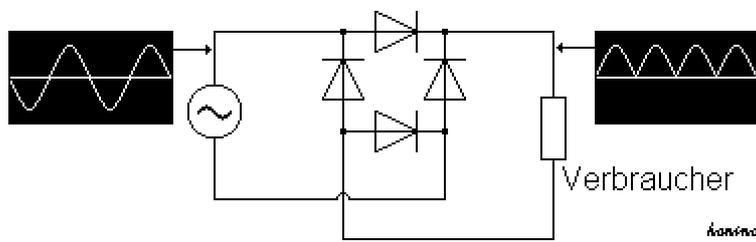


# LEISTUNGSELEKTRONIK



## Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	4	
1.1	Historische ASPEKTE	4	
1.2	Umwandlung elektrischer Energie	4	
1.3	Entwicklung	5	
2	Wechselstromverhalten	6	
2.1	Komplexe Wechselstromrechnung	7	
2.2	Zeigerdiagramm	8	
2.3	Ohmscher Widerstand	9	
2.4	Der Kondensator	9	
2.5	Die Spule	10	
2.6	Hinweise zur Berechnung	10	
3	Der Transformator	12	
3.1	Historisch	12	
3.2	Physikalische Grundbedingungen	13	
3.3	Drehstromtransformatoren	14	
3.4	Auslegung der Spulenwicklungen	14	
3.5	Idealer Transformator	15	
3.6	Realer Transformator	15	
3.7	Leerlauf bzw. „Unbelasteter Transformator“	16	16
3.8	Belasteter Transformator	16	
3.9	Nennlast-Betrieb	17	
3.10	Lastbetrieb allgemein	17	
3.11	Überlast-Betrieb	18	
3.12	Spannungsanpassung	19	
3.13	Energietransport	19	
3.14	Kernkraftwerk	20	
4	Drehstrom Synchronmaschine	21	
4.1	Aufbau	21	
4.2	Eigenschaften	21	
4.3	Betrieb	21	
4.4	Anwendung	22	
4.5	Synchrone Generator	22	
5	Drehstrom Asynchronmaschine	24	
5.1	Betrieb am starren Netz	26	
5.2	Umrichterbetrieb	26	
6	Leistungselektronik Halbleiter	28	
6.1	Der Thyristor	28	
6.2	Aufbau & Funktionsweise	28	
6.3	Einsatzgebiete	29	
6.4	GTO-Thyristor	29	
6.5	Triac	29	
6.6	Power MOSFET	30	
6.7	Insulated Gate Bipolar Transistor	31	
6.8	Eigenschaften	31	
7	AC – DC Gleichrichter	33	
7.1	Gleichrichterschaltungen	33	
7.2	Glättung	33	

7.3	Bauarten	34	
7.4	Geschichte	34	
7.5	Brückengleichrichter	35	
7.6	Steuerbare Gleichrichter	35	
8	DC – AC Umrichter	36	
8.1	Die PWM Modulation	36	
8.2	Steuerungstechnik	36	
8.3	Leistungselektronik	36	
8.4	Erzeugung	36	
9	AC – AC Frequenzumrichter	38	
9.1	Grundsätzliches	38	
10	DC-DC Gleichstromsteller	39	
10.1	Bauarten	39	
10.2	Tiefsetzsteller, Step Down Converter, Buck Converter	39	
10.3	Hochsetzsteller, Step Up Converter, Boost Converter	40	
10.4	Eigenschaften	40	
10.5	Einsatzgebiet	40	

# 1 EINLEITUNG

Leistungselektronik bezeichnet ein Teilgebiet der Elektrotechnik, in dem elektrische Energie in Form hoher elektrische Ströme und Spannungen mit elektronischen Bauelementen umgeformt, gesteuert oder geschaltet wird. Dagegen wird in der reinen Elektronik die (geringe) elektrische Leistung nur zur Signal- und Datenverarbeitung benutzt

## 1.1 Historische ASPEKTE

Mit der Erfindung des ersten Gleichrichters 1902 nahm auch die Leistungselektronik ihren Anfang, bekam jedoch erst später diese Bezeichnung. Der Gleichrichter war ein Gasentladungsgefäß mit flüssiger Quecksilber-Kathode. Diese Quecksilberdampfstromrichter konnten Wechselströme bis zu einigen Kiloampere gleichrichten. Ab 1930 waren diese Quecksilberstromrichter mit einer Gittersteuerung analog zur Röhrentechnik versehen und so ließ sich ein steuerbarer Gleichstrom erzeugen.

1958 wurde bei General Electric der erste steuerbare Leistungs-Halbleiter entwickelt und später als Thyristor bezeichnet. Die folgende Entwicklung brachte eine Vielzahl von weiteren steuerbaren und passiven Leistungshalbleitern hervor, die heute in weiten Teilen der Antriebstechnik Verwendung finden.

## 1.2 Umwandlung elektrischer Energie

Die Leistungselektronik ermöglicht vor allem die Umwandlung elektrischer Energie einer bestimmten Spannung und Frequenz in eine andere Spannungsamplitude und / oder Frequenz:

- Umwandlung von Wechselspannung in Gleichspannung durch Gleichrichter
- Umwandlung von Gleichspannung in Wechselspannung durch Wechselrichter
- Umwandlung von Gleichspannung in eine höhere oder niedrigere Gleichspannung durch Gleichstromsteller (DC/DC-Wandler)
- Umwandlung von Wechselspannung in Wechselspannung mit einer anderen Frequenz oder Amplitude z. B. durch Wechselstromsteller oder Frequenzumrichter

Fortschritte der Mikroelektronik führten auch im Bereich der Hochleistungs-Bauelemente zu weiter verbesserten Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten und haben die Leistungselektronik damit weiter an Bedeutung gewinnen lassen.

In der Antriebstechnik lassen die Steuerungsmöglichkeiten der Leistungselektronik die Betriebspunkte von elektrischen Maschinen sehr flexibel einstellen. Auch in

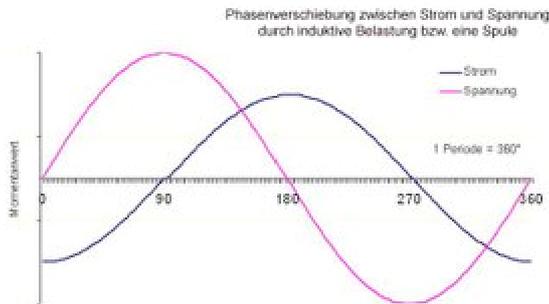
Bereichen der Energieerzeugung findet die Leistungselektronik immer größere Einsatzgebiete. Gerade in Anlagen mit geringerer Leistung oder Anlagen mit Bedingungen unter denen der klassische Synchrongenerator als Energieerzeuger nicht eingesetzt werden kann, werden Frequenzumrichter eingesetzt, um die erzeugte elektrische Energie ins Stromnetz einzuspeisen. □ In der Energieübertragung wird die Leistungselektronik in so genannten Kurzkupplungen zur Frequenzentkopplung zwischen Verbundnetzen eingesetzt. Die gleiche Technik kommt bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ, auch Langkupplung genannt), zum Einsatz.

