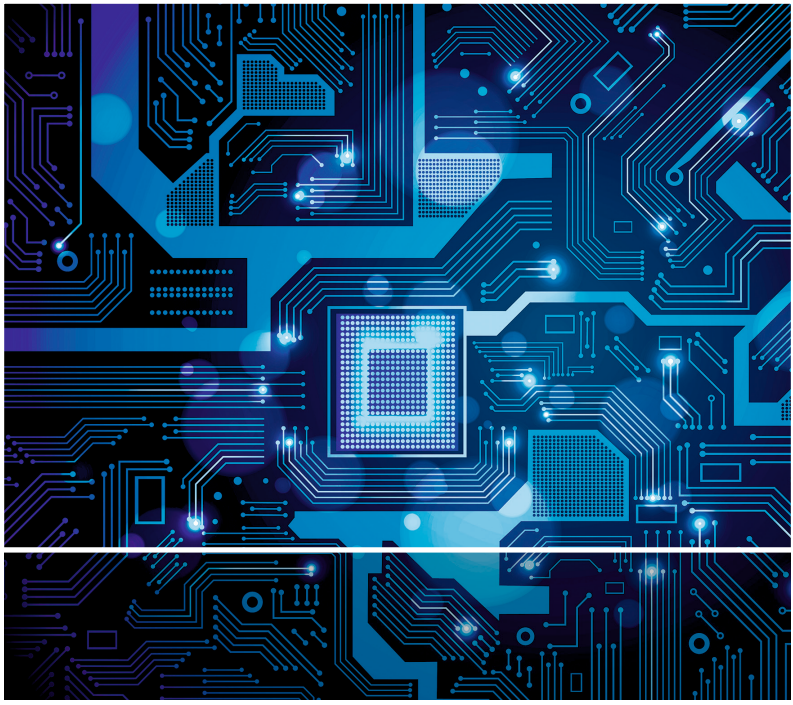
Uwe Probst

Leistungselektronik für Bachelors

Grundlagen und praktische Anwendungen



4., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Probst

Leistungselektronik für Bachelors

Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Uwe Probst

Leistungselektronik für Bachelors

Grundlagen und praktische Anwendungen

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Autor:

Prof. Dr.-Ing Uwe Probst
Technische Hochschule Mittelhessen
Fachbereich Elektro- und Informationstechnik

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C014889

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.
Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München
Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer
Herstellung: le-tex publishing services, Leipzig
Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell
Titelbild: © shutterstock.com/LIORIKI
Covergestaltung: Max Kostopoulos
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Druck und Bindung: Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg
Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46317-2
E-Book-ISBN 978-3-446-46366-0

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

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 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 Transformatorbauleistung ... 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

5 Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis ... 272

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

6 Mehrpunkt-Wechselrichter ... 329

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 Klemmdioden ... 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

7 Resonantes Schalten ... 363

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

A1 Fachbegriffe Deutsch-Englisch/Englisch-Deutsch 393

A2 Formelzeichen und Abkürzungen 400

A3 Glossar 404

Literatur 407

Index 409

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 Netzspannung. Somit kann durch Verändern der Schleiferstellung die Größe der Spannung u_0 gesteuert werden.

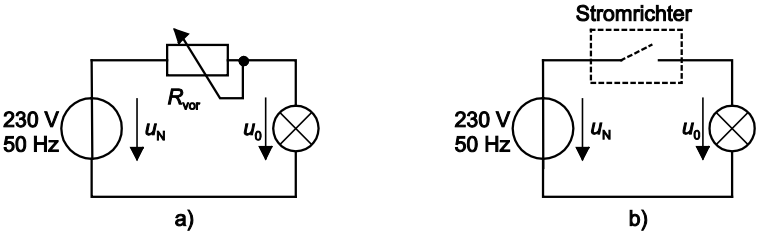


Bild 1.1 Helligkeitssteuerung einer Glühlampe a) mit Vorwiderstand b) mit Schaltbetrieb (Dimmer)

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

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.

