Beschreibung von Mischgrößen wird in der Leistungselektronik eine ganze Reihe unterschiedlicher Begriffe verwendet. Die wichtigsten werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 1.2.2 Arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert eines Zeitverlaufs wird auch Gleichanteil genannt. Um ihn zu berechnen, muss die Spannungs-Zeit-Fläche – also der Flächeninhalt zwischen dem Zeitverlauf der Spannung und der Zeitachse – bestimmt werden.

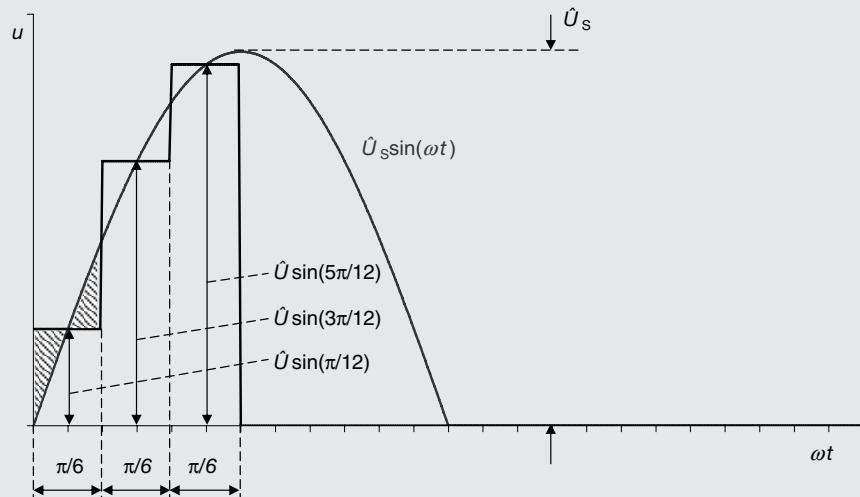
#### Näherungsweise Berechnung

Zunächst wird an einem Beispiel eine überschlägige Berechnung vorgenommen und anschließend auf die exakte mathematische Darstellung erweitert [Felderhoff06].



#### Beispiel 1.1 Berechnung der Spannungs-Zeit-Fläche einer Sinushalbwelle

Zur überschlägigen Berechnung wird die Sinushalbwelle nach Bild 1.5 durch eine Treppenfunktion angenähert. Die Gesamtfläche ergibt sich durch die Summation der einzelnen Flächeninhalte der Treppenstufen. Aufgrund der Symmetrie der Halbwelle zu  $\pi/2$  genügt es, die Treppenstufen der ersten Viertelperiode zu summieren und das Ergebnis zu verdoppeln.



**Bild 1.5** Mittelwertberechnung durch Treppenfunktion

Im Beispiel wird die Näherung durch drei Rechtecke vorgenommen. Jedes von ihnen hat die Breite  $\pi/6$ . Die Höhe ergibt sich aus dem Wert der Sinushalbwelle genau in der Mitte des jeweiligen Rechtecks. Für die drei eingezeichneten Rechtecke betragen die Höhen  $\hat{U}\sin(\pi/12)$ ,  $\hat{U}\sin(3\pi/12)$  sowie  $\hat{U}\sin(5\pi/12)$ . Der Flä-

cheninhalt  $F/2$  der Viertelperiode entspricht näherungsweise der Summe der drei Rechteckflächen und ergibt sich zu

$$\frac{F}{2} = \left[ \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) + \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{3 \cdot \pi}{12}\right) + \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{5 \cdot \pi}{12}\right) \right] \cdot \hat{U}_s$$

$$F = 2 \cdot \left[ \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) + \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{3 \cdot \pi}{12}\right) + \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{5 \cdot \pi}{12}\right) \right] \cdot \hat{U}_s$$

Der Flächeninhalt der Halbperiode ist doppelt so groß wie der der Viertelperiode. Dividiert man den Flächeninhalt  $F$  durch die Periodendauer  $2\pi$ , so erhält man den überschlägigen arithmetischen Mittelwert. Je kleiner die Breite der Treppenstufen, umso genauer wird die Annäherung der Überschlagsrechnung.

$$U_d = \frac{F}{2\pi} = \frac{2 \cdot \left[ \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) + \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{3 \cdot \pi}{12}\right) + \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{5 \cdot \pi}{12}\right) \right] \cdot \hat{U}_s}{2\pi} = 0.321 \cdot \hat{U}_s$$

Anhand der schraffierten Dreiecke in Bild 1.5 wird das Prinzip der Näherung deutlich. Werden die Rechtecke ausreichend schmal, so sind die Flächeninhalte der beiden schraffierten Dreiecke etwa gleich groß. Damit entspricht die Summe der Rechteckflächen näherungsweise der Fläche unter der Sinushalbwelle.

