

Leistungselektronik

4. Auflage

Manfred Michel

Leistungselektronik

Einführung
in Schaltungen und deren Verhalten

4. Auflage

 Springer

Professor Dr.-Ing. Manfred Michel
Technische Universität Berlin
Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik
Fachgebiet Leistungselektronik, Sekr. E2
Einsteinufer 19
10587 Berlin

ISBN 978-3-540-75610-1

e-ISBN 978-3-540-75611-8

DOI 10.1007/978-3-540-75611-8

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

© 2008, 2003, 1996, 1992 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

Herstellung und Satz: LE-TEX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Vorwort zur 4. Auflage

Das Buch ist als Einführung in die Leistungselektronik und als Hilfsmittel für die Lehre in diesem Fach angelegt. Den Schwerpunkt der Darstellung bildet deshalb die Strukturierung des Gebietes, das Herausarbeiten der Grundprinzipien und die Erläuterung der Wirkungsweise der wichtigsten Schaltungen. Auf die Vielfalt der in der Leistungselektronik verwendeten Schaltungen wird deshalb nicht eingegangen. Mit diesem Konzept kann auch die vierte Auflage ohne tief greifende Änderungen auskommen. Einige Abschnitte wurden, der schnellen Entwicklung des Gebietes Rechnung tragend, dem Stand der Technik angepasst.

Da für ein Studium die eigene Arbeit eine wichtige Rolle spielt und nur mit ihr das Erkennen und Lösen von Problemen erlernt werden kann, regt das Buch mit Aufgaben dazu an. Auch wenn heute mit dem Mittel der Simulation der größte Teil der Entwurfsarbeit erledigt wird, kann auf das Beherrschen von grundlegenden Berechnungsverfahren nicht verzichtet werden. Nur mit ihrer Hilfe kann die unbedingt notwendige Überprüfung der Funktion von Simulatoren geleistet werden. Diesem Rechnung tragend wurden neue Aufgaben zugefügt.

Für die gute Zusammenarbeit auch bei dieser Auflage danke ich dem Springer-Verlag.

Berlin, Mai 2007

Manfred Michel

Vorwort

Wie viele Gebiete der Elektrotechnik entwickelt sich auch die Leistungselektronik gegenwärtig sehr rasch weiter. Die Ursachen hierfür sind neu eingeführte elektronische Halbleiterventile und die Fortschritte der elektronischen Signalverarbeitung. Mit diesen Entwicklungen sind nicht nur theoretische und praktische Neuerungen in den leistungselektronischen Geräten, sondern auch erweiterte Anwendungen verbunden. Darüber hinaus sind viele Arbeitsgebiete der Elektrotechnik wie die elektrische Antriebstechnik, die elektrische Energieverteilung und die Elektrotechnologie, eng mit der Leistungselektronik verbunden. Grundlegende leistungselektronische Kenntnisse werden heute verstärkt in diesen Gebieten benötigt.

Das vorliegende Buch soll als einführendes Lehrbuch in die Leistungselektronik den Leser mit dem systematischen Aufbau und den Arbeitsmethoden dieses Gebietes vertraut machen. Damit soll er in die Lage versetzt werden, die Weiterentwicklungen und Neuerungen zu verstehen und anzuwenden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Erwerben von grundlegenden Kenntnissen und dem Gewinnen von Verständnis für die elektrischen Vorgänge. Es wird auch nicht die Vielzahl vorhandener leistungselektronischer Schaltungen behandelt, sondern es werden an ausgewählten Beispielen die Wirkungsprinzipien gezeigt und die Methoden erarbeitet, mit denen diese beschrieben werden können. Damit soll auch die Basis gelegt werden für das heute mögliche Einbeziehen von Rechnerprogrammen zur Beschreibung leistungselektronischer Schaltungen. Diese können nicht ohne grundlegende Kenntnisse der physikalischen Grundlagen erfolgreich eingesetzt werden.

Der beschriebenen Absicht des Buches dienen auch die jedem Kapitel beigegebenen Aufgaben. Sie sollen den Leser über die aktive Mitarbeit zu einem vertieften Verständnis der elektrischen Vorgänge führen. Zur Erleichterung der Lösung sollten hierbei für einige Aufgaben die am Ende des Buches vorhandenen Kurvenblätter verwendet werden.

Wenn das Buch auch in erster Linie für Studenten der Universitäten, der Technischen Hochschulen und der Technischen Fachhochschulen gedacht ist, so kann es auch dem in seinem Beruf tätigen Ingenieur helfen, sich neue Arbeitsgebiete zu erschließen.