### 1.3 Entwicklung

Leistungselektronik gewinnt zunehmend auch im Automobilbau an Bedeutung. In Hybridfahrzeugen (Toyota Prius) wird ein Teil der Antriebsleistung mit dem Elektromotor erzeugt. Daneben braucht es aber auch DC/DC-Wandler, welche die hohe Spannung der Hauptbatterie in die 12V-Bordspannung umsetzen. Zukünftige Autos werden teilweise oder vollständig elektrisch angetrieben. Letzteres gilt insbesondere für Wasserstoff-Fahrzeuge. Diese Fahrzeuge wandeln Wasserstoff mit einer Brennstoffzelle in elektrische Energie um, welche dann mittels Leistungselektronik auf die für den elektrischen Antriebsmotor passende Spannung und Frequenz umgewandelt wird. Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen je nach Konzept auch mehr oder weniger leistungsstarke DC/DC-Wandler, welche ein Teil der Energie in Batterien oder SuperCaps zwischenspeichern.

Im HF- Bereich löst die Leistungselektronik die langsam veraltende Röhrentechnik nach und nach ab. Bei sehr hohen Frequenzen werden aber weiterhin immer noch Elektronenröhren eingesetzt. In der Induktionserwärmung dominieren heutzutage kleine Geräte, dank der Leistungselektronik, im unteren Frequenzbereich.

## 2 WECHSELSTROMVERHALTEN



### Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung durch induktive Belastung

Wird die Spule von Wechselstrom durchflossen, so wechselt der Strom periodisch seine Richtung. Durch die Stromänderung  $dI \cdot L/dt = -E$  wird ständig eine Induktionsspannung erzeugt, die ebenfalls ihre Richtung periodisch wechselt. Da der Strom infolge der induzierten Gegenspannung nur allmählich anwachsen bzw. abfallen kann, folgt er dem Verlauf der Spannung stets mit zeitlichem Verzug, er ist phasenverschoben. Unter idealen Bedingungen (bei einem vernachlässigbar kleinen ohmschen Widerstand) eilt die Wechselspannung dem Strom um  $90^\circ$  (der vollständigen  $360^\circ$ -Periode) voraus. Es besteht also eine Trägheit der Spule gegen Stromänderungen. (Merksatz: "Bei Induktivitäten die Ströme sich verspäten").

Der Spule kann daher ein Wechselstromwiderstand  $X$  zugeordnet werden, der jedoch im Gegensatz zu einem ohmschen Widerstand keine Leistung in Wärme umsetzt („Verlustleistung“), man nennt ihn daher einen Blindwiderstand. Für eine Spule der Induktivität  $L$  und einen Wechselstrom der Frequenz  $f$  errechnet sich der Blindwiderstand zu

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L$$

Wobei  $\omega$  Winkelfrequenz oder auch Kreisfrequenz heißt.

Der Blindwiderstand steigt also auch mit steigender Frequenz, wobei der ohmsche Drahtwiderstand gleich bleibt. Daher hat eine für Wechselspannung konzipierte Spule an einer gleichgroßen Gleichspannung ( $f=0$  Hz) einen sehr viel geringeren Widerstand, da nur noch der Drahtwiderstand den Strom behindert

## 2.1 Komplexe Wechselstromrechnung

Die Komplexe Wechselstromrechnung wird in der Elektrotechnik angewendet um Verhältnisse von Strom und Spannung in einem Netzwerkmodell zu bestimmen. Hierzu werden sinus- bzw. kosinus-förmige Ströme bzw. Spannungen vorausgesetzt. Die Bestimmung des Verhältnisses von Strom zu Spannung in einem elektrischen Stromkreis ist eine der Grundaufgaben der Elektrotechnik.

Wird die Spannung  $U$  vorgegeben und der Strom  $I$  bestimmt, so identifiziert man das Verhältnis  $U / I$  als den Widerstand  $R$ . Wird der Strom  $I$  vorgegeben und die Spannung  $U$  bestimmt, so identifiziert man das Verhältnis  $I / U$  als den Leitwert  $G$ .

Als (passive) Elemente des Stromkreises können unter anderem ohmsche Widerstände, Induktivitäten oder Kapazitäten auftreten. Für diese Elemente gilt:

Ohmscher Widerstand ( $R$ ): der Strom ist der Spannung proportional:

$$i = \frac{u}{R}$$

Induktivität ( $L$ ): die Stromänderung ist der Spannung proportional:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u}{L}$$

Kapazität ( $C$ ): die Spannungsänderung ist dem Strom proportional:

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C}$$

oder anders ausgedrückt:

$$u \cdot C = \int i \cdot dt$$

Ist eine der vorgegebenen Größen (Spannung oder Strom) konstant, so ist die resultierende Größe nur bei rein ohmschen (im betrachteten Bereich) Stromkreisen ebenfalls konstant. Die angewendeten Verfahren der Berechnung sind dann, und nur dann, die der Gleichstromrechnung. Eine ideale Induktivität würde hier einen Kurzschluß, eine ideale Kapazität eine Unterbrechung des Stromzweiges darstellen. Das gilt natürlich nicht beim Einschalt- oder Ausschaltfall, da dann zeitweise keine konstanten Bedingungen vorliegen.

Ist die vorgegebene Größe nicht konstant, oder ist der Stromkreis nicht rein ohmsch, so ist die Strom/Spannungsbeziehung komplizierter. Kapazitäten und Induktivitäten müssten dann eigentlich über Differentialgleichungen in die Berechnung einfließen. Jedoch kann man es sich mit der Berechnung unter gewissen Umständen (Sonderfälle) einfacher machen.

Ein Sonderfall liegt beispielsweise vor, wenn die vorgegebene Größe einen sinusförmigen periodischen Verlauf hat, z. B. der Strom sinusförmig ist (siehe Wechselstrom):

$$i = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Dabei ist  $\hat{i}$  der Maximalwert,  $\omega = 2 \pi f$  ist die Kreisfrequenz,  $\varphi$  ist die Phasenverschiebung der Wechselgröße.

Dann hat auch die sich einstellende Größe einen sinusförmigen, phasenverschobenen periodischen Verlauf, der sich allerdings in der Phasenlage und dem Amplitudenverhältnis mit der Frequenz (Periodendauer) verändert.

Die mathematische Behandlung diesbezüglicher Rechnungen erfolgt vorteilhaft unter Verwendung komplexer Zahlen, da diese die Lösung trigonometrischer Aufgaben wesentlich erleichtern.