### Mathematisch exakte Berechnung

Wesentlich genauer und mathematisch exakt geschieht die Bestimmung des Mittelwertes durch das bestimmte Integral nach Gl. (1.2).

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \hat{U}_s \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \hat{U}_s \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t \quad (1.2)$$

Angewendet auf Beispiel 1.1 der pulsierenden Gleichspannung ergibt sich für deren arithmetischen Mittelwert folgende exakte Lösung:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} \hat{U}_s \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cdot d\omega t = \frac{\hat{U}_s}{2\pi} \cdot \left[ -\cos \omega t \right]_0^{\pi} = \frac{\hat{U}_s}{2\pi} \cdot [ -(-1) - (-1) ] = \frac{\hat{U}_s}{\pi}$$

$$U_d = 0.318 \cdot \hat{U}_s$$

Die Abweichung zwischen der exakten Lösung und dem Ergebnis aus Beispiel 1.1 ist vergleichsweise gering.



Der *arithmetische Mittelwert* (arithmetic mean value, arithmetic average value) eines Zeitverlaufs ist der in ihm enthaltene Gleichanteil. Mathematisch entspricht er dem Flächeninhalt der Kurve bezogen auf die Zeitachse.

Allgemein wird der arithmetische Mittelwert mit Großbuchstaben bezeichnet. In Halbleiterdatenblättern verwendet man den Index AV (Average Value) für Mittelwerte. Das wird auch in diesem Buch so gehandhabt.

### 1.2.3 Effektivwert

Aufgrund des ohmschen Gesetzes hängt bei linearen Stromkreisen die umgesetzte Leistung quadratisch von Strom oder Spannung ab.

$$p = \frac{u^2}{R} \quad p = i^2 \cdot R$$



Sind Strom und Spannung keine Gleichgrößen, sondern periodische zeitabhängige Größen, so muss zur Leistungsberechnung der quadratische Mittelwert verwendet werden. Dieser heißt *Effektivwert* und wird im Englischen Root Mean Square genannt.

Mathematisch ergibt sich der Effektivwert als Mittelwert des quadrierten Zeitverlaufs.

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u^2(\omega t) \cdot d\omega t} \quad (1.3)$$

Effektivwerte werden u. a. benötigt, um die Wärmebelastung von Halbleitern und die Ausgangsleistung von Wechselrichtern zu berechnen sowie Transformatoren auszulegen.

Im Deutschen dient der Index „eff“ zur Kennzeichnung von Effektivwerten. Halbleiterdatenblätter sind üblicherweise in Englisch verfasst. Dort wird der Begriff Root Mean Square als Bezeichnung für den Effektivwert benutzt. Daher lautet die Indexbezeichnung für Effektivwertangaben in Datenblättern meist RMS. Die Bezeichnung RMS für den Effektivwert wird auch in diesem Buch gebraucht.



#### Beispiel 1.2 Angabe der Strombelastbarkeit

Zur Beschreibung der Strombelastbarkeit gibt man im Datenblatt den maximalen Effektivwert  $I_{\text{TRMSM}}$  des Bauelementstroms an. Die Indizes haben folgende Bedeutung:

T: Bauelementtyp, beispielsweise Thyristor

RMS: Root Mean Square (quadratischer Mittelwert)

M: maximal

$I_{\text{TRMSM}}$  bezeichnet demnach den maximal zulässigen Effektivwert, mit dem der Thyristor belastet werden darf.



### Beispiel 1.3 Effektivwert einer sinusförmigen Spannung

Es soll der Effektivwert des Zeitverlaufs  $\hat{U} \sin(\omega t)$  aus Bild 1.6 berechnet werden.

**Lösung:**

Zunächst muss der Zeitverlauf  $u(\omega t)$  quadriert werden.

$$u(\omega t) = \hat{U} \cdot \sin \omega t \Rightarrow u^2(\omega t) = (\hat{U} \cdot \sin \omega t)^2 = \hat{U}^2 \cdot \sin^2 \omega t$$

Anschließend wird der quadrierte Zeitverlauf nach Gl. (1.3) integriert.

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} (\hat{U} \cdot \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \hat{U}^2 \cdot \sin \omega t^2 \cdot d\omega t}$$

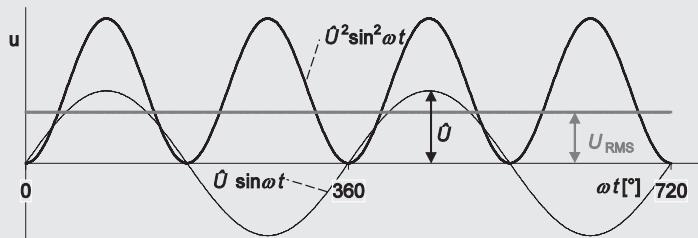
Am einfachsten entnimmt man die Lösung der Integration einer mathematischen Tabelle.