Für das Schreiben des Manuskripts danke ich Frau Wolny. Mein besonderer Dank gilt meinem Sohn Stephan, der das Manuskript zur reproduktionsfertigen Vorlage umgearbeitet hat. Nicht zuletzt gilt mein Dank dem Springer-Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Berlin, Januar 1992

Manfred Michel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundbegriffe und Grundgesetze	5
2.1	Idealisierte Schaltungselemente	5
2.2	Berechnen von Zeitverläufen	7
2.2.1	Periodisches Schalten	10
2.2.2	Schalten – Steuern	11
2.2.3	Eingeschwungener Zustand bei periodischem Schalten	12
2.3	Berechnen von Mittelwerten	13
2.4	Berechnen der Harmonischen	13
2.5	Darstellen der Leistung	16
2.5.1	Beispiel sinusförmige Spannung, nichtsinusförmiger Strom ..	17
3	Elektronische Ventile	19
3.1	Systematische Übersicht	19
3.2	Beispiele elektronischer Ventile	22
3.2.1	Leistungs-Halbleiterdiode	22
3.2.2	Thyristor	25
3.2.3	Abschaltthyristor	30
3.2.4	Bipolarer Transistor	33
3.2.5	MOS-Feldeffekttransistor	37
3.2.6	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	41
3.3	Anwendung elektronischer Ventile	44
3.4	Beschaltung elektronischer Ventile	45
3.5	Ansteuerung elektronischer Ventile	48
3.6	Kühlung elektronischer Ventile	51
3.6.1	Bestimmung der Verluste	52
3.6.2	Thermisches Ersatzschaltbild	54
3.6.3	Anwenden des thermischen Ersatzschaltbildes	59
	Aufgaben zu Kapitel 3	61
	Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 3	65

4	Schaltungsübersicht und Stromübergang zwischen Ventilzweigen . . .	71
4.1	Die Grundsaltungen der Leistungselektronik	71
4.2	Stromübergang zwischen Ventilzweigen	74
4.2.1	Grundprinzip	74
4.2.2	Stromübergang mit abschaltbaren Ventilen	77
4.2.3	Stromübergang mit idealem Schalter	80
4.2.4	Stromübergang ohne Überlappung	81
4.3	Zur Bedeutung des Begriffes Stromübergang	81
4.4	Beispiele zum selbstgeführten Stromübergang	82
	Aufgaben zu Kapitel 4	91
	Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 4	93
5	WS/GS-Umrichter mit eingepägtem Gleichstrom	
	(WS/GS-I-Umrichter)	103
5.1	WS/GS-I-Umrichter mit einschaltbaren Ventilen	103
5.1.1	Netzgeführte WS/GS-I-Umrichter	103
5.1.1.1	Idealisierte Sechspuls-Brückenschaltung	103
5.1.1.2	Netzkommütierung bei der Sechspuls-Brückenschaltung	110
5.1.1.3	Eigenschaften an der WS-Schnittstelle	120
5.1.1.4	Doppel-Stromrichter, Mehrquadrantenbetrieb	129
5.1.1.5	Direktumrichter	131
5.1.2	Lastgeführte WS/GS-I-Umrichter	132
5.1.2.1	Schwingkreiswechselrichter mit Parallelkompensation	133
5.1.2.2	Stromrichter-Synchronmotor	136
5.1.3	Selbstgeführte WS/GS-I-Umrichter	138
5.2	WS/GS-I-Umrichter mit abschaltbaren Ventilen	141
	Aufgaben zu Kapitel 5	143
	Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 5	145
6	WS/GS-Umrichter mit eingepägter Gleichspannung	
	(WS/GS-U-Umrichter)	157
6.1	WS/GS-U-Umrichter mit einschaltbaren Ventilen	157
6.1.1	Netzgeführte WS/GS-U-Umrichter	157
6.1.1.1	Idealisierte Zweipuls-Brückenschaltung	157
6.1.1.2	Stromübergang	159
6.1.2	Lastgeführte WS/GS-U-Umrichter	165
6.1.3	Selbstgeführte WS/GS-U-Umrichter	168
6.1.3.1	Selbstgeführter WS/GS-U-Umrichter mit Phasenfolgelöschung	168
6.1.3.2	Selbstgeführter WS/GS-U-Umrichter mit Phasenlöschung	169
6.2	WS/GS-U-Umrichter mit abschaltbaren Ventilen	170
6.2.1	Einphasige Wechselrichterschaltungen	170

6.2.2	Dreiphasige Wechselrichterschaltungen	173
6.3	Steuerverfahren zur Änderung der Ausgangsspannung	183
6.3.1	Steuerverfahren	184
6.3.2	Pulsbreitenmodulation	186
6.3.3	Bestimmen der Schaltwinkel über die Berechnung der Harmonischen	193
6.3.4	Raumzeiger-Modulation	200
6.3.5	Zweipunktregelung	201
6.3.6	Abweichungen von den ermittelten Pulsmustern	203
6.4	WS/GS-U-Umrichter am starren Netz	203
	Aufgaben zu Kapitel 6	209
	Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 6	211
7	GS-Umrichter	229
7.1	Direkte GS-Umrichter	229
7.1.1	Tiefsetzsteller mit passiver Last	229
7.1.2	Tiefsetzsteller mit Gegenspannung	235
7.1.3	Hochsetzsteller mit Gegenspannung	236
7.2	Indirekte GS-Umrichter	237
7.2.1	Durchflusswandler	238
7.2.2	Sperrwandler	239
7.3	Anwenden von Resonanzschaltungen in GS-Umrichtern	239
7.3.1	Resonanz-Schaltentlastung bei einem Tiefsetzsteller	242
	Aufgaben zu Kapitel 7	249
	Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 7	251
8	WS-Umrichter, Wechselstromsteller	255
8.1	Einschalten von Wechselstrom	255
8.2	Wechselstromsteller	256
8.3	Drehstromsteller	262
	Aufgaben zu Kapitel 8	271
	Lösungen der Aufgaben zu Kapitel 8	273
	Formelzeichen, Indizes	281
	Literaturverzeichnis	287
	Kurvenblätter als Hilfsmittel für das Lösen der Aufgaben zu Kapitel 5	291
	Sachverzeichnis	293

Kapitel 1

Einleitung

Mit **Leistungselektronik** wird das Teilgebiet der Elektrotechnik bezeichnet, das sich mit dem Steuern und Umformen elektrischer Energie mithilfe von elektronischen Ventilen beschäftigt. Dabei werden mit dem Begriff Ventil solche Bauelemente bezeichnet, die abhängig von der Richtung von Strom oder Spannung unterschiedliche elektrische Eigenschaften besitzen.