Schalter ein: $u_0 = u_{\text{N}}$ 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 Einschaltdauer des Schalters relativ zur Periodendauer der Netzspannung gesteuert werden.

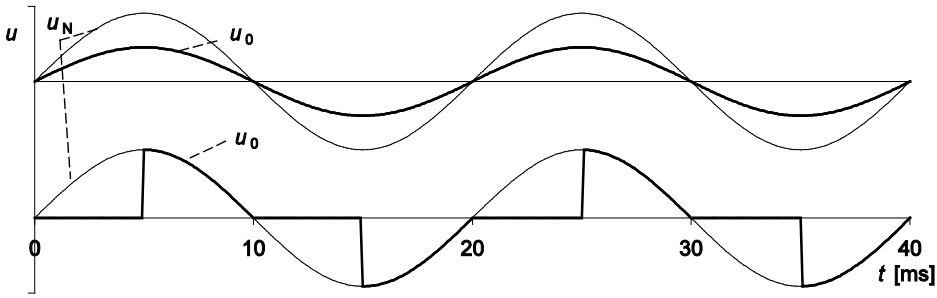


Bild 1.2 Zeitverläufe von $u_0(t)$: oben mit Vorwiderstand; unten mit Schaltbetrieb

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.

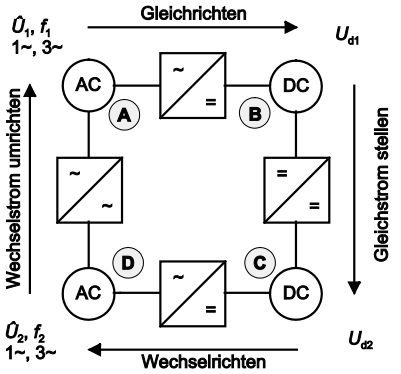


Bild 1.3 Anwendungsgebiete der Leistungselektronik

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 ms < t < 10 ms und 15 ms < t < 20 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 $u_{d\sim}(t)$ 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.

$$u_d(t) = U_d + u_{d\sim}(t) \tag{1.1}$$

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 ($u_d(t)$, $u_{d\sim}(t)$ 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.

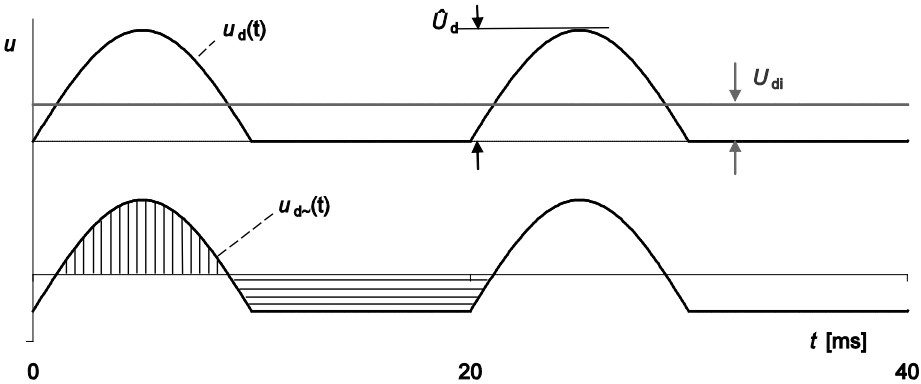


Bild 1.4 Zeitverlauf einer Mischspannung, oben: Mischspannung $u_d(t)$, arithmetischer Mittelwert U_d; unten: Wechselanteil $u_\sim(t)$

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.