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \left[ -\frac{1}{2} \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) + \frac{\omega t}{2} \right]_0^{2\pi}}$$

Setzt man die Integrationsgrenzen ein, so ergibt sich der bekannte Zusammenhang zwischen Scheitel- und Effektivwert bei sinusförmigen Größen.

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \left[ \left( -\frac{1}{2} \sin(2\pi) \cdot \cos(2\pi) + \frac{2\pi}{2} \right) - \left( -\frac{1}{2} \sin(0) \cdot \cos(0) + \frac{0}{2} \right) \right]}$$

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \left[ 0 + \frac{2\pi}{2} - (0) + \frac{0}{2} \right]} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \hat{U}^2 \cdot \frac{2\pi}{2}} = \sqrt{\frac{\hat{U}^2}{2}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

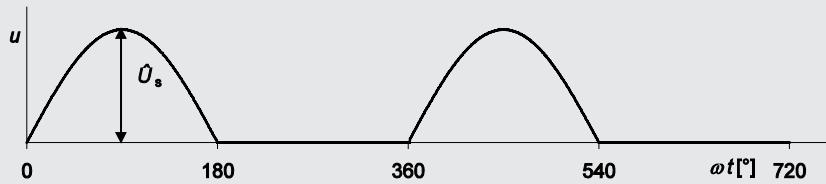


**Bild 1.6** Sinusförmige Spannung  $\hat{U} \sin \omega t$ , quadrierte sinusförmige Spannung  $\hat{U}^2 \sin^2(\omega t)$  und Effektivwert  $U_{\text{RMS}}$  für  $\hat{U} = 2 \text{ V}$



### Übung 1.1

Berechnen Sie den Effektivwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.7.



**Bild 1.7** Zeitverlauf zur Übung 1.1

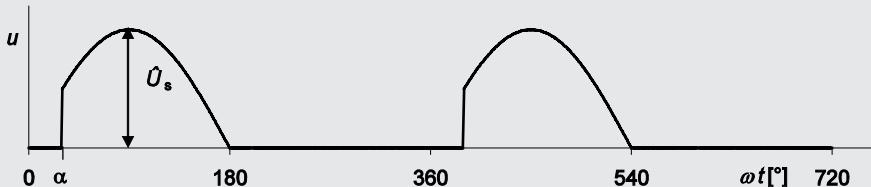


### Übung 1.2

Berechnen Sie Effektivwert und Mittelwert der angeschnittenen sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.8 in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$ .



Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

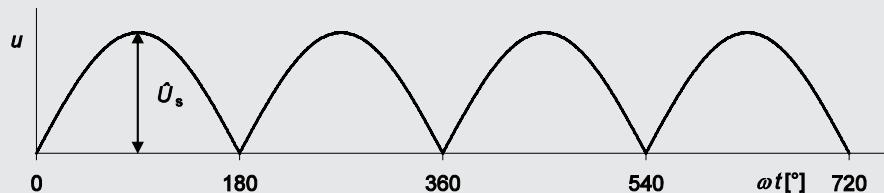


**Bild 1.8** Zeitverlauf zur Übung 1.2



### Übung 1.3

Berechnen Sie den Effektivwert und Mittelwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.9.



**Bild 1.9** Zeitverlauf zur Übung 1.3

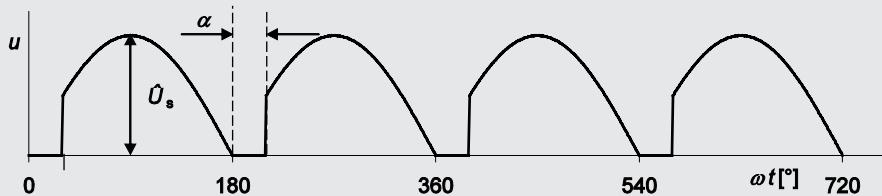


### Übung 1.4

Berechnen Sie Effektivwert und Mittelwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.10 in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$ .



Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.



