

1

Leistungselektronik: Eine Basistechnologie

Leistungselektronische Systeme sind für die Nachhaltigkeit in der Energieversorgung entscheidend und spielen bei der Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung und der Verbesserung der Effizienz bei der Energieübertragung und beim Verbrauch eine wesentliche Rolle. Wichtige Anwendungen der Leistungselektronik umfassen:

- Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Wind- und Solarenergie mittels Photovoltaik.
- Die Speicherung von Strom in Batterien und Schwungrädern, um die Schwankungen bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auszugleichen.
- Die Verbesserung der Effizienz der Stromübertragung.
- Die Steigerung der Effizienz des Stromverbrauchs in motorbetriebenen Systemen und in Beleuchtungssystemen.

In diesem einleitenden Kapitel wird ein Überblick über alle oben genannten Themen gegeben. Nähere Erläuterungen zu den jeweiligen Themen finden sich in den folgenden Kapiteln.

1.1 Einführung in die Leistungselektronik

Leistungselektronik ist diejenige Technologie, die eine elektrische Quelle mit einer elektrischen Last verbindet (Abb. 1.1). Diese Quellen und Lasten unterscheiden sich oft in Frequenz, Spannung und Anzahl der Phasen. Die Leistungselektronik-Schnittstelle ermöglicht die Leistungsübertragung durch Umwandlung von Spannungen und Strömen, wobei die Quelle und die Last bei Bedarf ihre Rollen tauschen können. Der Regler in Abb. 1.1 steuert diese Leistungsübertragung und strebt dabei eine hohe Energieeffizienz und Leistungsdichte an. Eine typische Anwendung dafür sind regelbare elektrische Antriebe, wie sie beispielsweise in Windturbinen verwendet werden, und Netzteile in der Haushaltselektronik.

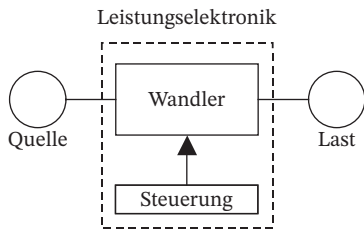


Abb. 1.1 Leistungselektronik als Schnittstelle zwischen Quelle und Last.

1.2 Anwendungen und die Rolle der Leistungselektronik

Für Leistungselektronik und elektrische Antriebe gibt es zahlreiche Anwendungen. Im Folgenden sind einige wichtige Beispiele und ihre Rolle im praktischen Einsatz beschrieben.

1.2.1 Stromversorgungen in der Informationstechnologie

Die meisten Geräte in der Unterhaltungselektronik, wie Personal Computer (PCs) und Musiksysteme, benötigen intern niedrige Gleichspannungen. All diese Geräte verwenden Schaltnetzteile, um die Eingangsspannung in eine geregelte Gleichspannung auf niedrigem Niveau umzuwandeln (Abb. 1.2a).

Abbildung 1.2b zeigt eine verteilte Architektur, die häufig in Computern verwendet wird. Hier wird die Wechselspannung aus dem Versorgungsnetz zunächst in eine Gleichspannung (z. B. 24 V) umgewandelt. Diese halbgergelte Spannung wird dann innerhalb des Computers verteilt, wobei Bordnetzteile auf den einzelnen Leiterplatten diese dann weiter in eine niedrigere, eng geregelte Spannung (z. B. 5 V DC) umwandeln. Moderne Schaltungen und höhere Logikgeschwindigkeiten erfordern noch niedrigere Betriebsspannungen, wie z. B. 3.3 V, 1 V oder im Extremfall nur 0.5 V.

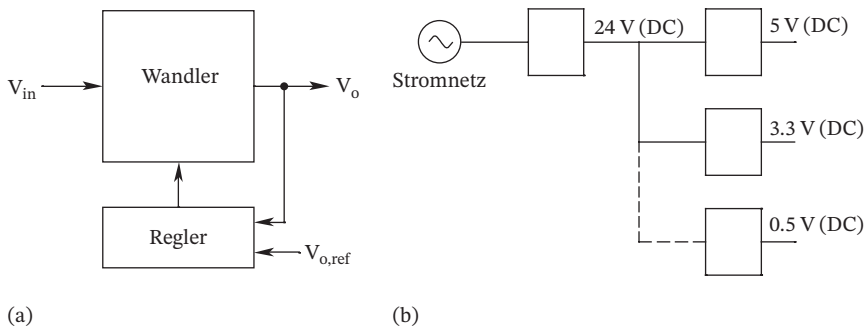


Abb. 1.2 Geregelte Niederspannungs-DC-Netzteile.

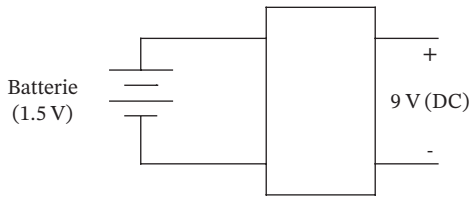


Abb. 1.3 DC-DC-Aufwärtswandler für batteriebetriebene Geräte.

Viele Geräte, wie Mobiltelefone, arbeiten mit niedrigen Batteriespannungen aus einer oder zwei Batteriezellen. Die zu versorgende elektronische Schaltung benötigt jedoch oft höhere Spannungen, was einen Aufwärtswandler (boost converter) erforderlich macht, der die Eingangsgleichspannung erhöht (Abb. 1.3).

1.2.2 Robotik und flexible Produktion

Robotik und flexible Produktion sind für die industrielle Wettbewerbsfähigkeit in der globalen Wirtschaft entscheidend. Diese Anwendungen benötigen steuerbare Antriebe für präzise Geschwindigkeits- und Positionsregelung. Das Blockdiagramm in Abb. 1.4 veranschaulicht solch regelbare Antriebe. Hier verarbeitet der Wechselstromeingang eine einphasige oder dreiphasige Versorgungsquelle mit einer Netzfrequenz von 50 oder 60 Hz. Die Leistungselektronik fungiert als Wandler (alternative Bezeichnung: Umrichter) und liefert die erforderliche Spannung an den Motor. Für einen Gleichstrommotor liefert die Leistungselektronik eine Gleichspannung mit einstellbarer Größe zur Steuerung der Motordrehzahl. Für einen Wechselstrommotor wird für diesen Zweck eine sinusförmige Wechselspannung mit einstellbarer Amplitude und Frequenz geliefert (sog. Wechselrichter). In einigen Fällen ist es notwendig, dass der Wandler auch einen bidirektionalen Leistungsfluss zwischen der Versorgungsspannung und der Motorlast ermöglicht.

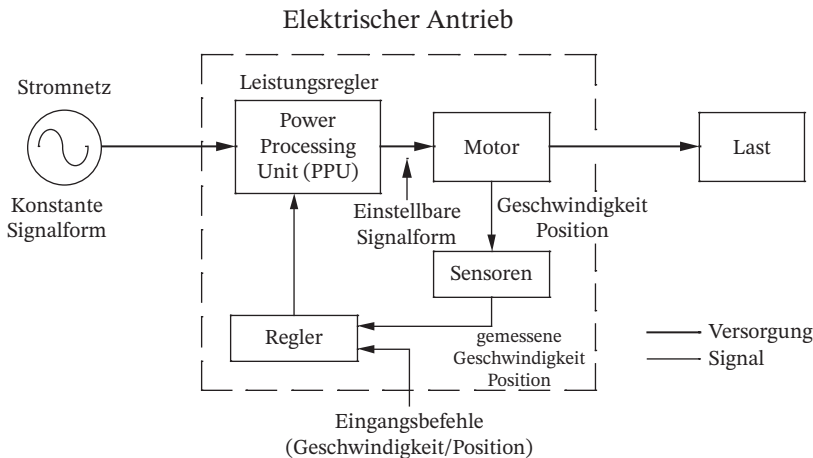


Abb. 1.4 Blockschaltbild eines geregelten Antriebs.

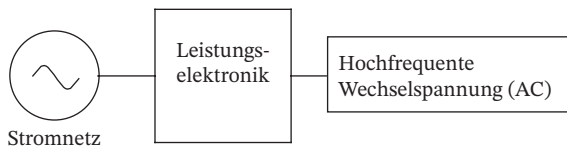


Abb. 1.5 Blockschaltbild einer Induktionsheizung.