## 2.2 Zeigerdiagramm

Im Zeigerdiagramm wird eine harmonische Schwingung (Sinusschwingung) durch einen um den Nullpunkt rotierenden Zeiger in der komplexen Ebene dargestellt, dessen Länge die Amplitude repräsentiert. Sein Realteil (Projektion auf die reelle Achse) ist die tatsächliche Messgröße, sie nimmt einen sinusförmigen Verlauf, während der Zeiger mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  umläuft.

Zu erwähnen ist, dass in der Elektrotechnik üblicherweise nicht der Sinus für den Realteil genutzt wird, sondern der Kosinus. Außerdem: Für die komplexe Einheit verwendet man in der Wechselstromlehre den Buchstaben  $j$  (mit  $j^2 = -1$ ), um Verwechslungen mit  $i$ , das den Strom bezeichnet, zu vermeiden.

Somit ergibt sich für eine komplexe Spannung:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot (\cos(\omega t + \varphi) + j \cdot \sin(\omega t + \varphi)) = \hat{u} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = \hat{u} \angle (\omega t + \varphi)$$

und den komplexen Strom:

$$\underline{i} = \hat{i} \cdot (\cos(\omega t + \varphi) + j \cdot \sin(\omega t + \varphi)) = \hat{i} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = \hat{i} \angle (\omega t + \varphi)$$

Der jeweils letzte Ausdruck stellt die sogenannte Versorschreibweise dar. Die komplexe Zahl wird dabei wie in dem Ausdruck direkt vorher in Polarkoordinaten angegeben.

Beispiel: Die Formel  $\underline{c} = a \angle \varphi$  spricht sich: "c ist gleich a Versor Phi", wobei a der Betrag der komplexen Zahl c ist.

Somit ergeben sich sowohl die komplexe Spannung als auch der komplexe Strom aus zwei Teilen: Einerseits aus der Amplitude der Spannung bzw. des Stroms (dargestellt durch  $\hat{u}$  bzw.  $\hat{i}$ ) und andererseits aus dem Winkel. Dieser wiederum setzt sich aus

einem konstanten Teil, dem Nullphasenwinkel  $\varphi$ , und einem variablen Teil, der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  multipliziert mit der Zeit  $t$ , zusammen.

### 2.3 Ohmscher Widerstand

Stellt man den Strom als Zeiger  $i$  und die Spannung als Zeiger  $u$  dar, so sind diese am ohmschen Widerstand stets in Phase.

Der Widerstand ist dann:

$$\underline{Z}_R = R = \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = \frac{\hat{u} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}}{\hat{i} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}} = \frac{\hat{u} \angle (\omega t + \varphi)}{\hat{i} \angle (\omega t + \varphi)} = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} \angle 0 = \frac{\hat{u}}{\hat{i}}$$

Die zeitabhängigen Terme kürzen sich heraus, es bleibt also nur ein Winkel von 0 übrig. Daraus folgt, dass der komplexe Widerstand  $Z$  nur aus einem Realteil besteht, hier natürlich  $R$ .

### 2.4 Der Kondensator

Im Falle eines Kondensators ist  $i$  gegenüber  $u$  um  $+90^\circ$  in der Phase verschoben. Also:

$$\underline{i} = \hat{i} \angle (\omega t + \varphi + 90^\circ) \text{ und } \underline{u} = \hat{u} \angle (\omega t + \varphi)$$

Der Widerstand ist dann

$$\underline{Z}_C = j \cdot X_C = \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = \frac{\hat{u} \angle (\omega t + \varphi)}{\hat{i} \angle (\omega t + \varphi + 90^\circ)} = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} \angle ((\omega t + \varphi) - (\omega t + \varphi + 90^\circ)) = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} \angle (-90^\circ)$$

Hier wurden, wie bei einer Division im Komplexen üblich, die Winkel subtrahiert. Nun ergibt aber eine Phasenverschiebung von  $-90^\circ$  nichts anderes als  $-j$ . Also folgt:

$$j \cdot X_C = -j \cdot \frac{\hat{u}}{\hat{i}}$$

anders dargestellt:

$$-X_C = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Wie man unschwer erkennen kann ergibt sich ein negativer Widerstand für den Kondensator, denn der komplexe Widerstand  $Z$  besteht hier nur aus einem negativen Imaginärteil. Also:

$$X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C} = -\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Der (komplexe) Widerstand eines Kondensators wird also auf der imaginären Achse in negative Richtung abgetragen.  $2\pi f$  ist die Kreisfrequenz  $\omega$ , sie entspricht der Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Zeigers.

Der Formel kann man auch entnehmen, dass der Blindwiderstand des Kondensators umso kleiner wird je höher man die Frequenz wählt.

## 2.5 Die Spule

Bei einer Spule läuft der Strom der Spannung um  $90^\circ$  nach, also

$$\underline{i} = \hat{i} \angle (\omega t + \varphi - 90^\circ) \text{ und } \underline{u} = \hat{u} \angle (\omega t + \varphi)$$

Der Widerstand ist dann

$$Z_L = j \cdot X_L = \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = \frac{\hat{u} \angle (\omega t + \varphi)}{\hat{i} \angle (\omega t + \varphi - 90^\circ)} = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} \angle ((\omega t + \varphi) - (\omega t + \varphi - 90^\circ)) = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} \angle (90^\circ)$$

Nun ergibt aber eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  nichts anderes als  $j$ . Also folgt:

$$j \cdot X_L = j \cdot \frac{\hat{u}}{\hat{i}}$$

anderns dargestellt:

$$X_L = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} = \omega \cdot L$$

Der komplexe Widerstand  $Z$  der Spule liegt nun, wie der Kondensator, auf der imaginären Achse. Allerdings wird er, anders als beim Kondensator, in positiver Richtung abgetragen. Das ergibt sich durch das positive  $j$ . Auch wird der Blindwiderstand der Induktivität mit steigender Frequenz immer größer, ganz im Gegensatz zum Kondensator. Diese gegensätzliche Eigenschaft lässt vermuten, dass eine Reihenschaltung aus Spule und Kondensator irgendwann mal, bei einem bestimmten  $\omega > 0$ , einen Blindwiderstand gleich 0 haben kann, und genau das ist auch der Fall bei Resonanz im (idealen) Reihenschwingkreis.

## 2.6 Hinweise zur Berechnung

Die Wahl der vorgegebenen Größe hängt von der vorgelegten Aufgabe ab: Sind alle Bauelemente in Reihe geschaltet, so ist es zweckmäßig, den Strom vorzugeben, da man so für jedes Element, durch das derselbe Strom fließt, die angelegte Spannung bestimmen kann und dann alle Spannungen zusammenfasst. Sind jedoch alle Bauelemente parallel geschaltet, so wird man eine Spannung anlegen und den Strom durch die Elemente getrennt berechnen und dann addieren.