**Bild 1.10** Zeitverlauf zur Übung 1.4

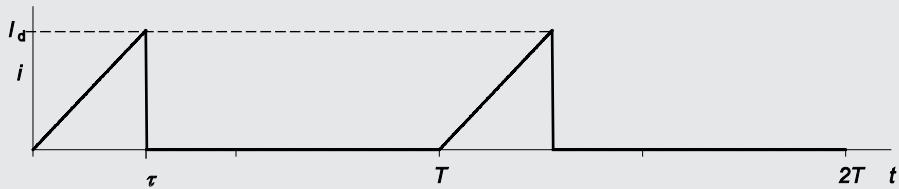


### Übung 1.5

Berechnen Sie den Effektivwert des Stromverlaufs aus Bild 1.11 in Abhängigkeit von  $\tau$ ,  $T$  und  $I_d$ .



Kontrollieren Sie Ihre Lösung mit dem Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.



**Bild 1.11** Zeitverlauf zur Übung 1.5

## 1.2.4 Gesamteffektivwert, Klirrfaktor, Formfaktor und Welligkeit

Ausgehend von Mittelwert und Effektivwert sind weitere Begriffe üblich, um Mischgrößen zu beschreiben.

### Gesamteffektivwert

Nach Gl. (1.1) kann eine Mischspannung als Addition von Gleich- und Wechselanteil aufgefasst werden. Der Gesamteffektivwert der Mischgröße setzt sich daher zusammen aus dem quadratischen Mittelwert des Gleichanteils  $U_d$  und dem Effektivwert des Wechselanteils  $U_{\text{RMS},\sim}$ . Somit gilt:

$$U_{\text{RMS,ges}}^2 = U_d^2 + U_{\text{RMS},\sim}^2 \quad \Rightarrow \quad U_{\text{RMS,ges}} = \sqrt{U_d^2 + U_{\text{RMS},\sim}^2} \quad (1.4)$$

# Literatur

- [Bahat] *Bahat-Treiderl, E.:* GaN-Based HEMTs for High-Voltage Operation: Design, Techology and Characterization; Cuivillier Verlag
- [Bhag83] *Bhagwat, M., Stefanovic, V.:* Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 6, November/December 1983
- [Bresch] *Bresch, W.:* Ansteuern von IGBT's; Firmenschrift GvA Leistungselektronik GmbH, Mannheim; [www.gva-leistungselektronik.de](http://www.gva-leistungselektronik.de)
- [Bronstein08] *Bronstein, N.:* Taschenbuch der Mathematik. 7. Auflage, Verlag Harri Deutsch 2008
- [Brosch00] *Brosch, P.:* Leistungselektronik. Vieweg Verlag 2000
- [Choi] *Choi, H.:* Overview of Silicon Carbide Power Devices; Firmenschrift Fairchild Semiconductor
- [Daher06] *Daher, S.:* Analysis, Design and Implementation of a High Efficiency Multilevel Converter for renewable Energy Systems; Dissertation Universität Kassel 2006
- [Dan12] *Dannehl, J.:* Regelung von Netzpulsstromrichtern mit LCL-Filter für Antriebe mit kleiner Kapazität im Zwischenkreis; Dissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel 2012
- [Eco16] *Ecomal: GaN-SYSTEMS TECHNICAL BASICS;* Präsentation vom 18.11.2016
- [Ems92] *Emsermann, M.:* Analyse, Entwurf und Aufbau von Parallel-Resonanzwandlern in überresonanter Betriebsart; Dissertation TU Darmstadt, 1992
- [Engel11] *Engel, B.; et. al.:* Leistungselektronik bei dezentralen erneuerbaren Energien – insbesondere bei Photovoltaik-Wechselrichtern; Tagungsband Bauelemente der Leistungselektronik; VDE Verlag 2011
- [Ewa19] <http://www.ewa.e-technik.tu-dortmund.de/cms/de/Forschung/Halbleiter/> abgerufen am 14.3.2019
- [Felderhoff06] *Felderhoff, R.:* Leistungselektronik. 4. Auflage, Hanser 2006
- [Grot00] *Grotstollen, H.:* Pulse Width Modulation for Three-Phase Three-Level Converters; Baltic Electronics Conference, Oct. 8 – 11, 2000, Tallinn, Estland, pp. 195 – 198.
- [Hav17] *Havanur S., et al.:* Nichtlineare Kapazitäten von MOSFETs berechnen; <https://www.smarterworld.de/smart-components/halbleiter/artikel/147708/1> vom 16.11.2017
- [Hinz00] *Hinz, H.:* Spannungseinprägender, einphasiger Dreipunkt-Wechselrichter für den transformatorlosen Netzparallelbetrieb von Photovoltaikanlagen; Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag 2000
- [Hofer95] *Hofer, K.:* Moderne Leistungselektronik und Antriebe. VDE-Verlag 1995
- [Jäger09] *Jäger, S.:* Übungen zur Leistungselektronik. 2. Auflage, VDE-Verlag 2009
- [Jäger11] *Jäger, S.:* Leistungselektronik, Grundlagen und Anwendungen. 6. Auflage, VDE-Verlag 2011
- [Jötten77] *Jötten, R.:* Leistungselektronik 1; Vieweg Verlag 1977
- [Hirschmann90] *Hirschmann, W.:* Schaltnetzteile. SIEMENS AG 1990
- [Kerk99] *Hava, A. M., Kerkman, R. J., Lipo, T. A.:* Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI Drives; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No. 1, January 1999