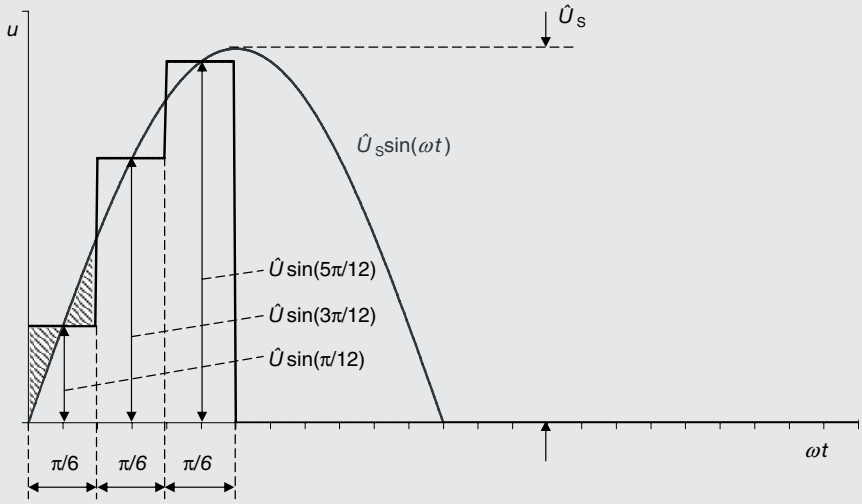


Bild 1.5 Mittelwertberechnung durch Treppenfunktion

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

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

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

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

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

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).

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

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.

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

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.

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

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_{TRMSM} des Bauelementstroms an. Die Indizes haben folgende Bedeutung:

T: Bauelementtyp, beispielsweise Thyristor

RMS: Root Mean Square (quadratischer Mittelwert)

M: maximal

I_{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.

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

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

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

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

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

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

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

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

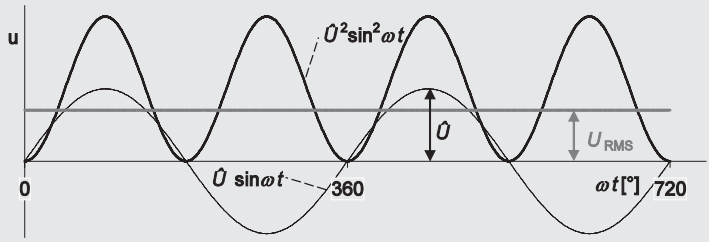


Bild 1.6 Sinusförmige Spannung $\hat{U}\sin\omega t$, quadrierte sinusförmige Spannung $\hat{U}^2\sin^2(\omega t)$ und Effektivwert U_{RMS} für $\hat{U}$ = 2 V

Übung 1.1

Berechnen Sie den Effektivwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.7.

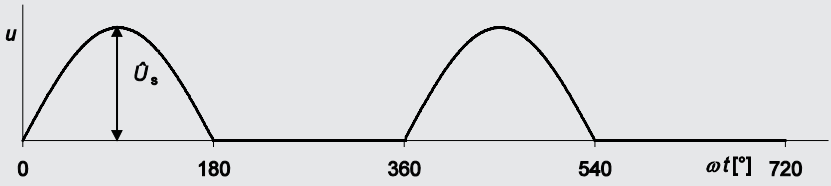


Bild 1.7 Zeitverlauf zur Übung 1.1

Übung 1.2

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

Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

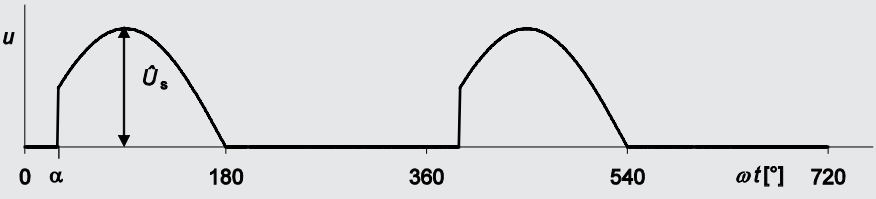


Bild 1.8 Zeitverlauf zur Übung 1.2

Übung 1.3

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

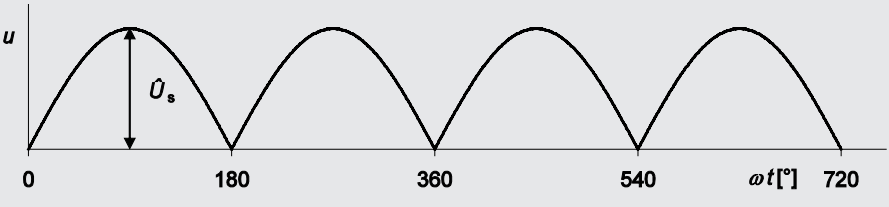


Bild 1.9 Zeitverlauf zur Übung 1.3

Übung 1.4

Berechnen Sie Effektivwert und Mittelwert der sinusförmigen Halbwellen in Bild 1.10 in Abhängigkeit vom Winkel α.

Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

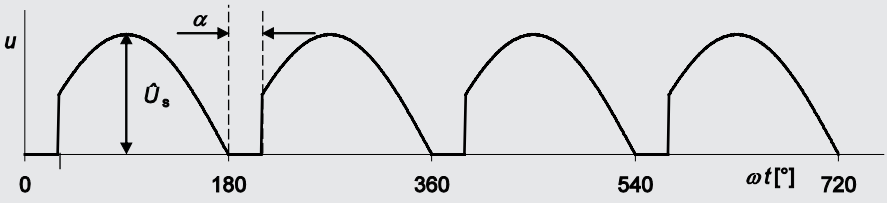


Bild 1.10 Zeitverlauf zur Übung 1.4

Übung 1.5

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

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

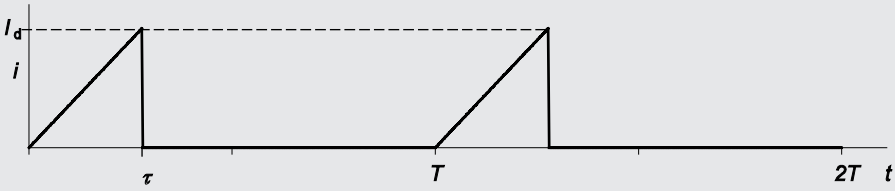


Bild 1.11 Zeitverlauf zur Übung 1.5

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 $U_{RMS,\sim}$. Somit gilt:

$$U_{RMS,ges}^2 = U_d^2 + U_{RMS,\sim}^2 \qquad \Rightarrow \qquad U_{RMS,ges} = \sqrt{U_d^2 + U_{RMS,\sim}^2} \tag{1.4}$$

Der *Gesamteffektivwert* einer Mischgröße ergibt sich aus der geometrischen Summe der Einzeleffektivwerte.

Welligkeit

Bei Gleichrichtern ist von Interesse, wie viel Wechselspannungsanteile in der gleichgerichteten Spannung enthalten sind.

Bezieht man den Effektivwert des Wechselanteils (ripple content) auf den Gleichanteil (DC component), so bekommt man ein Maß für den prozentualen Wechselspannungsgehalt der Mischgröße. Dieses Maß wird als *Welligkeit* (ripple) bezeichnet und kann für Spannungen und Ströme gleichermaßen verwendet werden.

$$w_u = \frac{U_{RMS,\sim}}{U_d} = \sqrt{\frac{U^2_{RMS,ges} - U^2_d}{U^2_d}} = \sqrt{\frac{U^2_{RMS,ges}}{U^2_d} - 1}$$

$$w_i = \frac{I_{RMS,\sim}}{I_d} = \sqrt{\frac{I^2_{RMS,ges}}{I^2_d} - 1} \tag{1.5}$$

Für reine Gleichgrößen wird $w = 0$. Reine Wechselgrößen zeichnen sich dadurch aus, dass kein Gleichanteil vorhanden ist und w sehr groß wird.