Ist die Schaltung eine Mischform, so ist man gezwungen, sie elementar zu zerlegen und jede Teilschaltung getrennt zu berechnen, bevor man sie wieder zusammensetzt.

Beispiel

An einer Reihenschaltung eines Widerstands  $R = 150 \Omega$  und eines Kondensators  $C = 10 \mu\text{F} = 0,00001 \text{ F}$  liegt eine Wechselspannung mit  $\omega = 500 \text{ s}^{-1}$ .

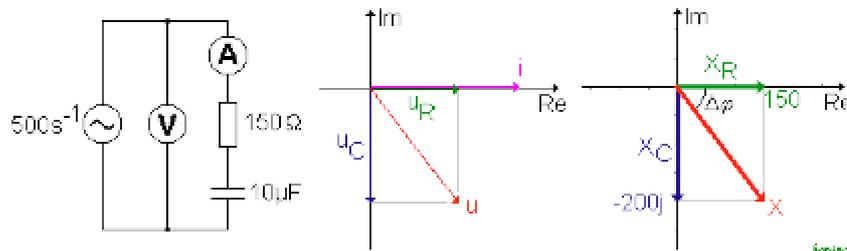
Dann ist  $X_R = 150 \Omega$

und 
$$X_C = \frac{-1}{500 \text{ s}^{-1} \cdot 0,00001 \text{ F}} = -200 \Omega$$
 mit  $[\text{F}] = [\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1}] = [\text{s} \cdot \Omega^{-1}]$ .

Da sich die Widerstandswerte bei einer Reihenschaltung addieren, ist der Gesamtwiderstand

$$\underline{X} = X_R + j \cdot X_C = (150 \Omega - 200 \Omega \cdot j)$$

Der Betrag des Gesamtwiderstandes (Impedanz) ergibt sich aus dem Satz von



Pythagoras zu

$$|\underline{X}| = X = \sqrt{(150 \Omega)^2 + (200 \Omega)^2} = 250 \Omega$$

Er ist also das Verhältnis der Beträge von Spannung und Stromstärke. Für die Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Spannung und Strom in dieser Schaltung folgt

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\text{Im}(\underline{X})}{\text{Re}(\underline{X})} = \arctan \frac{-200 \Omega}{150 \Omega} \approx -53,13^\circ$$

Es ist zu beachten, dass die komplexe Wechselstromrechnung nur für den eingeschwungenen Zustand anwendbar ist, das heißt, das Anschalten und Ausschalten der periodischen Erregung wird durch diese Methoden nicht abgedeckt. Insbesondere kann sie keine Pulse oder Pulsfolgen behandeln.

### 3 DER TRANSFORMATOR

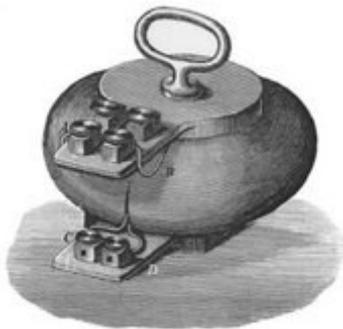
Ein Transformator (kurz: *Trafo*) ist eine elektrische Maschine ohne bewegte Teile, die gewöhnlich aus einer oder mehreren Drahtspulen auf einem ggf. gemeinsamen Eisenkern besteht. Mit Hilfe von Transformatoren lassen sich elektrische Wechselspannungen herauf- oder heruntertransformieren, das heißt erhöhen oder verringern, und damit den technischen Erfordernissen des Gebrauchs anpassen.

Mittelspannungstransformator mit Ölkühlung im Schnitt



#### 3.1 Historisch

Die Erscheinung der Magnetfelderzeugung aus dem elektrischen Stromfluss und umgekehrt der Stromerzeugung aus einem veränderlichen Magnetfeld war seit Michael Faradays Entdeckungen seit 1831 bekannt, doch erst um 1880 wurde dies von dem Engländer John Dixon Gibbs und dem Franzosen Lucien Gaulard zum Transformator-Prinzip zusammengesetzt. Bei dem Versuch, diese Einrichtung 1882 patentieren zu lassen, scheiterten sie, da ihnen die Absicht unterstellt wurde, ein Perpetuum Mobile vorzuführen. Gibbs und Gaulard übertrugen 1883 in London erstmals 2000-Volt-Wechselstrom mit Transformatoren auf einem stabförmigem Kern über eine Distanz von 40 km. Gaulard führt 1884 auf einer elektrotechnischen Ausstellung in Turin eine ähnliche Anlage vor.



Transformator von Zipernowsky, Déry und Bláthy

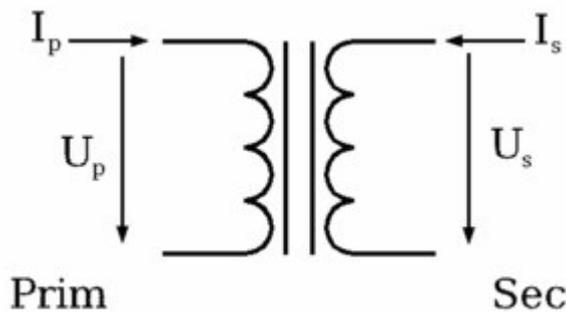
1885 ließen sich die Ungarn Károly Zipernowsky, Miksa Déry und Ottó Titusz Bláthy ein Patent auf den Transformator erteilen. Dieser war mechanisch nach dem umgekehrten Prinzip der heutigen Transformatoren aufgebaut; die Leiterspulen waren um einen soliden Kern aus unmagnetischem Material gewunden, darüber wurden dicke Eisendraht-Lagen gelegt, die eine ferromagnetische Schale bildeten. Dieser Transformator wurde von der Firma Ganz & Co in Budapest weltweit vertrieben.

Wesentlichen Anteil an der Verbreitung des Wechselstromsystems und mit ihm des Transformators hatte der US-Amerikaner George Westinghouse, der vor allem durch die

Erfindung der Druckluftbremse berühmt wurde. Westinghouse erkannte die Schwächen der damals von Edison betriebenen und favorisierten Gleichstrom-Energieverteilung und setzte vorrangig auf Wechselstrom als elektrischen Energieträger. 1885 importierte Westinghouse eine Anzahl Gaulard-Gibbs-Transformatoren und einen Siemens-Wechselspannungsgenerator für die elektrische Beleuchtung in Pittsburgh. William Stanley führte im gleichen Jahr als Chefingenieur von Westinghouse in Pittsburgh wesentliche Verbesserungen an Lucien Gaulards und John Gibbs' Gerät durch. Westinghouse installierte 1886 in Great Barrington, Massachusetts, einen Wechselspannungsgenerator, dessen 500 Volt Wechselspannung zur Verteilung auf 3000 Volt hochtransformiert und dann zum Betrieb der elektrischen Beleuchtung an den Anschlussstellen wieder auf 100 Volt heruntertransformiert wurde.