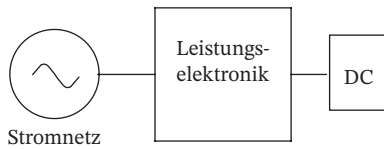


Abb. 1.6 Blockschaltbild eines Elektroschweißgeräts.

Induktionsheizung und elektrisches Schweißen sind weitere bedeutende industrielle Anwendungen der Leistungselektronik in der flexiblen Produktion. Diese sind in den Abbn. 1.5 und 1.6 dargestellt.

1.3 Leistungselektronik und erneuerbare Energien

In den Vereinigten Staaten werden etwa 40 % der gesamten verbrauchten Energie in Elektrizität umgewandelt. Dieser Wert könnte auf 60 % steigen, wenn die Nutzung von Elektro- und Plug-in-Hybridautos sowie Hochgeschwindigkeitsbahnen zunimmt. Um diesen Mehrbedarf auf umweltfreundliche Weise zu decken, muss mehr Elektrizität aus erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne (derzeit nur 4 %) erzeugt werden. Um diese oft abgelegenen Ressourcen zu nutzen und die erzeugte Elektrizität effizienter zu verwenden, wird zusätzlich ein modernes und intelligentes Stromnetz benötigt. In beiden Fällen spielt die Leistungselektronik eine zentrale Rolle.

1.3.1 Energiesparmaßnahmen

Energiesparen spart nicht nur Geld, sondern kommt auch der Umwelt zugute. Das Tortendiagramm in Abb. 1.7 zeigt die prozentuale Nutzung von Elektrizität in den Vereinigten Staaten in verschiedenen Anwendungsbereichen. Im Folgenden werden die Möglichkeiten zur Energieeinsparung in diesen Bereichen erörtert.

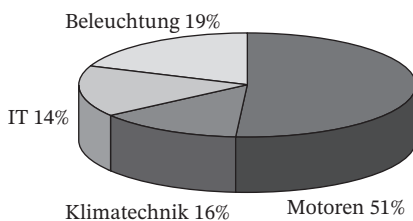


Abb. 1.7 Anteil des Stromverbrauchs für verschiedene Anwendungen in den USA. (Hinweis: Die Abbildung stammt aus der englischen Ausgabe dieses Buches aus dem Jahre 2003).

1.3.1.1 Elektromotorisch betriebene Systeme

Elektromotoren, insbesondere solche, die in Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen verwendet werden, verbrauchen zwischen der Hälfte und zwei Dritteln der gesamten erzeugten Elektrizität. Traditionell arbeiten diese motorbetriebenen Systeme mit konstanter Geschwindigkeit. In einer Pumpe wird beispielsweise die Durchflussrate über ein Drosselventil geregelt, wodurch ein Teil der elektrischen Pumpleistung ungenutzt bleibt. Diese Verschwendung durch passive Regelung kann durch den Einsatz einer Leistungselektronik für drehzahlverstellbare Elektromotoren beseitigt werden (Abb. 1.8), welche die Motor- und Pumpengeschwindigkeit deutlich effizienter steuert [1, 2].

In den Vereinigten Staaten nutzt eines von drei neuen Häusern eine elektrische Wärmepumpe. Ein drehzahlregelbarer Antrieb (Adjustable Speed Unit, ASU) kann in diesen Systemen den Energieverbrauch um bis zu 30 % [3] reduzieren, indem das Ein- und Ausschalten des Kompressors vermieden und die Leistung der Wärmepumpe (oder einer Klimaanlage) an die thermische Last des Gebäudes angepasst wird. Ein Bericht des Energieministeriums [4] schätzt, dass eine effizientere Betriebsweise all dieser motorbetriebenen Systeme in den Vereinigten Staaten jährlich so viel Elektrizität einsparen könnte, wie der gesamte Staat New York jährlich verbraucht.

1.3.1.2 Beleuchtung mit LEDs

Wie aus dem Tortendiagramm in Abb. 1.7 hervorgeht, wird etwa ein Fünftel der in den USA erzeugten Elektrizität für die Beleuchtung verwendet. LEDs (lichtemittierende Dioden) können diese Effizienz um mehr als das Sechsfache steigern. Sie bieten eine längere Lebensdauer und sind mittlerweile genauso erschwinglich wie Glühlampen. Allerdings wird auch hier eine Leistungselektronik benötigt, um in Europa die 230 V, 50 Hz Netzspannung in eine passende Gleichspannung für die LEDs umzuwandeln (Abb. 1.9).

1.3.1.3 Transport und Verkehr

Elektrische Antriebe bieten ein erhebliches Potenzial zur Energieeinsparung im Transportwesen. Die Bemühungen, kommerziell einsetzbare Elektrofahrzeuge (EVs) einzuführen, gehen gut voran und sind von Fortschritten in der Batterie-[5] und Brennstoffzellentechnologie [6] begleitet. Auch Hybrid-Elektrofahrzeuge

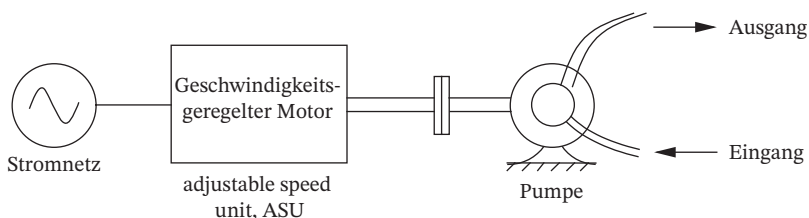


Abb. 1.8 Drehzahl geregelter Antrieb in einem pumpenbetriebenen System.

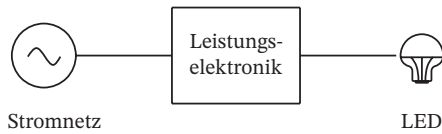


Abb. 1.9 Leistungselektronik für LEDs.

(HEVs) haben einen erheblichen Einfluss [7]. Laut Herstellerangaben beträgt der mittlere Benzinverbrauch des in der Abb. 1.10 gezeigten Hybrid-Elektrofahrzeugs 4.89 l/100 km [8] im kombinierten Stadt- und Autobahnverkehr. Dies ist im Vergleich zu einem Durchschnitt von 10.6 l pro 100 km für Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotor [9] ein ausgezeichneter Wert. Da Automobile etwa 20 % aller CO₂-Emissionen verursachen [10], würde eine Verdoppelung ihrer Reichweite der Umwelt erheblich zugutekommen.

Leistungselektronik für verschiedene Hilfsanwendungen ist bereits seit langem in konventionellen Automobilen zu finden [11]. EVs (electric vehicles) und HEVs (hybrid electric vehicles) benötigen Leistungselektronik jedoch in Form von regelbaren elektrischen Antrieben, wodurch die Leistungselektronik in diesen Fahrzeugen völlig unverzichtbar wird. Darüber hinaus sind auch andere Transportsysteme wie Stadtbahnen, Fly-by-Wire-Flugzeuge, vollelektrische Schiffe und Drive-by-Wire-Automobile auf Leistungselektronik angewiesen.

1.3.2 Erneuerbare Energien

Saubere und erneuerbare Energie kann aus Sonne und Wind gewonnen werden. In photovoltaischen Systemen erzeugen Solarzellen Gleichstrom, wie durch die I-V-Kennlinie in Abb. 1.11a veranschaulicht wird. Nur mit Hilfe der Leistungselektronik kann diese Energie dann in das Stromnetz übertragen werden (Abb. 1.11b).

Auch Windenergie, die sich durch ihr schnelles Wachstum und großes Potenzial [12] auszeichnet, erfordert Leistungselektronik. Bei Windkraftanlagen koppeln

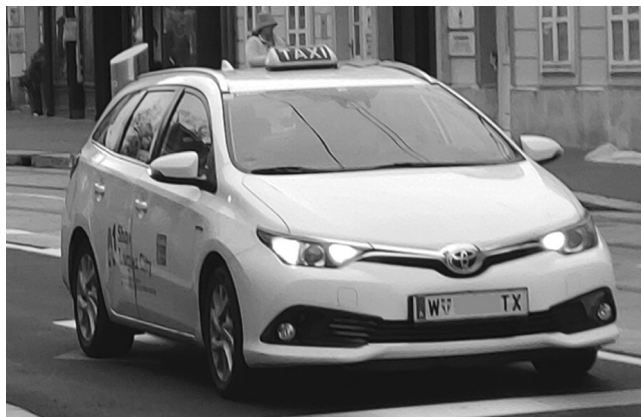


Abb. 1.10 Ein bei Wiener Taxifahrern sehr beliebtes Hybridfahrzeug mit beindruckend geringem Verbrauch und attraktivem Design.