- [Kus14] *Kusnezow, A.:* Modellierung der Auswirkung von Verriegelungszeiten und Ansteuerung von Dreipunktwechselrichtern; Bachelor-Thesis Technische Hochschule Mittelhessen 2014
- [Lee84] *Lee, F. C. et al.:* Resonant Switches- a unified approach to improve performance of switching converters; IEEE Int. Telecommunications Energy Conf. 1984 Proc., pp. 344 - 351
- [Lee87] *Lee, F. C. et al.:* Quasi-Resonant Converters – Topologies and Characteristics; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. PE-2, No. 1, Jan. 1987, p. 62 - 71
- [Leib11] *N.N.:* frequent 03\_2011; herausgegeben vom Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Gustav-Kirchhoff-Straße 4, 12489 Berlin; abgerufen am 14.3.2019 unter [https://www.fbh-berlin.de/fileadmin/downloads/Publications/frequent/frequent\\_03-11\\_online.pdf](https://www.fbh-berlin.de/fileadmin/downloads/Publications/frequent/frequent_03-11_online.pdf)
- [LM2575] *NN.:* Datenblatt zum Baustein LM2575. National Semiconductor 1999
- [Lip11] *Lipphardt, G.:* Leistungselektronik, Teil 3; Studienheft Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt, 2011
- [Mamm01] *Mammano, B.:* Resonant Mode Converter Topologies; Unitrode Corp. 2001
- [Marckx05] *Marckx, D.:* Breakthrough in Power Electronics from SiC, National Renewable Energy Laboratory Report, May. 25, 2005
- [Mohan03] *Mohan, N. et al.:* Power Electronics. 3. Edition, Wiley 2003
- [Mutschler98] *Mutschler, P.:* Wechselrichter für Photovoltaikanlagen; Ringvorlesung 1998 „Regenerative Energien“, heag.pdf; [www.srt.tu-darmstadt.de/fileadmin/general/publicat/heag.pdf](http://www.srt.tu-darmstadt.de/fileadmin/general/publicat/heag.pdf)
- [Nab81] *Nabae, A. et al.:* A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter; IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-17, no. 5. September/October 1981
- [Nam91] *Nam, S. Choi, et al.:* A general circuit topology of multilevel inverter; Power Electronic Specialist Conference PESC 1991, Conf. record pp 96 - 103
- [Ozpineci03] *Ozpineci, B. et al.:* Comparison of wide-band gap semiconductors for power applications; U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory 2003
- [Probst16] *Probst, U.:* Servoantriebe in der Automatisierungstechnik; 2. Auflage, Springer Vieweg 2016
- [Rei96] *Reinold, H.:* Optimierung dreiphasiger Pulsdauermodulationsverfahren; Aachener Beiträge des ISEA; Dissertation RWTH Aachen 1996
- [Ruf95] *Rufer, A.-Chr.:* An aid in the teaching of multilevel inverters for high power applications; Power Electronic Specialist Conference PESC 1995, Conf. record pp 347 - 352
- [Schlienz07] *Schlienz, U.:* Schaltnetzteile und ihre Peripherie. 3. Auflage, Vieweg 2007
- [Schröder06] *Schröder, D.:* Leistungselektronische Bauelemente; 2. Auflage, Springer Verlag 2006
- [Schröder12] *Schröder, D.:* Leistungselektronische Schaltungen; Funktion, Auslegung und Anwendung; 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Vieweg 2012
- [Semikron98] *Nicolai, U., et al.:* Applikationshandbuch IGBT- und MOSFET-Leistungsmodul. SEMIKRON International, 1998; Online Ausgabe: [http://www.semikron.com/skcompub/de/application\\_manual-193.htm](http://www.semikron.com/skcompub/de/application_manual-193.htm)
- [Semikron10] *Wintrich, A., Nicolai, U. et al.:* Applikationshandbuch IGBT- und MOSFET-Leistungsmodul 2010. ISLE Steuerungstechnik und Leistungselektronik; 1. Auflage November 2010
- [Semikron11] *Wintrich, A., Nicolai, U. et al.:* Application Manual Power Semiconductors; ISLE Verlag 2011, © SEMIKRON International 2011; <http://www.semikron.com/service-support/downloads.htm>
- [Stephan01] *Stephan, W.:* Leistungselektronik interaktiv. Fachbuchverlag Leipzig 2001
- [Zastrow10] *Zastrow, D.:* Elektronik. 9. Auflage, Vieweg 2010