Der dann zunehmende Einsatz von Transformatoren führte in Verbindung mit dem Wechselstrom zur weiten Verbreitung von Elektrizität als Energielieferanten, weil nur Hochspannungsleitungen den Energietransport über große Entfernungen ohne allzu große Energieverluste ermöglichen.

### 3.2 Physikalische Grundbedingungen



Schaltbild eines Trafos mit Eisenkern; mit elektrischen Primär- (p) und Sekundärgrößen (s)

Für die Wirkweise eines Transformators sind zwei physikalische Erscheinungen wesentlich:

- Ein von elektrischem Strom durchflossener Stromkreis erzeugt ein Magnetfeld (Elektromagnetismus)
- Wenn sich (von außen bewirkt) der magnetische Fluss durch eine Spule ändert, wird in ihr eine Spannung induziert.

Eine an die erste Spule ("Primärspule") im Primärstromkreis angelegte Wechselspannung erzeugt einen veränderlichen Primärstrom und damit ein veränderliches Magnetfeld im Kern, dieses Feld durchsetzt die zweite Spule ("Sekundärspule") in einem zweiten Stromkreis und erzeugt hier durch Induktion wiederum eine Spannung ("Sekundärspannung"). Eine primäre Spannung kann über magnetischen Fluss in eine proportionale sekundäre Spannung transformiert werden.

Zum Betrieb eines Transformators ist eine in stetem Wechsel veränderliche Spannung nötig. Meist wird Wechselspannung, vielfach auch getakteter bzw. "zerhackter" Gleichstrom (bei Schaltnetzteilen) verwendet.

Die maximale Höhe der induzierten Spannung hängt neben der Eingangsspannung von der Windungszahl der Spulen ab, die maximale Höhe des Stromes von der baulichen

Konfigurierung (Größe und Leiterquerschnitte) und von Materialeigenschaften vor allem des Eisenkerns.

### 3.3 Drehstromtransformatoren

Dreiphasenwechselspannung lässt sich mit drei gleichen Einphasentransformatoren übertragen. In der praktischen Ausführung werden jedoch überwiegend die drei getrennten Eisenkerne zu einem gemeinsamen Kern mit drei Schenkeln zusammengefasst. Für das einfachere Verständnis kann man sich die drei Kernschenkel an sich sternförmig angeordnet vorstellen. Die praktische Ausführung vereinfacht das abermals dahin, daß die drei Schenkel in einer geraden Linie hintereinander angeordnet werden und oben und unten mit einem gemeinsamen Eisenblech-Joch verbunden werden. In den Schenkelkernen sind die magnetischen Flüsse wirksam, die sich gemäß der jeweils zugeordneten Wechselstromphase verändern. Der Phasenwinkel zwischen den drei einzelnen Wechselströmen beträgt jeweils  $\pm 120^\circ$ . Drehstromtransformatoren werden mit Nennleistungen von 10 kVA bis 1000 MVA gebaut.

Die Übersetzungsformel  $u = N_1 / N_2$  gilt für Drehstromtransformatoren nur bei gleicher Schaltung von Ober- und Unterspannungsseite. Die drei Phasenleiter der elektrischen Spannung werden üblicherweise in Europa mit den Buchstaben "L1", "L2" und "L3" bezeichnet (früher als "R", "S" und "T"), die drei Wicklungsstränge von Drehstrommotoren und -transformatoren mit "U", "V" und "W".

Bei besonders großen Transformatoren können zur besseren Transportierbarkeit drei Einphasentransformatoren zu einer "Drehstrombank" zusammengesetzt werden. Hierbei müssen jedoch die Stufenschalter und viele Meldeeinrichtungen jeweils dreifach vorhanden sein, so dass diese Anordnung eher selten ausgeführt wird.

### 3.4 Auslegung der Spulenwicklungen

Wie schon oben gesagt, ist die Ausgangsspannung der Transformator-Sekundärspule theoretisch exakt so groß, wie es das Wicklungsverhältnis und die Primärspannung vorgeben nach der Formel

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \text{ mit}$$

- $U_1$  und  $U_2$  als Primär- und Sekundärspannung sowie
- $n_1$  und  $n_2$  als Primär- und Sekundärwindungszahl.

Dies gilt jedoch nur für den Leerlauf bzw. den unbelasteten Zustand. Sobald in der Sekundärspule ein Strom zu einem äußeren Verbraucher fließt, teilt sich die vorhandenen Leerlaufspannung auf die inneren elektrischen Widerstände des Transformators und des Verbrauchers auf. Wenn also eine bestimmte Spannung bei einer bestimmten Leistung entnommen werden soll, muss die Windungszahl der Sekundärspule für eine entsprechend höhere Leerlaufspannung ausgelegt werden. Die Spannung, die der Spule bei Nennleistung entnommen werden kann, wird „Nennspannung“ genannt. Die Nennleistung ist die für den regulären Dauerbetrieb vorgesehene Abgabeleistung auf der Sekundärseite. Rechnerisch kann stattdessen auch mit dem Nennstrom gearbeitet werden.

**Beispiel:** Für einen Transformatortyp ist von der Größe und vom Material her ein Leistungsverlust bei der Übertragung von 10 % bekannt. Bei der vorgesehenen Nennleistung soll die Sekundärspule genau 240 Volt abgeben. Die Windungszahl wird daher für eine Leerlaufspannung von

$$\frac{240 \text{ V}}{1 - 0,1} = 266,7 \text{ V}$$

ausgelegt.

Bei Nennleistung liefert die Sekundärspule dann

$$266,7 \text{ V} - 26,67 \text{ V} = 240,03 \text{ V Spannung.}$$

Ein Transformator kann statt einer einzelnen auch mehrere getrennte Sekundärwicklungen für unterschiedliche Spannungen oder für getrennte Stromkreise haben. Die Sekundärwicklungen können statt einer auch mehrere Ausgangsanszapfungen haben: so kann man auch mit einem Trafo, der nur eine Sekundärwicklung besitzt, mehrere unterschiedlich hohe Sekundärspannungen erhalten. Die Primärwicklungen können ebenfalls mehrere Anzapfungen haben; dann ist ein solcher Trafo für unterschiedlich hohe Primärspannungen geeignet, bei denen trotzdem auf identische Ausgangsspannungen transformiert wird - Beispiel ist ein Gerät, das sowohl für den amerikanischen Markt (110 Volt) als auch den europäischen Markt (230 Volt) vorgesehen ist.