Klirrfaktor

Leistungselektronische Schaltungen ermöglichen auch die Umwandlung von Gleich- in Wechselspannungen. Bei dieser Umwandlung entstehen allerdings neben der Wechselspannung mit der gewünschten Frequenz zusätzliche Spannungskomponenten mit anderen Frequenzen. Diese werden als Oberschwingungen bezeichnet und sind unerwünscht. Um die Güte eines solchen Wechselrichters zu beurteilen, wird der Begriff Klirrfaktor (K) verwendet. Er bezeichnet das prozentuale Verhältnis zwischen dem Effektivwert aller Oberschwingungen und dem Gesamteffektivwert. Ebenso wie die Welligkeit kann er für Spannungen und Ströme angegeben werden. Die englische Bezeichnung lautet Total Harmonic Distortion (*THD*), verwendet aber als Bezugsgröße den Effektivwert der Grundschwingung. Der Index u wird für Spannungen, der Index i für Ströme verwendet.

$$K_u = \frac{U_{RMS,OS}}{U_{RMS}} \qquad K_i = \frac{I_{RMS,OS}}{I_{RMS}}$$

$$THD_u = \frac{U_{RMS,OS}}{U_{RMS,1}} \qquad THD_i = \frac{I_{RMS,OS}}{I_{RMS,1}}$$

Formfaktor

Unter dem Formfaktor F versteht man das Verhältnis zwischen dem Gesamteffektivwert einer elektrischen Größe und ihrem arithmetischen Mittelwert.

$$F = \frac{U_{\mathrm{d,RMS}}}{U_{\mathrm{d}}}$$

1.2.5 Überschlägige Berechnung bei einfachen Kurvenverläufen

Bei Zeitverläufen, die während einer Periode lediglich zwei diskrete Werte annehmen, können sowohl Mittelwert als auch Effektivwert auch ohne aufwändige Integralrechnung angegeben werden.

Beispiel 1.4 Berechnung von Mittel- und Effektivwert

Berechnen Sie Mittelwert und Effektivwert des rechteckigen Stromverlaufs in Bild 1.12.

Verwenden Sie zur Lösung das Applet „Charakteristische Zeitverläufe“.

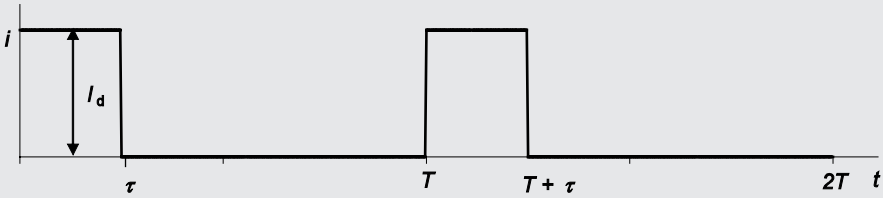


Bild 1.12 Zeitverlauf zum Beispiel 1.4

Lösung:

Der Mittelwert des Stromverlaufs ergibt sich zu

$$I_{\mathrm{d,AV}} = \frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{\tau} I_{\mathrm{d}} \cdot \mathrm{d}t + \int_{\tau}^{T} 0 \cdot \mathrm{d}t \right) = \frac{I_{\mathrm{d}}}{T} \left[t \right]_0^{\tau} = \frac{I_{\mathrm{d}}}{T} \tau$$

Definiert man das Tastverhältnis $D = \tau / T$, so erhält man

$$I_{\mathrm{d,AV}} = D \cdot I_{\mathrm{d}}$$

Allgemein berechnet man den Effektivwert des Stromverlaufs mit Gl. (1.3). Setzt man auch hier wieder den Tastgrad D ein, so ergibt sich

$$I_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{\tau} I_{\mathrm{d}}^2 \cdot \mathrm{d}t + \int_{\tau}^{T} 0 \cdot \mathrm{d}t \right)} = \sqrt{\frac{I_{\mathrm{d}}^2}{T}} \cdot \left[t \right]_0^{\tau} = I_{\mathrm{d}} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{T}} = I_{\mathrm{d}} \cdot \sqrt{D}$$

Diese Ergebnisse können verallgemeinert werden. Ist $a(t)$ ein Zeitverlauf, der während $t < \tau$ den Wert A und während der restlichen Zeit der Periode T den Wert 0 annimmt, so beträgt dessen Mittelwert A_{AV}

$$A_{AV} = \frac{\tau}{T} \cdot A = D \cdot A$$

Für den Effektivwert A_{RMS} des Zeitverlaufs gilt dagegen:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{\tau}{T}} \cdot A = \sqrt{D} \cdot A$$

In manchen Fällen kann man den zu untersuchenden Zeitverlauf in Teilverläufe zerlegen. Dies lohnt immer dann, wenn Mittel- und Effektivwerte dieser Teilverläufe einfach berechnet werden können.