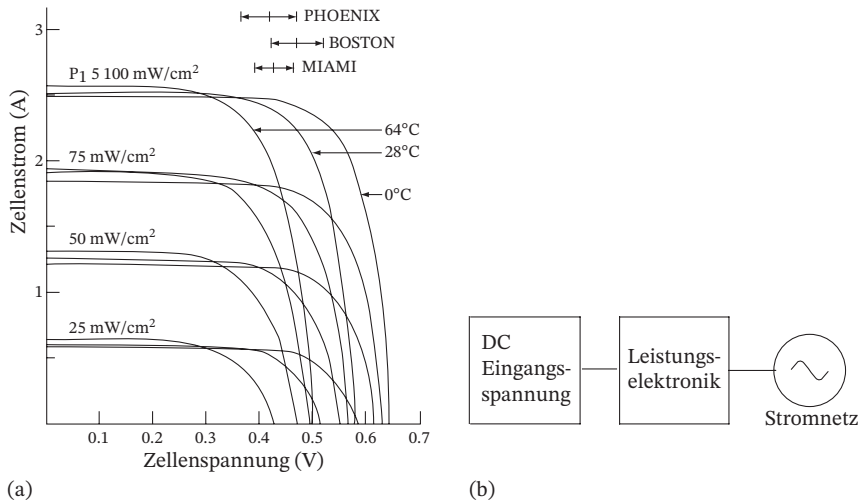


Abb. 1.11 (a) Kennlinien photovoltaischer Systeme und (b) zugehöriges Blockschaltbild für die Netzeinspeisung.

leistungselektronische Systeme den erzeugten Wechselstrom mit variabler Frequenz an die Netzfrequenz-Wechselspannungen des Stromnetzes an (Abb.1.12).

1.3.3 Leistungselektronik in der Energieversorgung

Leistungselektronik wird in Energiesystemen zunehmend wichtiger. In der dezentralen Energieerzeugung verbindet die Leistungselektronik nicht-konventionelle Energiequellen wie Wind, Photovoltaik und Brennstoffzellen mit dem Versorgungsnetz. Die Leistungselektronik ermöglicht die Steuerung des Leistungsflusses auf Übertragungsleitungen, was in einem deregulierten Versorgungsumfeld von entscheidender Bedeutung ist. Darüber hinaus treibt die Notwendigkeit sicherer und effizienter Betriebsabläufe in Versorgungssystemen den verstärkten Einsatz von Leistungselektronik voran.

Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) sind für kritische Lasten die keine Stromunterbrechungen erfahren dürfen, unerlässlich. Die Leistungselektronik für eine USV (Abb. 1.13) weist an beiden Enden Spannungen mit Netzfrequenz

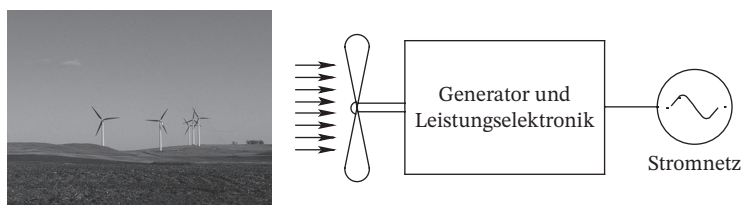


Abb. 1.12 Windkraftanlage mit zugehörigem Blockschaltbild.



Abb. 1.13 Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV).

auf (möglicherweise mit unterschiedlichen Phasen). Energiespeicher, die typischerweise durch Batterien bereitgestellt werden, gewährleisten die Stromversorgung der Last während der Versorgungsunterbrechungen.

1.3.4 Raumfahrt- und militärische Anwendungen

Leistungselektronik ist ebenfalls entscheidend für die Weltraumforschung und interplanetare Missionen. Auch ihre Bedeutung im Verteidigungsbereich hat nach dem 11. September erheblich zugenommen. In Panzern, Schiffen und Flugzeugen kann der Ersatz von hydraulischen Systemen durch elektrische Antriebe erhebliche Vorteile in Bezug auf Kosten, Gewicht und Zuverlässigkeit bieten.

1.4 Effizienz und Leistungsdichte

Leistungselektronische Systeme müssen energieeffizient, zuverlässig und kosteneffektiv sein, sowie eine hohe Leistungsdichte haben. Eine hohe Energieeffizienz ist entscheidend, da sie die Betriebskosten durch Minimierung von Energieverlusten reduziert und den Kühlbedarf verringert.

Die Energieeffizienz ist definiert als:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}} \quad (1.1)$$

Um die Ausgangsleistung als Funktion des Wirkungsgrades und den Leistungsverlust auszudrücken, kann diese Gleichung umgeschrieben werden:

$$P_o = \frac{\eta}{1 - \eta} P_{\text{loss}} \quad (1.2)$$

Zur Veranschaulichung der Bedeutung von Gl. (1.2) zeigt Abb. 1.14b die Ausgangsleistung eines Wandlersystems als Funktion des Wirkungsgrades für zwei verschiedene Werte von P_{loss} . Man erkennt, dass für ein System, welches für bestimmten Leistungsverlust ausgelegt ist, eine Erhöhung des Umwandlungswirkungsgrads von 84 % auf 94 % zu einer verdreifachten Ausgangsleistung führt. Dies führt auch zu einer, in etwa dreifachen, Erhöhung der Leistungsdichte, wie im folgenden Beispiel veranschaulicht wird.

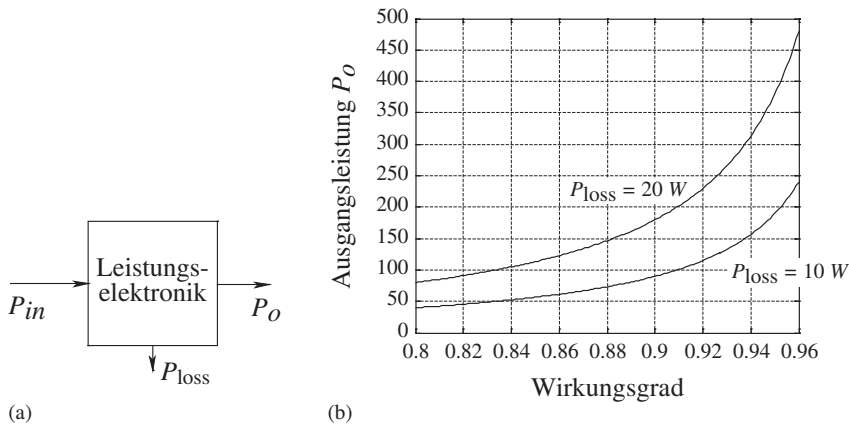


Abb. 1.14 (a) Leistungsflüsse durch eine Leistungselektronik. (b) Ausgangsleistung als Funktion des Wirkungsgrades.

Beispiel 1.1

Eine Leistungselektronik ist so ausgelegt, dass sie einen Leistungsverlust von 200 W bewältigt. Vergleichen Sie die Ausgangsleistung, wenn sich die Wandler-effizienz von 89 % auf 94 % erhöht.

Lösung

Gegeben sei $P_{\text{loss}} = 200 \text{ W}$.

Gleichung 1.2 liefert bei $\eta = 89 \%$: $P_o = \frac{0.89}{1 - 0.89} \times 200 \approx 1.6 \text{ kW}$ und bei

$\eta = 94 \%$: $P_o = \frac{0.94}{1 - 0.94} \times 200 \approx 3.13 \text{ kW}$

Dieses Beispiel zeigt die Bedeutung eines hohen Wirkungsgrades bei der Energieumwandlung. Durch die Erhöhung des Wirkungsgrades von 89 % auf 94 % werden die Ausgangsleistung und die Leistungsdichte in diesem Beispiel nahezu verdoppelt.