### 3.5 Idealer Transformator

Ein idealer Transformator hat keine Übertragungsverluste. Der ideale Transformator ist eine theoretische Sonderform des realen Transformators und zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

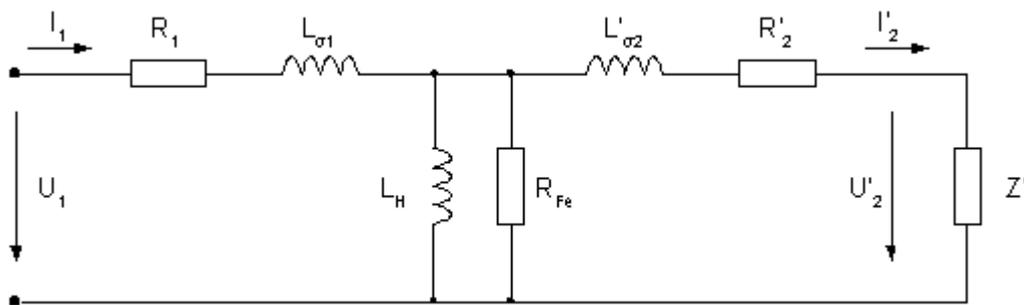
- die Permeabilität des Magnetwerkstoffes (die Fähigkeit, das durch eine Spule induzierte Magnetfeld zu führen) geht gegen Unendlich → kein Streufeld
- die elektrische Leitfähigkeit des Magnetwerkstoffes geht gegen Null → keine Wirbelströme
- der Magnetwerkstoff hat keine Ummagnetisierungsverluste (Fläche der Hystereseschleife des Magnetwerkstoffes geht gegen Null)
- die Permeabilität der Luft geht gegen Null → kein Streufeld
- die elektrische Leitfähigkeit der Wicklungen geht gegen Unendlich → keine Wicklungsverluste

Daraus ergibt sich das Durchflutungsgleichgewicht des idealen Transformators:

$$I_1 n_1 + I_2 n_2 = 0$$

### 3.6 Realer Transformator

Ein realer Transformator hat demgegenüber Übertragungsverluste durch den ohmschen Widerstand der Wicklung, durch Wirbelstrombildung im Kern, Ummagnetisierungsverluste und durch andere Effekte. Bei großen Transformatoren muss die Verlustleistung gegebenenfalls durch geeignete Kühlung abgeführt werden. Bei starker Überlastung kann sich ein Transformator überhitzen und "durchbrennen".



Ersatzschaltbild eines realen Transformators (T-Ersatzschaltung)

- $L_H$  berücksichtigt den Magnetisierungsstrom im Leerlauf
- $R_{Fe}$  berücksichtigt die Hysterese- und Wirbelstromverluste ( $R_{Fe} \rightarrow \infty$ )
- $R_1$  und  $R_2$  repräsentieren die Stromwärmeverluste (niederohmig)
- $L_{\sigma 1,2} \dots$  Streuinduktivitäten

Hystereseverluste und Wirbelstromverluste sind im Eisen begründet und werden deshalb als Eisenverluste bezeichnet. Die Stromwärmeverluste sind den Kupferverlusten zuzuordnen, und die Streuverluste ergeben sich aus den Streuflüssen.

Die gestrichenen Größen im Ersatzschaltbild müssen entsprechend dem Übersetzungsverhältnis des Transformators (also dem Wicklungsverhältnis der beiden Spulen) umgerechnet werden:

$$L'_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2, \quad R'_2 = R_2 \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2, \quad Z' = Z \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

$$U'_2 = U_2 \left( \frac{n_1}{n_2} \right), \quad I'_2 = I_2 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

mit  $n_{1,2} \dots$  Wicklungszahlen der Primär- / Sekundärwicklung

### 3.7 Leerlauf bzw. „Unbelasteter Transformator“

Wenn bei angelegter elektrischer Spannung an der Primärspule kein Strom aus der Sekundärspule des Transformators entnommen wird, wird dies als „Leerlauf“ oder „unbelasteter Betrieb“ bezeichnet. In diesem Zustand verhalten sich die eingegebene Primärspannung und die an der Sekundärspule messbare Sekundärspannung näherungsweise wie die Windungszahlen, weil die sekundären Kupferverluste Null sind:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Dabei sind  $U_1$  und  $U_2$  die Primär- und Sekundärspannung sowie  $n_1$  und  $n_2$  die Primär- und Sekundärwindungszahl.

Ansonsten verhält sich der Transformator im Leerlauf exakt wie eine Induktivität, es ist dabei belanglos, ob eine Sekundärspule vorhanden ist oder wie sie ausgeführt ist.

### 3.8 Belasteter Transformator

Ist der Transformator sekundärseitig belastet, so bewirkt der Sekundärstrom im Eisen ein zusätzliches magnetisches Wechselfeld. Nach dem Gesetz von Lenz muss die durch den Sekundärstrom verursachte Magnetfeldänderung derjenigen die durch den Primärstrom verursacht wird, entgegengerichtet sein. Die effektive Magnetfeldänderung ist bei Belastung somit in der Primärspule geringer als im unbelasteten Fall. Dadurch ist auch  $U$  kleiner und somit die effektive Spannung im Primärkreis größer. Als Folge davon wächst der Primärstrom.

Für einen idealen (verlustfreien) Transformator gilt dann:

$$S_1 = S_2$$

Da die elektrische Scheinleistung  $S$  das Produkt aus Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  ist,

$$S = U \cdot I$$

folgt:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Da nun die Spannungen sich wie die Windungszahlen verhalten, verhalten sich dann die Ströme umgekehrt wie die Windungszahlen:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

### 3.9 Nennlast-Betrieb

Wenn an der Sekundärwicklung des Transformators die maximal zugelassene bzw. als „Nennleistung“ bezeichnete Leistung entnommen wird, wird dies als „Nennlast-Betrieb“ bezeichnet. In diesem Fall liegt an der Sekundärspule die „Nennspannung“ an. Die Nennspannung ergibt sich aus der „Leerlaufspannung“ abzüglich der Spannung, die an den inneren Widerständen des Transformators „abfällt“, bzw. aufgebracht werden muss, um den Strom durch die Innenwiderstände zu treiben. Es ist:

$$U_n = U_o - U_i \text{ mit}$$

$U_n$  als Nennspannung,  
 $U_o$  als Leerlaufspannung  
 $U_i$  Spannung am Innenwiderstand der Sekundärwicklung

Die Kurzschlussspannung von Transformatoren soll möglichst klein sein. Die Kurzschlussspannung ist diejenige Spannung an der Primärspule, bei der in der während der Messung kurzgeschlossenen Sekundärspule der maximale Nennstrom fließt. Die Kurzschlussspannung ist ein Maß für die Effizienz und die Verluste des Transformators. Sie wird in Prozent angegeben.