# Index

## A

- Abwärtswandler 206
- Ansteuerschaltungen
  - beschleunigtes Abschalten 254
  - CMOS-Gatter 253
  - Gegentaktstufe 254
  - Grundlagen 251
  - High-Side-Treiber 255
  - Impulsübertrager 256
  - Treiber-IC 255
- Ansteuerstufen 252
- Ansteuerverluste 107
- Applet
  - B2C-Schaltung 190
  - B6C-Schaltung 187, 189
  - charakteristische Zeitverläufe 21 f., 24 f., 28
  - dreiphasiger Wechselrichter 307
  - dreiphasiger Wechselrichter mit Raumzeiger 310
  - Dreipunkt-Halbbrücken-Wechselrichter 335
  - einphasiger WR 290
  - Fourier-Synthese 32
  - Hochsetzsteller 223
  - Kommutierung 172
  - M3-Schaltung 165, 198
  - PWM mit modifizierten Steuerspannungen 318
  - Raumzeigerverfahren 316
  - sinusförmige PWM 282
  - Tiefsetzsteller 208, 219
  - Tiefsetzsteller mit ZCS 383
  - Tiefsetzsteller mit ZVS 389
  - Vollbrücke 236, 240, 247 f.
  - VQS-GM 244
  - Wechselstromsteller 32, 35 f.

arithmetischer Mittelwert 16

Ausschaltentlastung 106

Aussteuergrad 284 – 286, 288, 291, 304 f., 309, 325

## B

- B2C 189, 191
  - Mittelwert 191
  - Ventilspannung 190
  - Welligkeit 191
- B6C 185, 191
  - Mittelwert 186 f.
  - Welligkeit 186 f.
- Bandabstand 56
- Bändermodell 46, 56
- Betriebsquadranten
  - bei Stromrichtern 38
- Bipolar-Transistor 260
- Blindleistung 30, 32 – 37, 184
- Boost Converter 222
- Brückenschaltung 184, 189
- Buck Converter 206

## D

- Diffusionsstrom 50, 52
- Diode
  - Datenblattangaben 65, 119, 122
  - Durchlassverluste 108
  - idealisierte Kennlinie 63
  - Kennlinie 62
  - Schaltverhalten 64
  - Schaltverluste 112
  - Verlustleistung 63
- Dotierung 48 f.
- Drehstrombrückenschaltung 185

Driftstrom 50  
Durchlassverluste 61, 107

## E

Effektivwert 16, 19, 39 – 42, 165  
– Abschätzung 27  
– Berechnung 21  
– RMS 19  
– überschlägige Berechnung 24  
einphasiger Wechselrichter  
– Ausgangsspannung 279  
Einschaltentlastung 104  
Ersatzschaltbild  
– Diode 63f., 108f.  
– für Mittelwerte 179  
– IGBT 88  
– MOSFET 86  
– Schaltzustände beim dreiphasigen Wechselrichter 296  
– thermisch 113  
– Thyristor 67, 109  
– Überspannung 99

## F

Feldstärke  
– elektrisch 47, 50  
– kritisch 57  
Feldstrom 52  
Formfaktor 22, 24  
Fourier 31, 36, 276  
– Zerlegung 32  
Freilaufdiode 219, 225  
Frequenzverhältnis 284 – 286, 288 – 291, 306, 309, 324, 327

## G

GaN  
– 2DEG 93  
– Eigenschaften 92  
GaN-Transistor  
– Aufbau 93  
– Einschalten 93  
– Kennlinien 95  
– Rückwärtsleiten 94

GCT 96  
Gesamteffektivwert 22  
Glättungsdiode 151  
Glättungszeitkonstante 152  
Gleichgröße 16  
Gleichrichter  
– als Einspeisung für Tiefsetzsteller 205  
– bei Zwillingskreisumrichter 272  
– M1 139  
– Toleranz der Netzspannung 218  
– vollgesteuert 196  
– Wechselanteil 23  
Gleichspannungs-Zwillingskreis 272  
Gleichstromsteller 203  
– Anwendungen 204  
Grundfrequenztaktung 276  
GTO 96, 204, 290