Beispiel 1.5 Mittel- und Effektivwert des Stromverlaufs in Bild 1.13

Für den gegebenen Zeitverlauf sind in Abhängigkeit von τ, T und I_d der Mittelwert und der Effektivwert anzugeben.

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

Lösung:
Es handelt sich um einen reinen Wechselstrom. Daher ist der Mittelwert gleich null. Der Effektivwert beträgt:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{\tau} I_d^2 \mathrm{d}t + \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}+\tau} I_d^2 \mathrm{d}t \right)} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\left[I_d^2 \cdot t \right]_0^{\tau} + \left[I_d^2 \cdot t \right]_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}+\tau} \right)}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[(I_d^2 \cdot \tau - I_d^2 \cdot 0) + (I_d^2 \cdot (\tfrac{T}{2} + \tau) - I_d^2 \cdot \tfrac{T}{2}) \right]}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[(I_d^2 \cdot \tau) + (I_d^2 \cdot \tfrac{T}{2} - I_d^2 \cdot \tfrac{T}{2} + I_d^2 \cdot \tau) \right]}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[(I_d^2 \cdot \tau) + (I_d^2 \cdot \tau) \right]} = I_d \cdot \sqrt{\frac{2\tau}{T}}$$

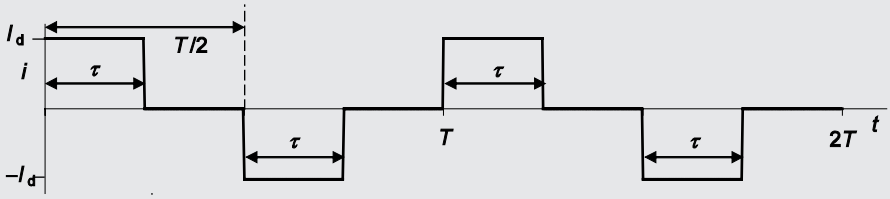


Bild 1.13 Zeitverlauf zu Beispiel 1.5

Einfacher wird die Berechnung, wenn man den vorliegenden Stromverlauf $i(t)$ aus Bild 1.13 in zwei Anteile $i_1(t)$ und $i_2(t)$ wie in Bild 1.14 zerlegt, die zusammengesetzt wieder den ursprünglichen Zeitverlauf ergeben.

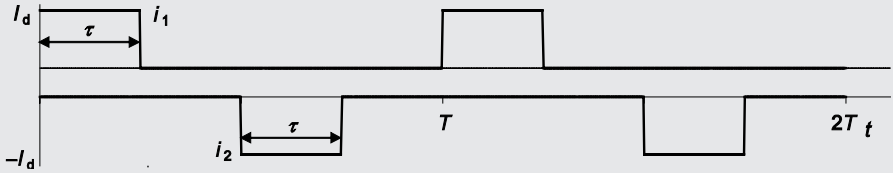


Bild 1.14 Zeitverlauf zerlegt in zwei Einzelverläufe, zu Beispiel 1.5

Für jeden Teilverlauf $i_1(t)$ und $i_2(t)$ können jetzt Mittel- und Effektivwert vereinfacht berechnet werden. Der Gesamtmittelwert ergibt sich aus der Summe der einzelnen Mittelwerte.

$$I_{1,\mathrm{AV}} = \frac{\tau}{T} \cdot I_\mathrm{d} \qquad \text{und} \qquad I_{2,\mathrm{AV}} = \frac{\tau}{T} \cdot (-I_\mathrm{d})$$

$$I_\mathrm{AV} = I_{1,\mathrm{AV}} + I_{2,\mathrm{AV}} = \frac{\tau}{T} \cdot \left[I_\mathrm{d} + (-I_\mathrm{d}) \right] = 0$$