1.5 Struktur von Wandlersystemen

Der Aufbau der Leistungselektronik-Schnittstelle ist wesentlich für die effiziente Steuerung der Leistungsübergang in DC-DC-, DC-AC- und AC-AC-Wandlersystemen. Typischerweise wird die Leistung vom Versorgungsnetz bereitgestellt, was zu netzfrequenter Wechselspannung an einem Ende führt. Am anderen Ende wird eine der folgenden Formen synthetisiert: Einstellbare Gleichspannung, sinusförmige Wechselspannung mit einstellbarer Frequenz und Amplitude, oder eine Hochfrequenz-Wechselspannung, die üblicher Weise in Induktionsheizungen oder Systemen mit Hochfrequenz-Transformatoren benötigt wird. Anwendungen, die

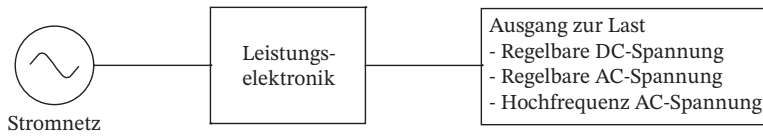


Abb. 1.15 Typische Leistungselektronik-Schnittstellen.

keine Verbindung zum Versorgungsnetz erfordern, können als Untermenge des in Abb. 1.15 gezeigten Blockdiagramms betrachtet werden.

1.5.1 Spannungszwischenkreise

Transistoren und Dioden sperren immer nur eine Polarität der Spannung, oder anders ausgedrückt, stellen immer nur eine Polarität der Spannung zur Verfügung. Um die gewünschte Funktionalität für die Leistungselektronik in Abb. 1.15 bereitzustellen, muss daher ein sogenannter Spannungszwischenkreis verwendet werden, dessen Struktur in Abb. 1.16 dargestellt ist.

Die dargestellte Struktur besteht aus zwei separaten Wandlern (Umrichtern): einem Wandler auf der Netzseite und dem anderen Wandler auf der Lastseite. Die Gleichstromanschlüsse dieser Wandler sind durch einen parallel geschalteten Kondensator verbunden, der für eine Kopplung der Gleichspannungen sorgt. Diese Anordnung stellt sicher, dass sich die Spannungspolarität nicht umkehrt, wodurch der Einsatz von unipolar arbeitenden Transistoren innerhalb der Umrichter ermöglicht wird. Eine solche Struktur wird als Spannungszwischenkreis (oder Spannungsquelle) bezeichnet und in einem breiten Leistungsbereich eingesetzt, der von einigen Dutzend Watt bis zu mehreren Megawatt und sogar bis zu Hunderten von Megawatt in Netzanwendungen reicht. Wegen der Bedeutung der Spannungszwischenkreise in der Leistungselektronik wird ihnen in diesem Buch ein eigenes Kapitel gewidmet.

1.5.2 Stromzwischenkreise

Bei sehr hohen Leistungsstufen, insbesondere in netzbezogenen AC-AC-Anwendungen, kann ein Stromzwischenkreis (oder Stromquelle) von Vorteil sein. Wie in

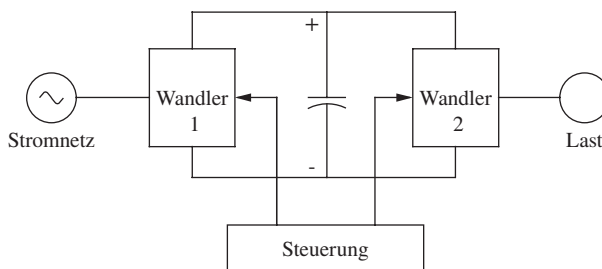


Abb. 1.16 Spannungszwischenkreis.

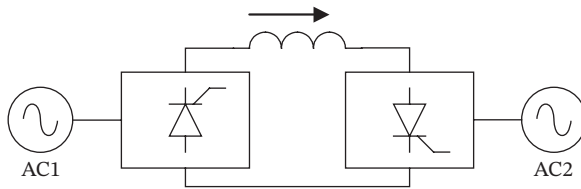


Abb. 1.17
Stromzwischenkreis.

Abb. 1.17 zu sehen ist, wird hier eine zwischen zwei Wandlern in Serie geschaltete Induktivität als Kopplungselement verwendet. Diese Wandler verwenden typischerweise Thyristoren, wobei der Strom unter Verwendung der Netzwechselspannungen von einer Wechselstromphase zur anderen „kommutiert“ wird (Kapitel 14).

1.5.3 Direktwandler

Seit Neuerem werden Direktwandler [13] (Engl.: direct-link structures), (Abb. 1.18) für bestimmte Anwendungen in Betracht gezogen. Direktwandler haben, zumindest in der Theorie, kein Energiespeicherelement zwischen der Eingangs- und Ausgangsseite. Der Direktwandler fungiert als direkte Verknüpfung, bei der die Eingänge über Schalter mit verschiedenen Ausgängen verbunden werden. Diese Schalter können in beiden Richtungen Ströme führen, wenn sie eingeschaltet sind, und Spannungen beider Polaritäten blockieren, wenn sie ausgeschaltet sind. Eine ausführliche Diskussion über Direktwandler (manchmal auch als Matrixwandler bezeichnet) und deren Regelung finden sich in [13].

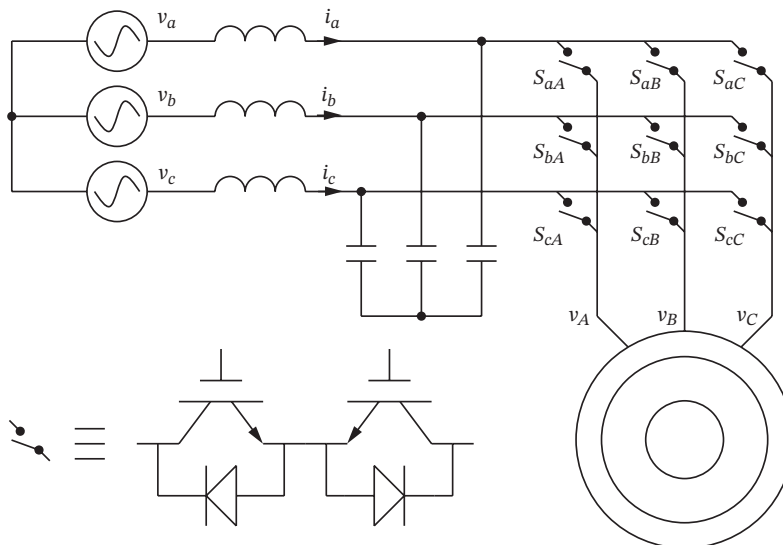


Abb. 1.18 Direktwandler, auch als Matrixwandler bezeichnet [13] (US Department of Energy / Public Domain).

1.6 Der DC-Spannungszwischenkreis

In dem in den Abbn 1.16 und 1.19 gezeigten DC-Spannungszwischenkreis wandelt der netzseitige Wandler die Netzfrequenz-Spannung in eine unregelte Gleichspannung um. Dies kann mit einer Dioden-Gleichrichterschaltung erreicht werden, wie sie häufig in Grundkursen der Elektronik und im Kapitel 5 dieses Lehrbuchs behandelt wird. Bei Problemen hinsichtlich der Netzqualität kann auch die alternative Struktur aus Kapitel 6 verwendet werden.

Konzentrieren wir uns zunächst auf den lastseitigen Wandler 2 im Spannungszwischenkreis, für den bereits eine Gleichspannung als Eingangsspannung zur Verfügung steht (Abb. 1.19). Die Funktionalität dieses lastseitigen Wandlers hängt von seiner speziellen Anwendung ab. Basierend auf der gewünschten Ausgangseigenschaft können wir diese Funktionalitäten in zwei Gruppen einteilen:

Gruppe 1

Einstellbarer Gleichstrom oder niederfrequenter sinusförmiger Wechselstrom für:

- Gleichstrom- und Wechselstromantriebe
- Unterbrechungsfreie Stromversorgungen
- Geregelte Gleichstromversorgungen ohne elektrische Isolation
- Netzbezogene Anwendungen

Gruppe 2

Hochfrequenter Wechselstrom in:

- Systemen, die Hochfrequenztransformatoren als Zwischenstufe verwenden
- Induktionsheizungen
- Geregelten Gleichstromversorgungen, bei denen der Gleichstromausgang elektrisch vom Eingang isoliert sein muss. Der lastseitige Wandler erzeugt hochfrequenten Wechselstrom, der dann durch einen Hochfrequenztransformator geleitet und anschließend gleichgerichtet wird.