In der Energietechnik erfolgt Steuern und Umformen so, dass die Energieverluste möglichst klein sind. Deshalb werden in ihr elektronische Ventile ausschließlich im Schalterbetrieb, also umschaltend zwischen den Betriebszuständen AUS und EIN, verwendet.

Bisher wurden Ventile dieser Art mit Stromrichterventil bezeichnet. Als Bauelemente standen dafür anfänglich Quecksilberdampfventile und später Halbleiterbauelemente als Dioden und Thyristoren zur Verfügung. Das Gebiet der Anwendung von Stromrichterventilen wurde mit Stromrichtertechnik bezeichnet. Mit dem Einführen immer leistungsfähigerer Halbleiterbauelemente zusammen mit dem Anwenden der Fortschritte auf dem Gebiet der elektronischen Signalverarbeitung entwickelte sich dann dieses Gebiet zur Leistungselektronik.

Innerhalb des Gesamtgebietes der Leistungselektronik können Teilbereiche benannt werden, in denen die folgenden Arbeitsschwerpunkte zu finden sind:

- **Elektronische Ventilbauelemente**

Bei der Entwicklung und Herstellung elektronischer Ventile steht die Lösung von Problemen aus dem Gebiet der Halbleiterphysik im Vordergrund.

- **Schaltungslehre der Leistungselektronik**

In diesem Teilgebiet werden die sich aus der Anwendung elektronischer Ventile ergebenden Fragen und die des Zusammenwirkens der Ventilbauelemente bearbeitet. Hierzu gehören auch Fragen des konstruktiven Aufbaus von Geräten der Leistungselektronik sowie deren Schutz gegen Überbeanspruchungen.

- **Steuerungstechnik in der Leistungselektronik**

Für das Ansteuern der Ventilbauelemente in einer Schaltung der Leistungselektronik im normalen Betrieb und im Störfall werden elektronische Schaltungen verwendet. Die Steuersignale müssen dabei mit Mitteln der Signalverarbeitung

tung erzeugt und danach für das Ansteuern der elektrischen Ventile verstärkt werden.

– **Anwenden leistungselektronischer Betriebsmittel in geregelten Systemen**

Geräte der Leistungselektronik eignen sich besonders gut als Stellglieder in Regelkreisen. Ihre Beschreibung und das Anpassen an die zu regelnden Strecken spielen eine wichtige Rolle.

– **Zusammenarbeiten leistungselektronischer Geräte mit anderen Betriebsmitteln**

Hierzu gehören Fragen der Rückwirkung leistungselektronischer Geräte auf das speisende Netz und Probleme der gegenseitigen elektromagnetischen Beeinflussung.

Den Schwerpunkt des vorliegenden Buches bilden die Schaltungslehre der Leistungselektronik und die zugehörige Steuerungstechnik. Bei letzterem wird weniger auf die elektrische Auslegung der Komponenten als auf die Steuerprinzipien eingegangen. Diese beiden Gebiete stellen nach wie vor das zentrale Arbeitsfeld der Leistungselektronik dar. Auf die Weiterentwicklung der Leistungselektronik durch das Einführen neuer elektronischer Ventile und durch das Anwenden der Möglichkeiten der Signalelektronik wird eingegangen. Außer den auf dem zentralen Gebiet der Leistungselektronik Tätigen benötigen auch die Anwender leistungselektronischer Geräte das Verständnis der wichtigsten Schaltungen der Leistungselektronik. Auf die übrigen Teilgebiete der Leistungselektronik wird, mit Ausnahme der Anwendung in geregelten Systemen, exemplarisch eingegangen. Dabei werden in einem Kapitel die Gesichtspunkte beim Anwenden elektronischer Ventile behandelt.

Die historische Entwicklung der Leistungselektronik verlief über das Anwenden zunächst ungesteuerter Quecksilberdampfventile für die Bahnstromversorgung zum Einsatz der steuerbaren Quecksilberdampfventile in der Antriebstechnik mit Gleichstrommotoren. Letztere erlebte in den fünfziger Jahren eine Blüte. Mit den in den sechziger Jahren eingeführten Halbleiterventilen, den Thyristoren, verbreiterte sich das Anwendungsgebiet der Leistungselektronik erheblich. Einmal konnten damit elektronische Ventile auch kleiner Leistung wirtschaftlich eingesetzt werden, und zum anderen wurde mit den Halbleiterventilen die mechanische Empfindlichkeit der Quecksilberdampfventile überwunden.