## H

Helligkeitssteuerung  
– mit Stromrichter 13  
– mit Vorwiderstand 13  
Hochsetzsteller 219 – 222, 225  
– Lückbetrieb 223  
– Schaltbild 220  
– Zeitverläufe 221

## I

ideale Stromglättung 151  
ideelle Gleichspannung 143  
IGBT 74, 204, 251, 260  
– Aufbau 75  
– Datenblattangaben 89, 119, 128  
– Durchlassverluste 110f.  
– Ersatzschaltbild 88  
– Gateladung 131  
– Grenzwerte 129  
– Kennlinie 76  
– Latch-Up 88  
– NPT 77, 79  
– Parameter 128  
– parasitäre Elemente 80, 82f.  
– parasitäre Kapazitäten 81, 83  
– P-Kanal 77  
– PT 77, 80

- Schaltverhalten 84, 89
- Schaltverluste 112
- Schaltzeichen 76
- Schaltzeiten 77
- SOA-Diagramm 91
- symmetrisch 77
- unsymmetrisch 77, 80
- IGCT 204

## K

- Klirrfaktor 22, 23
- Kommutierung 170, 173
  - bei M3C 176
  - Berechnung der Spannungsänderung 176
  - Ersatzschaltbild 171
  - fremdgeführter Stromrichter 203
  - selbstgeführter Stromrichter 204
  - Spannungsabfall bei Kommutierung 177
  - Spannungsabfall durch Kommutierung 174
  - Ventilstromverlauf 173
  - Wechselrichtergrenze 177
- Kommutierungsinduktivität 177
- Kühlkörper
  - Auswahl 118
  - Berechnung 117

## L

- Leistung
  - beim Wechselstromsteller 34 f.
- Leistungsbilanz 29
- Leistungsfaktor 31
  - bei sinusförmigen Größen 29
- Lückbetrieb
  - Hochsetzsteller 224
  - Tiefsetzsteller 214, 216
- Lückgrenze
  - Hochsetzsteller 223
  - Tiefsetzsteller 217

## M

- M1 139, 191
  - Welligkeit 144
- M1C 142
- M1U 140
- M2 145, 191
  - arithmetischer Mittelwert 149
  - Mittelwert 148
  - natürlicher Zündzeitpunkt 146
  - Teilaussteuerung 148
  - Vollaussteuerung 147
  - Welligkeit 148
- M3 154, 185, 191
  - arithmetischer Mittelwert 156
  - mit verbundenen Anoden 180
  - Strangströme 163
  - Teilaussteuerung 160
  - Ventilspannung 158 f.
  - Ventilströme 163
  - Vollaussteuerung 156
  - Welligkeit 157
- Mischgröße 16
- Mittelpunktschaltung
  - M1 139
  - M2, M2C 145
  - M3, M3C 154
- Mittelwert 16 f., 32, 36, 40 f., 141 f., 206, 215, 237, 240, 243
  - Abschätzung 27
  - Berechnung 21
  - Berechnung durch Treppenfunktion 17
  - exakte Berechnung 18
  - überschlägige Berechnung 24
- MOSFET 68, 203, 206, 208, 260
  - Ansteuerschaltungen 251
  - Aus/Einschalten 69
  - Bahnwiderstand 71
  - Datenblattangaben 72, 119, 128
  - Durchlassverluste 110
  - Grenzwerte 129
  - lateraler Aufbau 69
  - Parameter 128
  - Schaltverluste 112
  - statische Kennlinie 71
  - vertikaler Aufbau 70

**N**

natürlicher Zündzeitpunkt 142, 146  
 netzgeführte Stromrichter 203  
 N-Kanal-MOSFET 252, 255, 260  
 N-Kanal-MOS-Transistoren 251  
 NPN 203

**O**

Oberschwingung 23, 32 – 34, 36, 209, 274, 276, 279, 324  
 - Grundfrequenztaktung 280, 299  
 - Unterschwingungsverfahren 306  
 - Zeitverläufe 277  
 Ordnungszahl 32, 277, 279, 288, 299, 306, 309, 324

**P**

PiN-Übergang 54  
 PNP 203  
 PN-Übergang 50  
 Pulsamplitudenmodulation 281, 325  
 Pulsweitenmodulation 208, 237, 253, 281 – 283, 304, 325  
 - bipolar 278  
 - bipolar, zwei Spannungsniveaus 238 – 240, 248  
 - Steuerbereiche 292  
 - synchronisiert 289  
 - unipolar, drei Spannungsniveaus 241 – 244, 246, 250  
 - unsynchronisiert 290  
 - Unterschwingungsverfahren 284, 287  
 PWM2 238  
 PWM3 243, 250