### 3.10 Lastbetrieb allgemein

Bei Lastbetrieb wird das Übersetzungsverhältnis vom Leerlauf nicht mehr exakt eingehalten. Gründe sind :

- die magnetische Streuung ist verschieden, Kopplungsfaktor  $< 1$
- die Spannungsverteilung über die Wicklung und den Verbraucher verschiebt sich.

Der durch die äußere Belastung fließende Strom in der Ausgangswicklung erzeugt einen entgegengesetzten magnetischen Fluss, dadurch wird das Magnetfeld der Eingangswicklung geschwächt. Die Eingangswicklung bekommt dadurch einen geringeren induktiven Widerstand, was wiederum zu einer erhöhten Stromaufnahme führt. Der entgegengesetzt gerichtete magnetischen Flusses bewirkt auch, dass der magnetische Fluss der Eingangswicklung als nicht nutzbarer "Streufluss" teilweise das Eisen verlässt.

Die Höhe der Ausgangsspannung eines Trafos hängt also von Belastung ab, bei hoher Belastung wird sie niedriger ("sie geht in die Knie"). Mathematisch-physikalisch ausgedrückt verteilt sie sich jedoch einfach entsprechend dem Verhältnis der Widerstandswerte von Transformator-Ausgangsspule und des Verbrauchers gemäß dem Ohmschen Gesetz.

$$U_G = U_S + U_A$$

wobei  $U_G$  die Sekundär-Gesamtspannung,  
 $U_S$  die an der Sekundär-Spule anliegende Teilspannung und  
 $U_A$  die am Verbraucher anliegende Ausgangs- oder Arbeitsspannung ist.

### 3.11 Überlast-Betrieb

Wenn an der Sekundärwicklung des Transformators erheblich mehr als die Nennleistung zu entnehmen versucht wird, wird dies als „Überlast-Betrieb“ bezeichnet. Dies führt zum „Zusammenbruch“ der Sekundärspannung, anders ausgedrückt verringert sich diese erheblich. Dafür gibt es zwei Gründe:

- Bei zunehmender Stromentnahme nimmt der Außen- bzw. Verbraucherwiderstand erheblich ab, die Sekundär- bzw. Leerlaufspannung verteilt sich auf den Innenwiderstand des Transformators und den Verbraucherwiderstand gemäß dem ohmschen Gesetz:

$$U = I\dot{R} \text{ ohmsches Gesetz}$$

bei Teilwiderständen setzt sich die Spannung zusammen aus

$$U = I\dot{R}_1 + I\dot{R}_2 \dots \dots$$

Wenn  $R$  der Gesamtwiderstand,  $R_i$  der Transformator-Innenwiderstand und  $R_v$  der Verbraucherwiderstand ist, dann ist

$$U_o = I\dot{R}_i + I\dot{R}_v$$

$$U_o = U_i + U_v \text{ mit}$$

$U_o$  als Leerlaufspannung

$U_v$  als Spannung am Verbraucher

$U_i$  Spannung am Innenwiderstand der Sekundärwicklung

Wird bei unveränderlichem Innenwiderstand der Verbraucherwiderstand immer kleiner, dann verschiebt sich gemäß der Formel die Spannungsverteilung zu einem kleineren Anteil der Verbraucherspannung.

- Bei höherer Stromentnahme auf der Sekundärseite wird auch der Strom auf der Primärseite zwangsläufig höher, da wie schon oben gezeigt

$$P_1 = P_2 \text{ und } U_1 I_1 = U_2 I_2 \text{ ist.}$$

Die Zunahme des Primärstroms bei Be- oder Überlastung führt im Eisenkern zu einer Verringerung der Erregerfeldstärke (nicht, wie oft fälschlicherweise angenommen, zu einer Erhöhung). Der Grund ist die durch den ohm'schen Spannungsabfall in der Primärwicklung verringerte wirksame Spannung. Dadurch sinkt auch der durch die Primärinduktivität bestimmte Blindstrom. Der höhere primärseitige Wirkstrom wird dagegen durch den Sekundärstrom kompensiert und trägt nicht zur Magnetisierung bei.

Im Unterschied zu einem Vorwiderstand, wirkt ein Transformator im Überlastbetrieb als Drossel. D.h. L12 wird durch den Kurzschluss wirkungslos gemacht und die Primärwicklung spürt nur noch L11. Trotz der hohen Permeabilität von Eisen bei 50Hz (ca 300) hat L11 verglichen mit L12 bei den im Schulversuch verwendeten Tranformatoren einen merklichen Wert. Höher wird L11 durch Luftspalte und zusätzliche Schenkel im Kern, durch einen dünnen Kern und durch lockere Packung der Windungen (dünne Kabel, viel Abstand vom Kern).

Transformatoren, die typischerweise kurzzeitig überlastet betrieben werden, sind in Elektroloks, Lötpistolen und Punktschweißgeräten zu finden. Auch bei der elektrischen Stahlerzeugung mit Lichtbogenöfen werden besonders be- und überlastbare Transformatoren eingesetzt.

Aufgrund der erheblichen Wärmeentwicklung bei fortdauerndem Überlastbetrieb droht Zerstörung der Isolation (Windungsschluss) oder sogar eine Explosion durch die sich aus der Isolation entwickelnden Gase und Brandentwicklung durch Entzündung.

### 3.12 Spannungsanpassung

Die Spannungstransformation wird angewendet, um Spannungen auf den gewünschten Wert umzuformen (zu transformieren). Beispiel: 230 Volt aus dem öffentlichen Stromnetz in 12 Volt für eine Halogenlampe. Bei kleinen und mittleren Leistungen sind häufig die Wicklungen zusammen mit dem Kern in Gießharz vergossen.

Zur reinen Spannungsanpassung (z.B. von 230V auf 115V) werden sog. Spartransformatoren mit nur einer gemeinsamen Wicklung verwendet. Die veränderte Ausgangsspannung wird durch eine Anzapfung (falls sie kleiner als die Eingangsspannung sein soll) oder einen zusätzlichen Wicklungsanhang (für eine Spannung größer als die Eingangsspannung) gewonnen. Dabei muss der Transformator nur einen Teil der benötigten Leistung (im Beispiel 230/115V die Hälfte zuzüglich der transformatoreigenen Verlustleistungen) übertragen und lässt sich entsprechend kleiner bauen.