Die bis dahin verwendeten elektronischen Ventile konnten über den Steueranschluss nur eingeschaltet werden. Sie schalteten nur bei einem von den äußeren Schaltungselementen gegebenen Nulldurchgang des Stromes ab. Mit speziellen Thyristoren war es aber möglich, unter Anwenden von Kunstschaltungen, Ventile zu entwickeln, die den Strom auch unterbrechen können. Mit diesen Ventilen und den in der Zwischenzeit zur Verfügung stehenden Mitteln der Signalelektronik war es auch wirtschaftlich möglich geworden, die Drehzahl von Drehstrommotoren über die Frequenz zu steuern. Der hierfür nötige Aufwand verhinderte eine weite Verbreitung dieser Lösungen.

Im letzten Jahrzehnt waren elektronische Ventile eingeführt worden, die sich mit einem Steuersignal nicht nur einschalten lassen sondern auch ausschalten lassen und die gegenüber dem Thyristor wesentlich verbesserte Schalteigenschaften besitzen. Mit ihnen stehen heute elektronische Ventile zur Verfügung, die in verschiedenen Bauformen

von kleinen bis großen Leistungen Anwendung finden. Damit ist das Arbeitsgebiet der Leistungselektronik erneut ausgeweitet worden. Da zurzeit die Entwicklung der abschaltbaren elektronischen Ventile noch im vollen Fluss ist, dauert auch der Prozess an, der neue technische Anwendungen für die Leistungselektronik bringt.

Dabei bieten neue Anwendungen bekannter Schaltungen und neue Steuerverfahren mit gegenüber den früheren Anwendungen erheblich gesteigerten Frequenzen Möglichkeiten, die Zeitverläufe von Strömen und Spannungen zu beeinflussen. Damit wird es möglich, die elektrischen Größen an der Eingangs- und der Ausgangsseite leistungselektronischer Geräte einer harmonischen Funktion von Netzfrequenz gut anzunähern. Die dem Schalterbetrieb anhaftende starke Nichtlinearität, die die leistungselektronischen Geräte kennzeichnet, ist dann nach außen über die Klemmen nicht mehr spürbar.

Die heute weit verbreitete Anwendung von abschaltbaren elektronischen Ventilen in den Schaltungen der Leistungselektronik bringt es mit sich, dass das Prinzip der Führung eines Stromrichters, also die Herkunft der Kommutierungsspannung, nicht mehr die herausragende Rolle spielt wie bei den Stromrichtern mit einschaltbaren Ventilen. Eine Einteilung des Gebietes der Leistungselektronik wird in dem vorliegenden Buch deshalb nach dem Gesichtspunkt vorgenommen, welche der Größen Strom oder Spannung auf welcher Seite einer Kombination elektronischer Ventile eingepreßt ist. Die Orientierung erfolgt an den Schaltungen mit eingepreßter Gleichspannung und eingepreßtem Gleichstrom. Außerdem wird der Begriff Umrichter als Oberbegriff einmal für Gleich- und Wechselrichter und zum anderen für Strom- und Spannungsrichter verwendet. Darauf wird im Kap. 4 eingegangen.

Kapitel 2

Grundbegriffe und Grundgesetze

Für das Verstehen der Wirkungsweise von Geräten und Systemen der Leistungselektronik ist es hilfreich, die Prinzipien in einigen Grundschaltungen genau zu kennen. Diese lassen sich mithilfe weniger idealisierter Schaltungselemente beschreiben. Hierfür werden als Energiewandler Spannungs- und Stromquellen und Widerstände sowie Transformatoren und als Energiespeicher Spulen und Kondensatoren verwendet. Für das Studium der Prinzipien genügt es, die Ventilbauelemente durch ideale Schalter darzustellen. Auch die Wirkungsweise komplizierterer Schaltungen der Leistungselektronik lässt sich meist ausreichend genau mit idealen Schaltern beschreiben. Erst für ein genaues Beschreiben der Vorgänge in diesen Schaltungen wird es erforderlich sein, das Schaltverhalten der Ventilbauelemente in die Berechnungen einzubeziehen.

2.1 Idealisierte Schaltungselemente

Das Kennzeichen der **idealen Spannungsquelle** (Abb. 2.1a) ist, dass ihre Klemmenspannung den vorgegebenen Wert ohne Einfluss des von ihr geführten Stromes behält. Sie ist eine Quelle mit eingepprägter Spannung. Die Klemmenspannung u kann dabei einen vorgegebenen Zeitverlauf $u = u(t)$ – Beispiel $u = \hat{u} \sin \omega t$ Quelle einer sinusförmigen Spannung – oder einen konstanten Wert $u = U_d$ – Gleichspannungsquelle – besitzen.