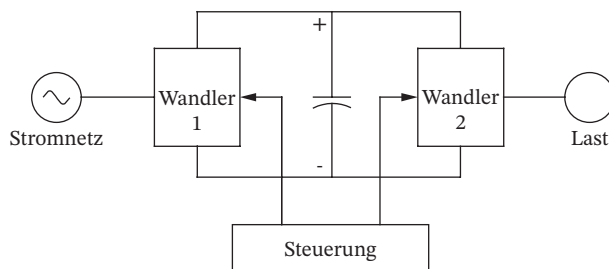


Abb. 1.19 Wandler 2 ist der lastseitige Wandler im DC-Spannungszwischenkreis.

Im Folgenden werden Umrichter (Wandler) besprochen, die in den Anwendungen beider Gruppen verwendet werden. Wir beginnen jedoch mit Wandlern für Anwendungen der Gruppe 1, bei denen lastseitig Gleichstrom oder niederfrequenter Wechselstrom geliefert wird.

1.6.1 Schaltwandler: Der Leistungsschalter als Grundbaustein

Hohe Energieeffizienz in verschiedenen Anwendungen ist nur durch Umrichtung mit Schaltwandlern zu erreichen. Im Gegensatz zu linearen Leistungselektroniken fungieren bei Schaltwandlern die verwendeten Transistoren und Dioden als digitale Schalter, die zwischen ihren Ein- und Aus-Zuständen wechseln.

Ehe es im Text weitergeht, erlaubt sich der Übersetzer eine etwas längere Anmerkung: Im englischen Original dieses Buches wird an vielen Stellen der etwas eigenwillige Begriff „switching power pole“ verwendet. Das Wörterbuch meint, dieser Begriff sei als „umschaltbarer Strommast“ zu übersetzen. Umschaltbare Strommasten passen aber bekannter Weise nicht in kleine Schaltnetzteile, also wird wohl etwas anders gemeint sein, nämlich ein Modul, mit dem elektrische Leistung ein- und ausgeschaltet wird. Zusätzlich hat dieses Modul noch die Eigenschaft, dass am Ausgang positive und negative Spannungen auftauchen können, daher die Verwendung des Wortes „Pol“. Da keine offizielle Übersetzung des Begriffs „switching power pole“ existiert, wird, um den Text flüssig zu gestalten, im Folgenden immer der Begriff „Leistungsschalter“ als Übersetzung verwendet.

Das Kernstück eines Schaltwandlers ist also ein Leistungsschalter, der schematisch in Abb. 1.20a dargestellt ist. Der Leistungsschalter enthält bistabilen Schalter, der ein zweipoliges System bildet. Er besitzt einen Spannungsausgang (1) über einen Kondensator mit einer konstant bleibenden Spannung V_{in} und (2) einen Stromausgang durch eine Serieninduktivität, bei der der Strom ebenfalls konstant bleibt. Die Spannung am Ausgang (1) wird im Folgenden gerne als Busspannung bezeichnet. Zur Vereinfachung nehmen wir einen idealen Schalter mit zwei Positionen an, Ein oder Aus, gesteuert durch ein Schaltsignal q_A , das entweder 1 oder 0 sein kann. Die praktischen Implementierungsdetails dieses Leistungsschalters werden im nächsten Kapitel besprochen.

Der bistabile Schalter wandelt die Eingangsgleichspannung V_{in} in eine Reihe von hochfrequenten Spannungspulsen um. Diese Signalform wird in Abb. 1.20b mit v_A bezeichnet. Dies wird erreicht, indem der Schalter mit der Schaltfrequenz f_s schnell in die Stellung Ein (nach oben) oder in die Stellung Aus (nach unten) geschaltet wird. Durch die Steuerung der Pulsbreite innerhalb jedes Zyklus kann der Mittelwert des gepulsten Ausgangs gesteuert werden. Diese Pulsweitenmodulation ist grundlegend für die Erzeugung einstellbarer Gleichspannungen und niederfrequenter sinusförmiger Wechselspannungen, die im nächsten Abschnitt besprochen werden. Hochfrequenzpulse sind in Anwendungen wie Kompaktleuchtstofflampen, Induktionsheizungen und Gleichstromversorgungen, bei

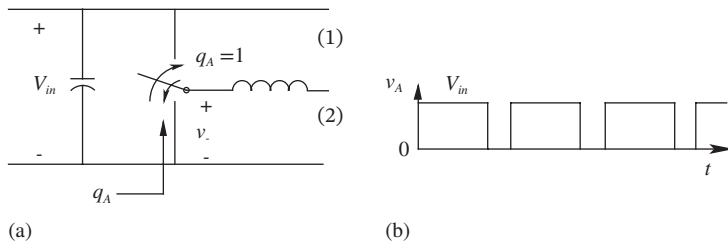


Abb. 1.20 Der Leistungsschalter als zentraler Baustein in typischen Wandlern. (a) Schematisches Schaltbild, (b) zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung.

denen die galvanische Trennung über einen Hochfrequenztransformator erreicht wird, von entscheidender Bedeutung. Ein Schaltwandler enthält typischerweise einen oder mehrere dieser Leistungsschalter.

1.6.2 Pulsweitenmodulation (PWM)

Für Anwendungen in der oben aufgelisteten Gruppe 1 besteht der Zweck des Leistungsschalters (Abb. 1.21a) darin, eine Ausgangsspannung zu erzeugen, deren über einen Schaltzyklus gemittelter Wert (im Folgenden einfach oft nur als Mittelwert bezeichnet) dem gewünschten Sollwert entspricht, entweder für Gleichstrom (DC) oder für Niederfrequenz-Wechselstrom (AC).

Die Schaltvorgänge mit einer konstanten Frequenz f_s erzeugen eine Reihe von Spannungspulsen (Abb. 1.21b), die sich mit einer Periode $T_s = (1/f_s)$ wiederholen. In jedem Schaltzyklus wird der Mittelwert des Signals \bar{v}_A durch die Pulsweite T_{up} , das heißt, wenn der Schalter oben (eingeschaltet) und v_A gleich V_{in} ist, mit dem Verhältnis von T_{up} zu T_s gesteuert (Abb. 1.21b):

$$\bar{v}_A = \frac{T_{up}}{T_s} V_{in} = d_A V_{in}, \quad 0 \leq d_A \leq 1. \quad (1.3)$$

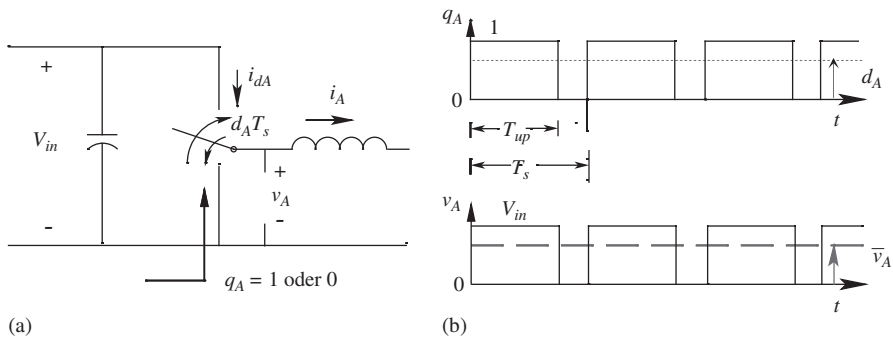


Abb. 1.21 PWM mit dem Leistungsschalter. (a) Schematisches Schaltbild, (b) zeitlicher Verlauf des Schaltsignals und der Ausgangsspannung.

Hier ist $d_A = T_{\text{up}}/T_s$ das Tastverhältnis des Leistungsschalters A (Abb. 1.21b) und somit der Mittelwert des Signals q_A . Im Folgenden wird das Überstrich-Symbol immer dann verwendet, wenn die Spannung über einen Schaltzyklus gemittelt wurde. Um zu symbolisieren, dass die betrachteten Signale im Laufe der Zeit variieren können, werden diese in Kleinbuchstaben ausgedrückt.