Ähnliches gilt für den Gesamteffektivwert. Allerdings müssen die Effektivwerte der Teilverläufe vor der Addition quadriert werden. Der Gesamteffektivwert entspricht der Wurzel aus dieser Summe.

$$I_{1,\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{\tau}{T}} \cdot I_\mathrm{d} \qquad \text{und} \quad I_{2,\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{\tau}{T}} \cdot I_\mathrm{d}$$

$$I_\mathrm{RMS} = \sqrt{\left(I_{1,\mathrm{RMS}}\right)^2 + \left(I_{2,\mathrm{RMS}}\right)^2} = \sqrt{\frac{\tau}{T} \cdot I_\mathrm{d}^2 + \frac{\tau}{T} \cdot I_\mathrm{d}^2} = \sqrt{\frac{2\tau}{T}} I_\mathrm{d}$$

Übung 1.6

Berechnen Sie den Gesamteffektivwert der Spannung $u_{aM}(t)$, der im Zeitverlauf in Bild 1.15 enthalten ist.

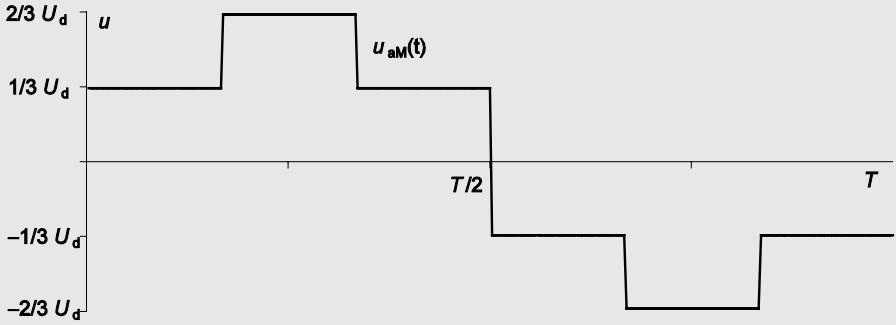


Bild 1.15 Zeitverlauf zu Übung 1.6

Abschätzung bei komplexen Kurvenverläufen

Wenn man nur an einer groben Abschätzung interessiert ist, können komplizierte Zeitverläufe häufig durch einen einfacheren Verlauf angenähert werden. Ist beispielsweise die Änderung $i_b - i_a$ des Stromverlaufs aus Bild 1.16 ausreichend klein, dann kann der eigentlich trapezförmige Verlauf als nahezu rechteckförmig mit der Amplitude ½ $(i_b + i_a)$ angesehen werden. Unter dieser Annahme ergeben sich folgende Näherungswerte für Mittel- und Effektivwert (vgl. dazu die Ergebnisse der Übung 1.7):

$$I_{AV} = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{1}{2}\left(i_b + i_a\right) = D \cdot \frac{1}{2}\left(i_b + i_a\right) \quad \text{sowie}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\tau}{T}} \cdot \frac{1}{2}\left(i_b + i_a\right) = \sqrt{D} \cdot \frac{1}{2}\left(i_b + i_a\right)$$

Übung 1.7

Ermitteln Sie den Effektivwert des Kurvenverlaufs aus Bild 1.16 mit Hilfe der Ergebnisse von Beispiel 1.4 und Übung 1.5.

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

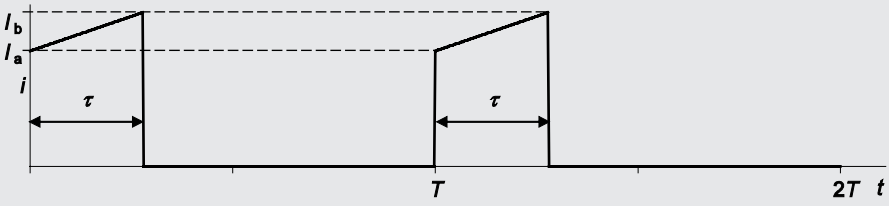


Bild 1.16 Zeitverlauf zur Übung 1.7

Übung 1.8

Ermitteln Sie den THD_u des Spannungsverlaufes $u(t)$ aus Bild 1.17.