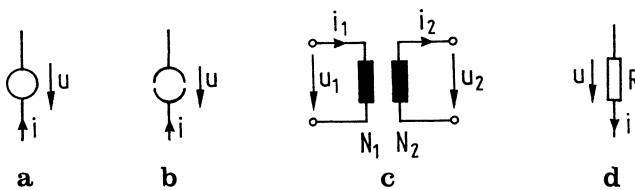


Abb. 2.1 Idealisierte Energiewandler: **a** Spannungsquelle, **b** Stromquelle, **c** Transformator, **d** Widerstand

Der Strom wird von den an die Spannungsquelle angeschlossenen Elementen bestimmt. Dadurch wird sein Zeitverlauf und damit auch die Richtung festgelegt. Die Richtung des Stromes in Bezug auf die Richtung der Spannung bestimmt, ob die Spannungsquelle elektrische Energie in die Schaltung speist oder aus ihr entnimmt. Da die Vorzeichen von Spannung und Strom nach dem Verbraucherzählpfeilsystem gewählt werden, stimmt die Richtung von Spannung und Strom bei Aufnahme elektrischer Energie überein. Bei Abgabe elektrischer Energie haben dann Spannung und Strom entgegengesetzte Richtung.

Nicht alle technischen Spannungsquellen sind für das Umkehren der Richtung des Energieflusses geeignet. Dann kann ihr Verhalten nicht durch das Element ideale Spannungsquelle allein beschrieben werden.

Bei einer **idealen Stromquelle** (Abb. 2.1b) wird der Strom unabhängig von der sich ausbildenden Klemmenspannung vorgegeben. Die Quelle arbeitet mit eingepprägtem Strom. Im Falle einer Quelle für sinusförmigen Strom gilt $i = \hat{i} \sin \omega t$ oder im Falle der Gleichstromquelle $i = I_d$.

Zeitverlauf und Richtung der Klemmenspannung hängen von den mit der Stromquelle verbundenen Elementen ab. Bezüglich der Abgabe oder Aufnahme elektrischer Energie gilt das für die Spannungsquelle Gesagte hier entsprechend.

Der **ideale Transformator** (Abb. 2.1c) wandelt die Klemmengrößen von Primär- und Sekundärseite mit dem Übersetzungsverhältnis N_1/N_2 um:

$$\begin{aligned} \text{Klemmenspannungen: } \frac{u_1}{u_2} &= \frac{N_1}{N_2}, \\ \text{Ströme: } \frac{i_1}{i_2} &= \frac{N_2}{N_1}. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Bei einem mehrphasigen Transformator kann je nach der verwendeten Schaltgruppe eine Phasenverschiebung zwischen den Größen auf der Primär- und Sekundärseite auftreten.

Der ideale Transformator hat keine Verluste und zu jedem Zeitpunkt besteht Leistungsgleichgewicht zwischen Primär- und Sekundärseite.

Im **Widerstand** R (Abb. 2.1d) wird elektrische Energie vollständig in Wärme umgewandelt. Die Klemmengrößen gehorchen dem Ohm'schen Gesetz:

$$u = Ri, \quad R = \text{const.} \tag{2.2}$$

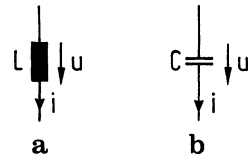
Die umgesetzte Leistung ist $p = u^2/R$ oder $p = i^2R$.

Das Element **ideale Spule** wird durch seine Induktivität $L = \text{const}$ gekennzeichnet (Abb. 2.2a). Die Klemmengrößen stehen miteinander in der Beziehung:

$$u = L \frac{di}{dt}. \tag{2.3}$$

In diesem Element wird Energie im magnetischen Feld gespeichert. Diese hat, wenn die Spule mit der Induktivität L vom Strom i durchflossen wird, den Betrag $w = 1/2 Li^2$.

Abb. 2.2 Idealisierte Energiespeicher: **a** Spule, **b** Kondensator



Das Element *idealer Kondensator* wird durch seine Kapazität $C = \text{const}$ beschrieben (Abb. 2.2b). Für die Klemmengrößen gilt:

$$i = C \frac{du}{dt} . \quad (2.4)$$

Energie wird im elektrischen Feld gespeichert. Sie hat, wenn der Kondensator mit der Kapazität C auf eine Spannung u aufgeladen ist, den Betrag $w = 1/2 Cu^2$.

Ein **idealer Schalter** führt im geschlossenen Zustand einen beliebigen Strom, ohne dass eine Spannung an ihm abfällt ($u = 0$) und hält im geöffneten Zustand eine beliebige Spannung, ohne dass ein Strom fließt ($i = 0$). Die Übergänge zwischen diesen Zuständen erfolgen ohne Verzögerungen und können zeitlich zu einem frei wählbaren Zeitpunkt vorgenommen werden.

Bei der Nachbildung von Ventilbauelementen durch ideale Schalter werden von diesen Annahmen mitunter einige modifiziert. Es werden ideale Schalter für eine bestimmte Strom- oder Spannungsrichtung in den Ersatzschaltungen verwendet.

Für das Studium der Prinzipien der Grundsaltungen werden die idealen Elemente einer Schaltung ideal miteinander verschaltet. Es wird angenommen, dass die Verbindungsleitungen sowohl keinen Widerstand haben als auch keine Induktivitäten und Kapazitäten bilden. Für eine erste Näherung bei der Beschreibung der Verhältnisse von praktischen Aufbauten können ideale Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten in die Schaltungen eingefügt werden, mit denen die Eigenschaften der Verbindungsleitungen angenähert beschrieben werden.