Der Mittelwert der Ausgangsspannung \bar{v}_A wird also durch Anpassung der Pulsweite gesteuert. Diese Methode ist als Pulsweitenmodulation (PWM) bekannt und ermöglicht eine effiziente Energieumwandlung. Man beachte, dass streng genommen, die Werte von \bar{v}_A und d_A diskrete Größen sind, die in einem bestimmten Schaltzyklus (z. B. im k -ten Zyklus) als $\bar{v}_{A,k}$ und $d_{A,k}$ berechnet werden. In praktischen Anwendungen ändert sich jedoch die Pulsweite T_{up} über viele Zyklen nur langsam, sodass wir sie als kontinuierliche Funktionen der Zeit betrachten können, die dann mit $\bar{v}_A(t)$ und $d_A(t)$ bezeichnet werden. Zur Vereinfachung wird ihre Zeitabhängigkeit aber oft nicht explizit angegeben.

1.6.3 Der Leistungsschalter im DC-DC-Abwärtswandler: Ein Beispiel

Betrachten wir nun den Leistungsschalter in einem Abwärtswandler (Engl. buck converter), der verwendet wird, um die DC-Eingangsspannung V_{in} zu reduzieren (Abb. 1.22a). Ein Kondensator wird hier parallel zur Last geschaltet, um zusammen mit der Induktivität einen Tiefpass-LC-Filter zu bilden, der am Ausgang eine glatte Spannung an die Last liefert.

Im stationären Zustand erfährt die Gleichspannung (Mittelwert) am Eingang dieses LC-Filters keine Dämpfung. Daher entspricht die gemittelte Ausgangsspannung V_o dem Mittelwert des zerhackten Signals der Eingangsspannung \bar{v}_A . Durch die

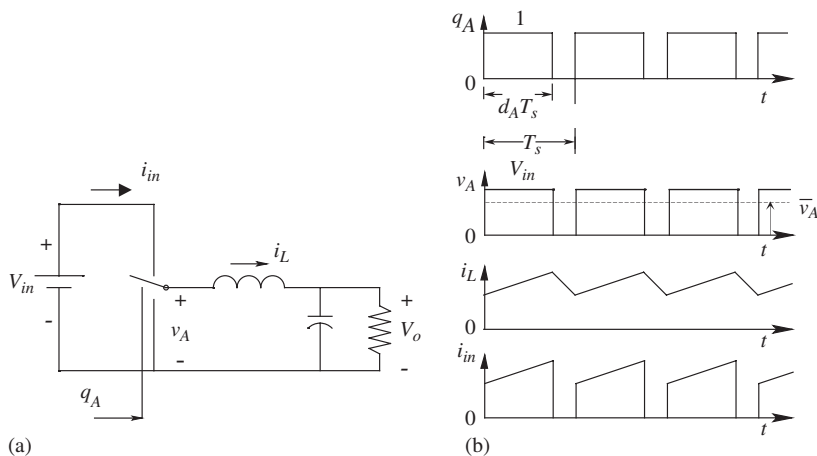


Abb. 1.22 Leistungsschalter in einem Abwärtswandler. (a) Schematisches Schaltbild. (b) Zeitlicher Verlauf des Schaltsignals, der Ausgangsspannung, des Spulenstroms i_L und des Eingangsstroms i_{in} (von oben nach unten).

Steuerung von d_A kann nun die Ausgangsspannung von V_{in} bis auf 0 heruntergeregelt werden:

$$V_o = \bar{v}_A = d_A V_{in} \quad (0 \leq V_o \leq V_{in}). \quad (1.4)$$

Trotz der pulsierenden Natur der momentanen Ausgangsspannung $\bar{v}_A(t)$ sorgt die Serieninduktivität im Stromanschluss des Leistungsschalters dafür, dass der Strom $i_L(t)$ relativ glatt bleibt (Abb. 1.22b).

Beispiel 1.2

Im Wandler in Abb. 1.22a beträgt die Eingangsspannung $V_{in} = 20$ V. Die Ausgangsspannung sei $V_o = 12$ V. Berechnen Sie das Tastverhältnis d_A und die Pulsbreite T_{up} , wenn die Schaltfrequenz $f_s = 200$ kHz beträgt.

Lösung

$\bar{v}_A = V_o = 12$ V. Unter Verwendung der Gl. (1.3) ergibt sich $d_A = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{12}{20} = 0.6$ und $T_s = \frac{1}{f_s} = 5 \mu\text{s}$. Daher ist $T_{up} = d_A T_s = 0.6 \times 5 \mu\text{s}$ (Abb. 1.23).

1.6.3.1 Realisierung des bistabilen Schalters in einem Abwärtswandler

Der bistabile Schalter im Leistungsschalter in Abb. 1.24a kann mit einem Transistor und einer Diode realisiert werden. Wenn der Transistor über das Gate (wird im nächsten Kapitel besprochen) eingeschaltet ist ($q_A = 1$), führt er den Strom durch die Induktivität, und die Diode ist in Sperrrichtung geschaltet (Abb. 1.24b). Umgekehrt fließt der Strom aus der Induktivität durch die Diode, wenn der Transistor ausgeschaltet ist ($q_A = 0$, Abb. 1.24c). Im nächsten Schaltzyklus wird der Transistor wieder eingeschaltet und der Prozess beginnt wieder von vorne. Die in Abb. 1.22b gezeigten Signalformen werden im Kapitel 4 ausführlich behandelt.

In der in Abb. 1.22a gezeigten Schaltung führt eine Erhöhung der Schaltfrequenz (die Frequenz der Impulse im Signal $v_A(t)$) zu kleineren Bauteilwerten im

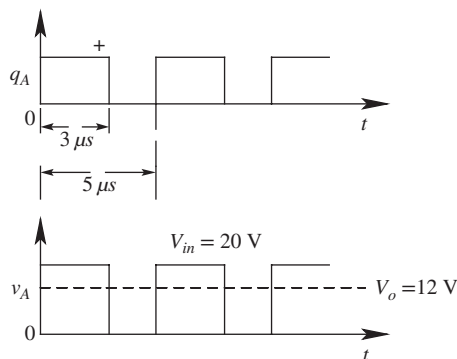


Abb. 1.23 Signalverläufe im Abwärtswandler aus Beispiel 1.2.

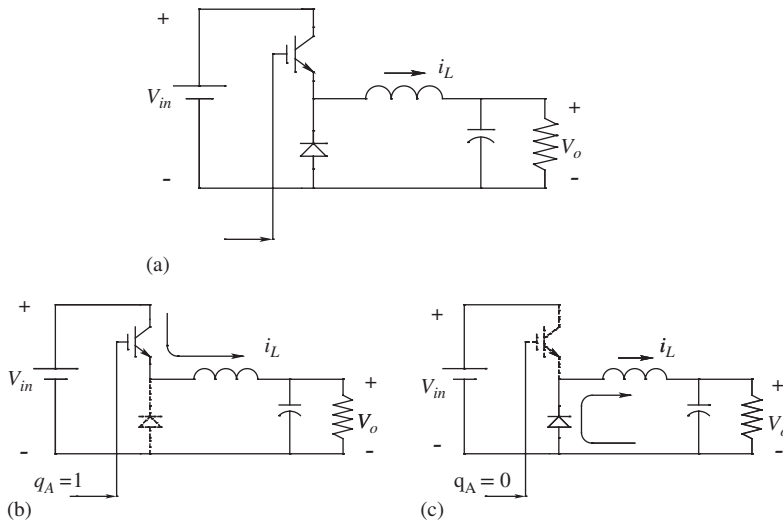


Abb. 1.24 (a) Der Leistungsschalter in einem Abwärtswandler bestehend aus Transistor und Diode. (b), (c): Strompfade während der verschiedenen Schaltzustände des Leistungsschalters.

LC-Tiefpass-Filter. Höhere Schaltfrequenzen führen jedoch auch zu erhöhten Schaltverlusten im bistabilen Schalter, ein Thema, das im nächsten Kapitel behandelt wird. Daher erfordert die Auswahl einer geeigneten Schaltfrequenz eine Abwägung dieser Kompromisse.

1.7 Neueste Entwicklungen bei Wide Bandgap-Halbleiterbauelementen

Jüngste Fortschritte bei Wide Bandgap (WBG)-Materialien (Halbleitermaterialien mit großer Bandlücke) haben dazu geführt, dass Bauelemente, wie auf GaN und SiC basierende Dioden und MOSFETs, für die Leistungselektronik erschwinglicher geworden sind. SiC-MOSFETs bieten beispielsweise schon heute Betriebsspannungen von bis zu 1.7 kV.