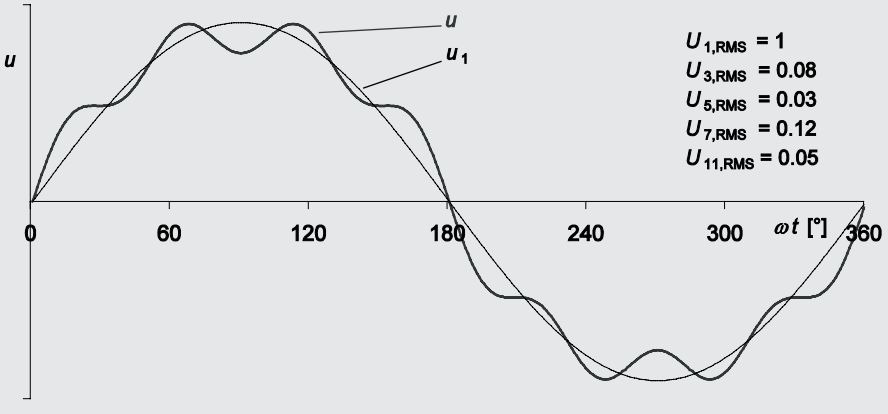


Bild 1.17 Zeitverlauf zur Übung 1.8

1.3 Leistungsbilanz bei Stromrichtern

Lernziele

Die Lernenden ...

- kennen die Ursachen für den Blindleistungsbedarf bei Stromrichtern,
- benennen unterschiedliche Arten der Blindleistung bei Stromrichtern,
- berechnen den Grundschwingungsleistungsfaktor,
- berechnen Blindleistungen bei einfachen Stromrichtern.

1.3.1 Leistungsfaktor bei sinusförmigen Größen

Elektrische Verbraucher entnehmen dem speisenden Wechselstromnetz einen Strom I_{0RMS}. Alle Anlagenteile, die zwischen dem Netz und dem Verbraucher liegen (Zuleitungen, Transformatoren, Stromrichter), werden mit diesem Strom I_{0RMS} belastet. Dabei ist es völlig unerheblich, ob zwischen Strom und Spannung am Anschlusspunkt des Verbrauchers ein Phasenunterschied besteht oder nicht. Für die Verluste, die in den Anlagenteilen entstehen, welche dem Verbraucher vorgeschaltet sind, ist der Effektivwert des fließenden Stromes maßgeblich.

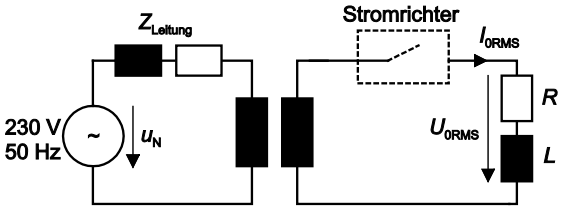


Bild 1.18 Ohmsch-induktiver Verbraucher mit Stromrichter und Anlagenteilen

Die vom Verbraucher entnommene Scheinleistung S wird definiert als

$$S = U_{0RMS} \cdot I_{0RMS}$$

Die vom Verbraucher umgesetzte Wirkleistung P ist kleiner als die Scheinleistung S, wenn Strom und Spannung am Verbraucher nicht phasengleich sind. Für diesen häufigen Fall gilt:

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

Nur wenn sowohl der Verbraucherstrom $i_0(t)$ als auch die Verbraucherspannung $u_0(t)$ rein sinusförmige Größen sind, kann man von einem Phasenverschiebungswinkel ϕ sprechen. In diesem Fall gelten die grundlegenden Beziehungen

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos\phi \qquad S^2 = P^2 + Q^2 \qquad \text{mit} \qquad P = S \cdot \cos\phi \qquad \text{und} \qquad Q = S \cdot \sin\phi$$