2.2 Berechnen von Zeitverläufen

Mit den Zeitverläufen von Strömen und Spannungen sind meist ausreichende Einblicke in die Wirkungsweise der Schaltungen zu gewinnen. Deshalb stellt ihre Berechnung ein wichtiges Hilfsmittel zum Verstehen der Wirkungsweise der verwendeten Schaltungen dar.

Die Verbindung der Schaltungselemente in den Schaltungen führt über die Kirchhoff'schen Gesetze zu Differenzialgleichungen, deren Lösung die Zeitverläufe liefert. Werden dabei diskrete Schaltungselemente in den Schaltungen verwendet, dann sind die Differenzialgleichungen von gewöhnlicher Art. Für einfache Schaltungen sind sie meist geschlossen lösbar. Für kompliziertere Schaltungen stehen Rechnerprogramme zur Verfügung. Dabei können sowohl Programme zur Lösung von Differenzialgleichungen als auch Programme, die aus dem vorgegebenen Schaltbild die Differenzialgleichungen aufstellen und lösen, verwendet werden.

Als Beispiel sei die Schaltung gewählt, mit der es möglich ist, eine konstante Gleichspannung in eine Spannung mit einstellbarem Mittelwert umzuwandeln: Grundschialtung des Gleichspannungswandlers. Diese ist in der Abb. 2.3 dargestellt. Dabei zeigt die Abb. 2.3a die Grundschialtung mit einem idealen Umschalter. In der Abb. 2.3b ist dargestellt, wie diese Schaltung mit einem Schalttransistor und einer Diode praktisch ausgeführt werden kann. Dabei wird mit einer Spannungsquelle gearbeitet, so dass für die Berechnung eine eingepreßte Spannung angenommen werden kann. Die Last ist passiv Ohm'sch-induktiv. Dieser Anordnung entsprechen viele Anwendungsfälle. Bei anderen Anwendungsfällen ist eine eingepreßte Gleichspannung zusätzlich im Lastkreis anzunehmen.

Aus dem Ruhezustand wird die Last durch Umlegen des Schalters S eingeschaltet. Für die sich dann ergebende Masche gilt die Gleichung (Abb. 2.3c):

$$iR + L \frac{di}{dt} - U_0 = 0. \quad (2.5)$$

Zu dieser Differenzialgleichung kommt die Anfangsbedingung hinzu:

$$t = 0, \quad i = 0.$$

Als lineare Differenzialgleichung 1. Ordnung hat sie die allgemeine Lösung:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} + C_E \exp(-t/\tau). \quad (2.6)$$

Hierin ist $\tau = L/R$. Mit der Anfangsbedingung lässt sich die Konstante C_E bestimmen. $C_E = -U_0/R$. Damit ergibt sich die spezielle Lösung für das Einschalten:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} (1 - \exp(-t/\tau)). \quad (2.7)$$

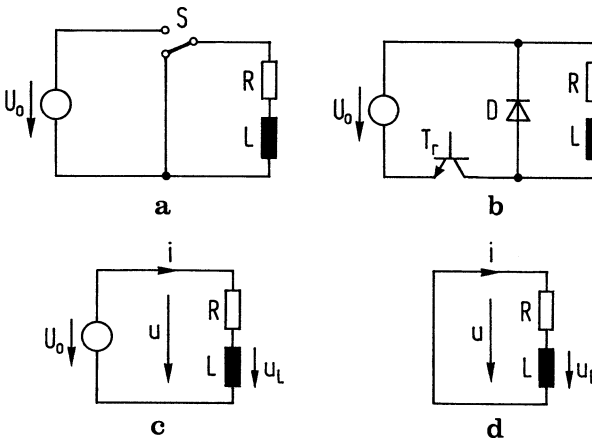


Abb. 2.3 Grundschialtung Gleichspannungswandler: **a** Prinzipschialtung mit idealem Schalter, **b** Ausführung mit Schalt-Transistor und Freilaufdiode, **c** Ersatzbild für den eingeschalteten Zustand, **d** Ersatzbild für den ausgeschalteten Zustand

Durch erneutes Umlegen des Schalters S wird die Last von der Spannungsquelle getrennt und kurzgeschlossen. Für den ideal angenommenen Schalter verläuft das ohne Zeitverzug. Für die kurzgeschlossene Last ergibt sich (Abb. 2.3d):

$$iR + L \frac{di}{dt} = 0. \quad (2.8)$$

Es sei angenommen, dass vor dem erneuten Umschalten der Strom in der Last den Wert $i = U_0/R$ hat. Dann ist die Anfangsbedingung für den neuen Schaltzeitpunkt $t = 0$: $i = U_0/R$.

Die allgemeine Lösung lautet:

$$i(t) = C_A \exp(-t/\tau). \quad (2.9)$$

Mit C_A ist die Integrationskonstante für das Ausschalten bezeichnet. Aus der Anfangsbedingung ergibt sich $C_A = U_0/R$ und damit die spezielle Lösung:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \exp(-t/\tau). \quad (2.10)$$

In der Abb. 2.4 sind diese Lösungen dargestellt. Zu beachten ist, dass an der Ohm'sch-induktiven Last der Strom sich nicht sprunghaft ändert, sein Zeitverlauf hat im Schaltaugenblick einen Knick. Die Spannung an der Induktivität u_L springt im Schaltaugenblick.