Obwohl die Technologie von Silizium-Leistungsbau-elementen ausgereift ist, ist sie auf Betriebstemperaturen im Bereich 150–200 °C beschränkt, und es werden nur geringfügige Verbesserungen erwartet. Im Gegensatz dazu strebt die Leistungselektronik nach höheren Spannungen, Frequenzen, Temperaturen und Effizienzen, was Siliziumbauelemente für zukünftige Leistungsanwendungen weniger geeignet und kostspieliger macht.

WBG-Bauelemente bieten eine Lösung auch bei höheren Temperaturen und zeichnen sich sowohl in Hochspannungsanwendungen (> 1000 V) als auch in Niederspannungsanwendungen (< 600 V) aus. Sie bieten höhere Geschwindigkeiten, geringere Verluste und höhere Betriebstemperaturen, wodurch der Bedarf an umfangreichen Wärmemanagementsystemen verringert wird.

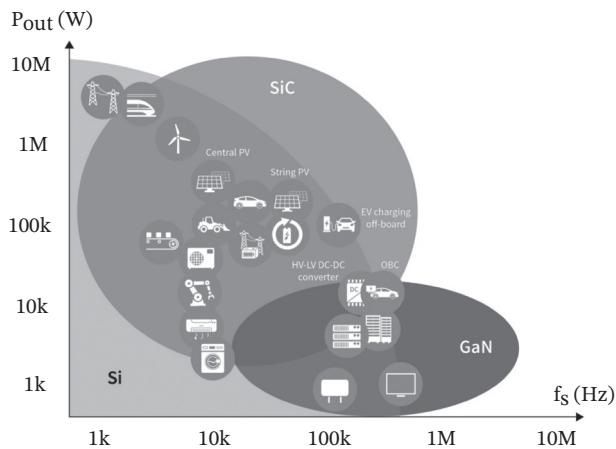


Abb. 1.25 Typische Anwendungen von SiC- und GaN-Bauelementen. Quelle: Infineon Technologies AG [14]: <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-bandgap-semiconductors-sic-gan>.

Obwohl sie über ähnliche physikalische Mechanismen und Geometrien wie Siliziumbauelemente arbeiten, übertreffen WBG-Bauelemente die meisten Siliziumbauelemente aufgrund der überlegenen Materialeigenschaften. Wichtige WBG-Materialien umfassen Galliumnitrid (GaN) und Siliziumkarbid (SiC). Diese Materialien bieten eine zehnfache höhere Durchbruchfeldstärke, schnellere Schaltvorgänge, geringere Verluste, höhere Betriebstemperaturen und eine bessere Wärmeleitfähigkeit.

Kommerziell ist bereits eine Vielzahl von SiC-Bauelementen verfügbar. Es wird erwartet, dass SiC-MOSFETs und Dioden Anwendungen über 1000 V dominieren werden, während GaN-basierte Dioden und MOSFETs für unter 600 V besser geeignet sind. Abbildung 1.25 zeigt die jeweiligen Anwendungen basierend auf Betriebsfrequenzen und Nennleistungen. Weitere Details zu WBGs findet man in [13].

1.8 Simulation und Hardware-Prototyping

Computerbasierte Modellierungswerkzeuge sind nützlich, um Diskussionen zu erleichtern und das Verständnis von Konzepten der Leistungselektronik zu vertiefen. In diesem Buch werden dazu LTspice und Sciamble Workbench verwendet.

LTspice ist ein beliebter, auf SPICE basierender Schaltungssimulator, während Sciamble Workbench ein mathematisches Simulationswerkzeug ist, das an der Universität von Minnesota entwickelt wurde. Beide Werkzeuge werden in diesem Buch verwendet, um Beispiele und Schlüsselkonzepte zu simulieren, deren Ergebnisse auf der begleitenden Website verfügbar sind.

Ein wesentlicher Vorteil der Sciamble Workbench ist der nahtlose Übergang zwischen mathematischer Simulation und dem Hardware-Prototyping. Diese Funktion vereinfacht die Entwicklung von Echtzeit-Controllern und ermöglicht schnelle

Laborversuche mit den besprochenen Konzepten. Solche praktischen Experimente in der realen Welt fördern das Verständnis ganz erheblich.

Literatur

1. Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. 3e. New York: John Wiley & Sons.
2. Mohan, N. and Ferraro, R.J. (1981). Techniques for Energy Conservation in AC Motor Driven Systems. *EPRI-Report EM-2037, Project 1201 1213*.
3. Mohan, N. and Ramsey, J. (1986). Comparative Study of Adjustable-Speed Drives for Heat Pumps. *EPRI-Report EM-4704, Project 2033-4*.
4. US Department of Energy (DOE) (1998). *Turning Point Newsletter*. A Motor Challenge Bimonthly Publication.
5. Significant progress in lithium-air battery development – ScienceDaily: <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/05/210506104801.htm>.
6. Progress in Hydrogen and Fuel Cells | Department of Energy: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-03/progress-hydrogen-fuel-cells-2025.pdf>.
7. Alternative Fuels Data Center: Emissions from Electric Vehicles: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions.html.
8. Toyota Electric Vehicles: <https://www.toyota.com/electrified>.
9. Alternative Fuels Data Center: Maps and Data – Average Fuel Economy by Major Vehicle Category: <https://afdc.energy.gov/data/10310>.
10. Car Emissions & Global Warming | Union of Concerned Scientists (ucsusa.org): <https://www.ucsusa.org/resources/car-emissions-global-warming>.
11. Power Electronics in Automotive Applications – Elprocus: <https://www.elprocus.com/power-electronics-in-automotive-applications>.
12. American Wind Energy Association, The American Clean Power Association.
13. Mohan, N., Robins, W., Undeland, T. et al. (2023). *Power Electronics for Grid-Integration of Renewables: Analysis, Simulations and Hardware Lab*. New York: John Wiley & Sons.
14. <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-bandgap-semiconductors-sic-gan>.
15. Sciamble Workbench platform: <https://sciamble.com>.

Übungsbeispiele

Energiesparmaßnahmen

- 1.1 Ein Bericht des US-Energieministeriums [4] schätzt, dass im Fertigungssektor der Vereinigten Staaten durch den Einsatz ausgereifter und kosteneffizienter Energiesparmaßnahmen über 122 Milliarden kWh/Jahr weniger verbraucht werden könnten. Berechnen Sie (a) wie viele 1100 MW Kraftwerke benötigt werden, um diese Energie zu liefern. (b) Berechnen Sie den durch die Einsparungen verursachten Umsatzverlust der Energieerzeuger (in Dollar), wenn die Stromkosten 0.12 Cent/kWh betragen.

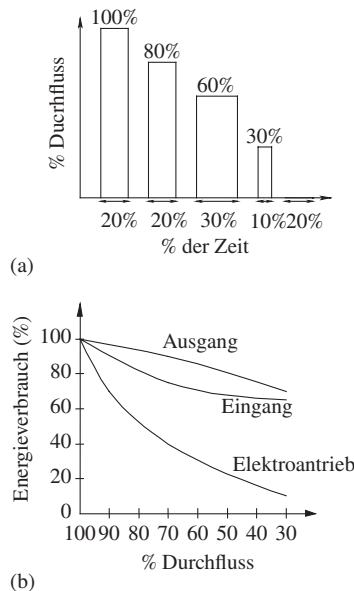


Abb. P1.1 (a) Typisches Durchflussprofil durch einen Elektromotor. (b) Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Durchfluss.

- 1.2 In einem Prozess wird ein Gebläse mit dem in Abb. P1.1a gezeigten Durchflussprofil verwendet. Schätzen Sie anhand der Informationen in Abb. P1.1b den prozentualen Rückgang des Energieverbrauchs bei Verwendung eines einstellbaren Antriebs anstelle einer: (a) Auslassklappe (b) Einlassklappe.
- 1.3 Berechnen Sie die Verbesserung der Leistungsdichte in einem System, dessen Größe auf der verkräftbaren Verlustleistung basiert, wenn der Wirkungsgrad von 87 % auf 95 % erhöht wird.
- 1.4 Die Stromerzeugung in den Vereinigten Staaten beträgt etwa 3.8×10^9 MW-Stunden. Abbildung 1.7 zeigt, dass 16 % davon für Heizung, Lüftung und Klimatisierung verwendet werden. Durch den Einsatz drehzahl geregelter Antriebe könnte in solchen Systemen bis zu 30 % weniger Energie verbraucht werden. Berechnen Sie auf dieser Grundlage den Rückgang des Energieverbrauchs pro Jahr und setzen Sie diese ins Verhältnis zu den 1100-MW Kraftwerken, die ständig in Betrieb sein könnten, um diese Energie gewinnbringend zu liefern.
- 1.5 Das potenzielle jährliche Stromerzeugungspotenzial aus Wind in den Vereinigten Staaten wird auf 1.8×10^9 MW-Stunden geschätzt. Schätzen Sie die Anzahl der 1.5 MW-Windräder, die erforderlich wären, wenn nur ein Zehntel dieses Potenzials erschlossen wird. Gehen Sie davon aus, dass ein Windrad im Durchschnitt nur 30 % der Energie abliefern kann, die es maximal erzeugen könnte.
- 1.6 Schätzen Sie die Gesamtleistung (in MW) ab, die erreicht wird, wenn jede 1.5 MW-Windmühle aus Beispiel 1.6 ihre Ausgangsleistung durch eine Leistungselektronik fließen lässt.