**R**

Raumladungszone 53f.  
 Raumzeiger 309

**S**

Sägezahnnspannung 206, 208  
 Schaltbetrieb 15

Schalter 14, 140, 203f., 219, 225, 227f., 232, 241  
 - eingeschaltet 235  
 - ideal 58  
 - real 58  
 - stromführend 235  
 Schaltfrequenz 208  
 Schaltverluste 61, 107, 251  
 Schaltvorgang 59  
 Scheitelwert 16, 36, 281  
 Schleusenspannung 251  
 Schutz  
 - Kurzschluß 103  
 - Überstrom 103  
 Schutzbeschaltung  
 - active clamping 101  
 - dynamische Gatesteuerung 101  
 - passiv 101  
 - Steuerkreis 102  
 selbstgeführte Stromrichter 203  
 Spannungsbelastbarkeit  
 - von Bauelementen 97  
 Sperrschichttemperatur 56f.  
 Sperrverluste 61, 107  
 Sperrwandler 221f.  
 Step-Down Converter 206  
 steuerbare Stromrichter 140  
 Steuerblindleistung 34, 37  
 Steuergesetz 142  
 Steuerverluste 61  
 Steuerwinkel 142  
 Stromglättung 149  
 Stromgrundschwingung 33  
 Stromrichter 203  
 Stromwelligkeit 149

**T**

Tastgrad 216, 224  
 THD 23, 43  
 Thyristor 66, 156  
 - Abschalten 67  
 - Blockieren 66  
 - Datenblattangaben 67, 125  
 - Durchlassverluste 108  
 - Kennlinie 66

- kritische Spannungssteilheit 67
- Leiten 67
- Spannungsspitze 100
- Sperren 66
- Sperrfähigkeit 97
- Zünden 66
- Tiefpassfilter 210
- Tiefsetzsteller 206, 320
  - Ausgangsspannung 215
  - Berechnung der Stromwelligkeit 211
  - grundlegende Zeitverläufe 207
  - Grundschaltung 206
  - Kennlinien 217 f.
  - Lückbetrieb 214 f.
  - Lückbetrieb bei konstanter Ausgangsspannung 218
  - Lückbetrieb bei konstanter Eingangsspannung 216
  - realer Aufbau 208
  - Stromwelligkeit 210
- Transformatorbauleistung 182
- Transistor 203
- Treiberschaltungen 252

## U

- Überlappung 173
- Überspannungsschutz 98
- Umkehrstromrichter 192, 328
  - mit B6C 192
- Umrichten von Wechselstrom 272
- Umrichter 272
- Umschaltverluste 204
- Unterschwingungsverfahren 283, 285, 287, 291
  - dreiphasiger Wechselrichter 302
  - linearer Steuerbereich 304
  - Oberschwingungen 286
  - Spektren 288
  - synchronisierte Taktung 288
  - unsynchronisierte Taktung 290
  - Vierquadrantensteller 281

## V

- Ventilspannung 146, 159
- Verluste 15, 29, 319
- Verschiebungsblindleistung 34
- Verzerrungsblindleistung 34 - 37
- Vierquadrantensteller 234
  - einphasiger Wechselrichter 278
- Vollaussteuerung 143
- Vollbrücke 233

## W

- Wärmekapazität 115
- Wärmeleitfähigkeit 57
- Wärmewiderstand 114
- Wechselanteil 143
- Wechselgröße 16
- Wechselrichter
  - Bremsbetrieb 319
  - dreiphasig 293
  - dreiphasig mit Grundfrequenztaktung 295
  - einphasig 275
  - Ersatzschaltbild 297
  - Grundfrequenztaktung 281
  - linearer Steuerbereich 288
  - mit einer Halbbrücke 275
  - mit Vierquadrantensteller 278
  - Photovoltaikmodul 274
  - Pulsweitenmodulation 303
  - spannungseinprägend 272
  - Spektren 305
  - Steuerbereich 309
  - synchronisierte Taktung 306
  - unterbrechungsfreie Stromversorgung 274
  - Unterschwingungsverfahren 281
  - Vollbrücke 234
  - Zerhacken einer Gleichspannung 273
  - Zusatzkomponenten 320
- Wechselrichterbetrieb 168
  - bei netzgeführtem Stromrichter 193
- Wechselrichtergrenze 177
- Welligkeit 22 f.

**Z**

- Zündwinkel 142, 144  
Zweiquadrantensteller  
- mit Spannungsumkehr 227  
- mit Stromumkehr 225

- synchrone Taktung 228  
- Taktung eines Transistors 232  
- zeitlich versetzte Taktung 229  
Zwischenkreisumrichter 272  
- mit eingeprägter Spannung 273