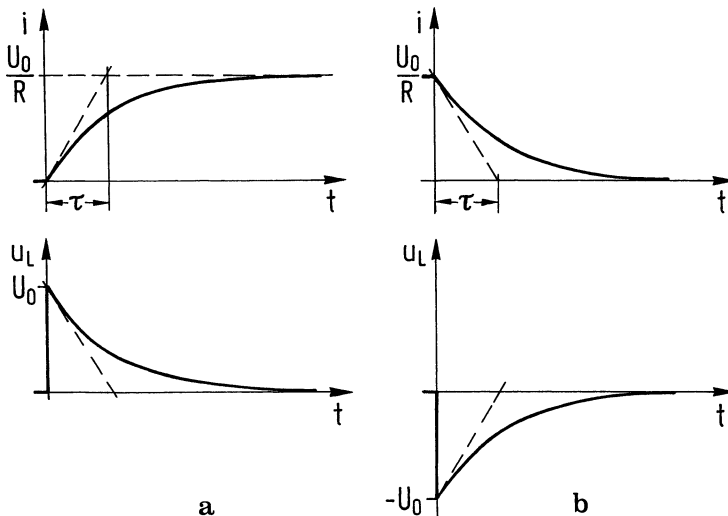


Abb. 2.4 Zeitverläufe i und u_L am Gleichspannungswandler: **a** Einschalten aus dem energiefreien Zustand, **b** Ausschalten des maximalen Stromes

2.2.1 Periodisches Schalten

Wird der Schalter nicht nur zum Ein- und Ausschalten benutzt, sondern wiederholt betätigt, so kann der Mittelwert der Spannung an der Last verstellt oder gesteuert werden. Es soll der Fall betrachtet werden, dass der Schalter periodisch umgeschaltet wird.

Die Zeitverläufe von i und u_L können mit (2.7) und (2.10) berechnet werden. Da der Strom in den Schaltzeitpunkten nicht springt, ist der Endwert des Stromes in einem Intervall zugleich der Anfangswert im nächsten Intervall.

Die Abb. 2.5 zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung. Während des Zeitabschnittes T_E liegt die Spannung U_0 am Verbraucher. Während des Zeitabschnittes T_A ist der Verbraucher kurzgeschlossen. Die Periodendauer ist $T_S = T_E + T_A$. Da sich die Spannung am Verbraucher nur zwischen den Werten Null und U_0 ändert, geht ihr arithmetischer Mittelwert

$$U_{AV} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u(t) dt$$

aus dem Zeitverlauf unmittelbar hervor:

$$U_{AV} = \frac{T_E}{T_S} U_0 . \tag{2.11}$$

Der arithmetische Mittelwert der Spannung kann mit der Steuergröße T_E/T_S ver-
stellt werden.

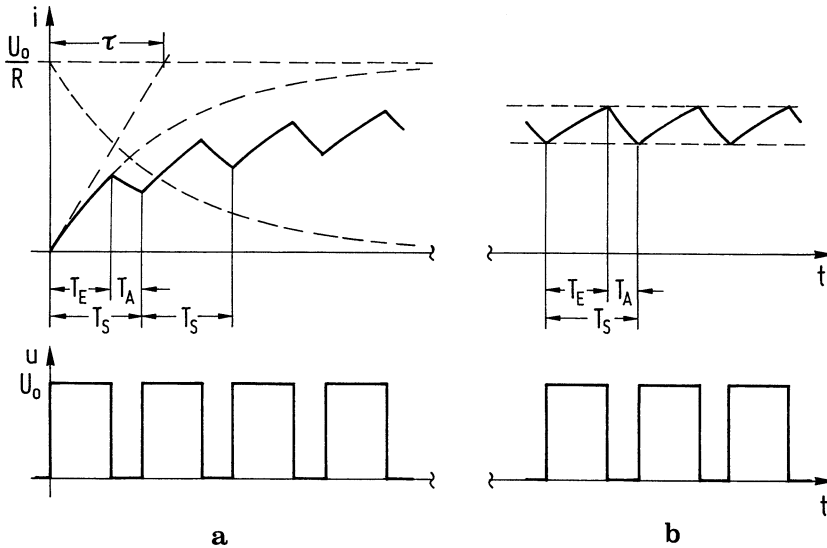


Abb. 2.5 Gleichspannungswandler bei periodischem Schalten: **a** Einschalten aus dem energiefreien Zustand, **b** eingeschwungener Zustand

2.2.2 Schalten – Steuern

Es ist aus der Abb. 2.5 ersichtlich, dass das Verhältnis der Zeitkonstanten τ der Last zur Periodendauer T_S einen großen Einfluss auf den Zeitverlauf des Stromes hat. Dieses Verhältnis kann dazu benutzt werden, den Unterschied zwischen Schalten und Steuern zu definieren:

Schaltender Betrieb liegt dann vor, wenn die Periodendauer sehr viel größer ist als die Zeitkonstante: $T_S \gg \tau$.

Steuender Betrieb liegt dagegen vor, wenn die Periodendauer etwa so groß oder kleiner als die Zeitkonstante ist. $T_S \sim \tau$ oder $T_S < \tau$.

Beim schaltenden Betrieb erreicht die Ausgangsgröße den jeweiligen Endwert innerhalb eines Schaltintervalls.