- 1.7** Laut Abb. 1.7 verbraucht die Beleuchtung 19 % des in den Vereinigten Staaten erzeugten Stroms. LEDs verbrauchen ein Sechstel der Leistung von Glühlampen für die gleiche Lichtleistung. Nehmen Sie an, dass die Stromerzeugung in den USA ungefähr 3.8×10^9 MW-Stunden beträgt und schätzen Sie die jährlichen Verbrauchsrückgänge in MW-Stunden, wenn alle Glühlampen durch LEDs ersetzt werden.
- 1.8** Ein Elektro-Hybridfahrzeug bietet eine Reichweite von 52 Meilen pro Gallone unter gemischten Fahrbedingungen, verglichen mit 22,1 Meilen pro Gallone für ein durchschnittliches Passagierfahrzeug in den Vereinigten Staaten. Die durchschnittliche Fahrleistung beträgt 11 766 Meilen pro Jahr. Berechnen Sie den jährlichen Minderverbrauch in Barrel Öl pro Auto, wenn ein herkömmliches Auto durch ein Elektro-Hybridfahrzeug ersetzt wird. Nehmen Sie dafür an, dass aus einem Barrel Öl (42 Gallonen) ungefähr 20 Gallonen Benzin erzeugt werden.
- 1.9** Es gibt ungefähr 150 Millionen Autos in den Vereinigten Staaten. Verwenden Sie die Ergebnisse aus Problem 1.8, um die jährliche Gesamtreduktion der Kohlenstoffemissionen zu berechnen, wenn jede Gallone Benzin ungefähr 5 Pfund Kohlenstoff freisetzt.
- 1.10** Vergleichen Sie den jährlichen Minderverbrauch in Barrel Öl aus Beispiel 1.9 mit der importierten Ölmenge, unter der Annahme, dass die Vereinigten Staaten ungefähr 35 000 Millionen Barrel Rohöl pro Jahr importieren.
- 1.11** Brennstoffzellensysteme, die auch die erzeugte Wärme nutzen, können Wirkungsgrade von bis zu 80 % erreichen, das ist mehr als das Doppelte als bei der gasbasierten Stromerzeugung. Angenommen, 20 Millionen Haushalte erzeugen im Durchschnitt 5 kW. Berechnen Sie den Prozentsatz der von diesen Brennstoffzellensystemen erzeugten Elektrizität im Vergleich zur jährlichen Stromerzeugung in den Vereinigten Staaten von 3.8×10^9 MW-Stunden.
- 1.12** Die Effizienz von Induktionsherden wird auf 80 % geschätzt, verglichen mit 55 % für herkömmliche elektrische Herde. Berechnen Sie die jährlichen Einsparungen beim Stromverbrauch, wenn ein durchschnittlicher Haushalt täglich 2 kWh beim herkömmlichen elektrischen Kochen verbraucht und 20 Millionen Haushalte in den Vereinigten Staaten auf Induktionsherde umsteigen.
- 1.13** Angenommen, die durchschnittliche Energiedichte des Sonnenlichts beträgt 800 W/m^2 und die Gesamteffizienz des photovoltaischen Systems beträgt 10 %. Berechnen Sie die mit Photovoltaikzellen bedeckte Landfläche, die benötigt wird, um 1000 MW zu erzeugen, die Größe eines typischen großen zentralen Kraftwerks.
- 1.14** Berechnen Sie die Anzahl der Häuser, die benötigt werden, um die gleiche Leistung zu erzeugen, wenn die Solarzellen auf Dächern verteilt sind und jede PV-Anlage eine Fläche von 40 m^2 bedeckt. Verwenden Sie die Angaben vom Übungsbeispiel 1.13.

- 1.15 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik bei der Nutzung von Onshore- und Offshore-Windenergie.
- 1.16 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik in photovoltaischen Systemen zur Nutzung von Solarenergie.
- 1.17 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik in Batteriespeicher- und Brennstoffzellensystemen.
- 1.18 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen, Hybrid-Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeugen.
- 1.19 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik in Transportsystemen wie Hochgeschwindigkeitszügen.
- 1.20 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik bei der Energieeinsparung für Beleuchtung mit LEDs.
- 1.21 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik bei der Energieeinsparung für Wärmepumpen und Klimaanlage.
- 1.22 Beschreiben Sie die Rolle der Leistungselektronik bei der Übertragung von Elektrizität über Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ).

PWM mit Leistungsschaltern

- 1.23 In einem Abwärtswandler beträgt die Eingangsspannung $V_{in} = 12\text{ V}$. Die Ausgangsspannung V_o soll 9 V betragen. Die Schaltfrequenz f_s beträgt 400 kHz . Berechnen Sie unter der Annahme eines idealen Schalters die Pulsbreite T_{up} des Schaltsignals und das Tastverhältnis d_A des Leistungsschalters.
- 1.24 Nehmen Sie im Abwärtswandler vom Beispiel 1.23 an, dass der Strom durch die Induktivität keine Welligkeit und einen Wert von 1.5 A hat (die Restwelligkeit dieses Stroms wird später im Kapitel 3 behandelt). Zeichnen Sie die Kurvenform der Spannung v_A am Stromanschluss und die des Eingangsstroms i_{in} am Spannungsanschluss.
- 1.25 Verwenden Sie die Eingangs-Ausgangs-Spezifikationen aus Übungsbeispiel 1.23, um die maximale Energieeffizienz zu berechnen, die von einem Linearregler erwartet wird. Gehen Sie davon aus, dass die überschüssige Eingangsspannung über einen Transistor abfällt, der als steuerbarer Widerstand in Reihe zwischen Eingang und Ausgang geschaltet ist.

Simulationsbeispiele

- 1.26 Im Schaltplan des Abwärtswandlers in Abb. 1.22a hat der Tiefpassfilter die folgenden Werte: $L = 5\text{ }\mu\text{H}$ und $C = 100\text{ }\mu\text{F}$. Der Ausgangslastwiderstand beträgt $R = 0.5\text{ }\Omega$. Die Eingangsspannung v_A ist eine Impulswellenform zwischen 0 und 10 Volt , mit einer Impulsbreite von $0.75\text{ }\mu\text{s}$ und einer Frequenz $f_s = 100\text{ kHz}$.
 - (a) Zeichnen Sie die Eingangsspannung v_A und die Ausgangsspannung v_o für die letzten 10 Schaltzyklen auf, nachdem die Wellenform v_o ihren stationären Zustand erreicht hat.

- (b) Wie verhält sich V_o zu \bar{v}_A , dem Mittelwert von v_A ?
 - (c) Wie groß ist das Verhältnis zwischen der Schaltfrequenz und der LC -Resonanzfrequenz? Berechnen Sie mit Hilfe der Fourier-Analyse die Dämpfung der Grundfrequenzkomponente in der Eingangsspannung durch das Filter bei der Schaltfrequenz.
- 1.27** Zeichnen Sie die Verstärkung der Übertragungsfunktion $V_o(s)/V_A(s)$ in dB als Funktion der Frequenz auf. Fällt die Frequenz, bei der die Verstärkung der Übertragungsfunktion ihren Höhepunkt erreicht, mit der LC -Resonanzfrequenz zusammen? Berechnen Sie die Dämpfung der Grundfrequenzkomponente durch den Filter. Was liefert der Vergleich mit dem Ergebnis der Fourier-Analyse im Übungsbeispiel 1.26c?