Beim steuernden Betrieb pendelt die Ausgangsgröße zwischen Werten, die nicht den Grenzwerten entsprechen.

Das sei mit dem Beispiel einer Temperatur-Steuerung näher erläutert. Mit den Ventilen V_1 und V_2 in der Schaltung der Abb. 2.6a kann die Wechselspannung u auf

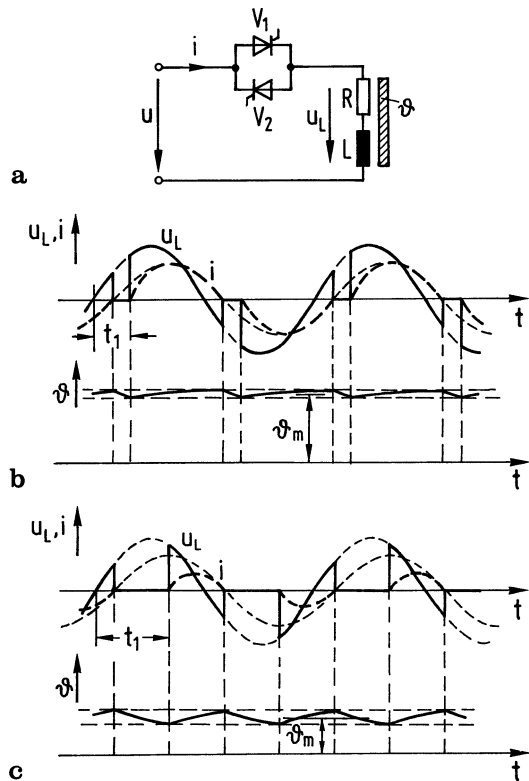


Abb. 2.6 Zum Unterschied der Betriebsarten Schalten – Steuern: **a** Schaltung, **b** und **c** Zeitverläufe bei zwei verschiedenen Steuerzeiten.

den Verbraucher RL geschaltet werden. Die Ventile führen abwechselnd in einer Halbperiode den Strom. Die Leistung wird einem Wärmespeicher zugeführt. Seine Temperatur ist mit ϑ bezeichnet. Die elektrische Zeitkonstante $\tau_{el} = L/R$ ist sicher wesentlich kleiner als die thermische Zeitkonstante τ_{th} des Speichers.

In den Abb. 2.6b und c sind die sich ergebenden Zeitverläufe von Spannung am Verbraucher u_L , Strom i und Temperatur ϑ eingezeichnet. Die Ventile werden jeweils um die Zeitdauer t_1 verzögert gegenüber dem Nulldurchgang der Spannung u eingeschaltet. Gegenüber der Halbperiode ist τ_{el} klein, so dass der Strom innerhalb der Halbperiode den Endwert des Ausgleichsvorganges erreicht. Dieser ist in diesem Beispiel der Wechselstrom, der fließt, wenn der Verbraucher RL direkt an der Wechselspannung liegt. Er ist in der Abb. 2.6 dünn unterbrochen dargestellt. Bei Abb. 2.6b ist ein kleinerer Wert für t_1 gewählt als bei 2.6c. Trotzdem erreicht der elektrische Ausgleichsvorgang in beiden Fällen praktisch den Endwert.

Wegen $\tau_{th} \gg \tau_{el}$ erreicht die Temperatur ϑ innerhalb der Halbperiode nicht einen Endwert. Sie schwankt mit kleinen Abweichungen um den Mittelwert ϑ_m . Dieser kann mit der Steuerzeit t_1 verstellt werden.

Aus dem Beispiel geht hervor, dass für den elektrischen Strom schaltender Betrieb und für die Temperatur steuernder Betrieb vorliegt.

2.2.3 Eingeschwungener Zustand bei periodischem Schalten

Während unmittelbar nach dem Einschalten sich der arithmetische Mittelwert des Stromes von Intervall zu Intervall ändert (Abb. 2.5a), wird nach einiger Zeit ein Zustand erreicht, bei dem der arithmetische Mittelwert des Stromes von Intervall zu Intervall gleich bleibt. Dieser Zustand – eingeschwungener oder quasistationärer Zustand – ist dadurch gekennzeichnet, dass am Ende eines Intervalles der Strom denselben Wert wie zu Beginn des Intervalles besitzt (Abb. 2.5b).

Für diesen quasistationären Zustand lassen sich für das Beispiel des Gleichspannungswandlers die Integrationskonstanten aus den genannten Anfangsbedingungen herleiten:

$$C_E = \frac{\exp(-T_A/\tau) - 1}{1 - \exp(-T_S/\tau)}, \quad C_A = \frac{1 - \exp(-T_E/\tau)}{1 - \exp(-T_S/\tau)}. \quad (2.12)$$

Mit diesen Konstanten lassen sich die Zeitverläufe in den Intervallen des quasistationären Zustandes angeben.

$$\text{Im Bereich } 0 \leq t \leq T_E: \quad i(t) = \frac{U_0}{R} \left(C_E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + 1 \right), \quad (2.13)$$

$$\text{Im Bereich } T_E \leq t \leq T_S: \quad i(t) = \frac{U_0}{R} C_A \exp\left(-\frac{t - T_E}{\tau}\right). \quad (2.14)$$