### 3.13 Energietransport

Zur verlustarmen Energieübertragung in Hochspannungsleitungen werden Spannungen auf hohe Werte transformiert. Dabei wandelt der Maschinentrafo des Kraftwerkes die Generatorspannung (bei großen Kraftwerken etwa 10kV bis 30kV) auf die Netzspannung (etwa 110 kV bis 400 kV) um, wodurch der im Fernleitungsnetz fließende Strom



geringer wird, da bei der Transformation die übertragene elektrische Leistung näherungsweise konstant bleibt, da in der Regel nur geringe Transformationsverluste vorliegen. Der geringere Strom auf der Hochspannungsseite führt dazu, dass weniger Verlustwärme am ohmschen Widerstand der Leitung entsteht. Auch heben sich bei richtiger Übertragungsspannung induktive und kapazitive Blindleistung auf (Wellenwiderstand  $Z = (240 \dots 300) \text{ Ohm}$ ). Diese Aussage gilt jedoch nur beim Übertragen der Natürlichen Leistung  $P_n$ . Für das Verteilnetz werden die Spannungen wieder auf 10 kV bis 36 kV zurücktransformiert.

Zur Abführung der Verlustwärme bei großen Leistungstransformatoren werden diese als Öltransformator in ölgefüllte Behälter eingebaut, die Kühlung durch das Öl gegebenenfalls mit Kühlrippen und Umwälzpumpen forciert (siehe auch Bild). Aufgrund der isolierenden Eigenschaften des Öls reicht die Lackisolierung der Kupferleiter je nach Spannung aus, um das Tränken bzw. den Verguss der Wicklungen mit isolierenden Stoffen entfallen zu lassen. Große Transformatoren hingegen enthalten immer Feststoffisoliationskomponenten auf Zellulosebasis. Durch die Alterung des Öls und Wasseraufnahme der Zellulose werden die Isolationseigenschaften mit steigender Betriebszeit allerdings schlechter. In den 70er Jahren bis Anfang der 80er Jahre wurden daher oft die giftigen, jedoch stabileren polychlorierte Biphenyle (PCB) verwendet.

Die Spannungsanpassung bei Netz-Belastungsschwankungen und die Abstimmung beim Parallelschalten großer Leistungstransformatoren geschieht über mit in den Kessel eingebaute Stufenschalter. Zu diesem Zwecke sind die entsprechenden Wicklungen mit Anzapfungen versehen.

### 3.14 Kernkraftwerk

Ein **Kernkraftwerk** (Abkürzung KKW) oder **Atomkraftwerk** (Abkürzung AKW) ist ein Elektrizitätswerk zur Gewinnung von elektrischer Energie durch Kernspaltung in Kernreaktoren. Die Erzeugung elektrischer Energie geschieht indirekt: Die Wärme, die bei der Kernspaltung entsteht, wird auf ein Kühlmedium übertragen, wodurch dieses erwärmt wird. Im Normalfall besteht das Kühlmittel aus Wasser; bei der Erwärmung wird Wasserdampf erzeugt, der dann eine Dampfturbine antreibt. In einigen Fällen besteht ein Kernkraftwerk aus mehreren Blöcken, die für sich völlig unabhängig voneinander elektrischen Strom erzeugen.



KKW Grafenrheinfeld, Bayern

## 4 DREHSTROM SYNCHRONMASCHINE

Eine Drehstrom-Synchronmaschine ist ein Elektromotor, der mit Drehstrom betrieben wird, oder ein Generator, der Drehstrom erzeugt. Sie kann aber auch zur Blindleistungskompensation verwendet werden.

### 4.1 Aufbau

Die Maschine besitzt eine Außenwicklung (Statorwicklung), die ein magnetisches Drehfeld erzeugt bzw. in welcher elektrischer Strom erzeugt wird. Der Rotor (Polrad) trägt zur Felderzeugung entweder Permanentmagnete oder eine Erregerwicklung. Im zweiten Fall werden zwar Schleifkontakte notwendig, über die jedoch nur ein vergleichsweise kleiner Strom fließt und im Gegensatz zur Gleichstrommaschine nicht kommutiert wird, so dass das Bürstenfeuer mit all seinen Konsequenzen für die Lebensdauer entfällt.

Bei schnelllaufenden großen Turbogeneratoren u.a. in Dampfkraftwerken sind auch schleifringlose Erregungen über Außenpol-Synchrongeneratoren und mitrotierende Gleichrichter (sog. RG-Sätze) Stand der Technik. Synchronmotoren sind permanent- oder gleichstromerregte Drehfeldmaschinen, bei denen die Drehzahl gleich der Wechselspannungsfrequenz, geteilt durch die halbe Polzahl des Rotors, ist.

### 4.2 Eigenschaften

Über die Frequenz des zugeführten Wechselstroms ist die Drehzahl des Synchronmotors exakt und winkelgenau regelbar. Ein Winkelgeber überprüft ständig die tatsächliche Motorstellung und somit die tatsächliche Drehfrequenz. Bei starker Belastung hängt der Motor dem Soll-Phasenwinkel geringfügig hinterher. Um einen Synchronmotor stufenlos in der Drehzahl regeln zu können, muss ein Frequenzumrichter verwendet werden.

### 4.3 Betrieb

Die Synchronmaschine hat im Unterschied zur Drehstrom-Asynchronmaschine keinen Schlupf. Bei der Synchronmaschine ist die Drehzahl des Läufers gleich der Drehzahl des elektromagnetischen Drehfeldes, das heißt, der Läufer rotiert synchron zum Drehfeld. Deshalb wird im Rotor keine Spannung induziert.

Die Wirkleistung wird vom Polradwinkel festgelegt, der sich als Verdrehwinkel zwischen dem Läufer der belasteten Maschine und einer gleichartigen unbelasteten Maschine ergibt. Die Maschine wirkt mit einem voreilenden Läufer als Generator, mit einem nacheilenden Läufer als Motor. Wird der Winkel zu groß (größer als ca.  $90^\circ$  elektrisch), tritt ein Lastabwurf ein und die Maschine bleibt im Motorenbetrieb stehen. Im Generatorbetrieb geht sie durch; ihre Drehzahl erhöht sich stark und sie kann durch die Fliehkraft der eigenen Bauteile zerstört werden. Sie muss in diesem Betriebszustand schnellstmöglich abgeschaltet und neu synchronisiert werden.

Synchronmaschinen laufen nicht von allein an, sondern müssen mechanisch hochgefahren und synchronisiert werden. Es ist aber auch viel eleganter möglich, diese mittels Frequenzumrichter vom Stillstand langsam auf Nenndrehzahl zu bringen und dann zu synchronisieren. Kleine Synchronmaschinen können als Asynchronmaschine hochlaufen, bis sie Tritt fassen. Dies setzt allerdings einen Dämpferkäfig (Anlaufkäfig) voraus, der wie bei einer Asynchronmaschine aufgebaut ist. Ein Dämpferkäfig wird bei manchen Synchronmaschinen auch zusätzlich eingebaut, um mechanische Pendelmomente (Torsionsschwingungen) zu mindern. Eine übererregte Synchronmaschine hat im Netz die Wirkung eines Kondensators, eine untererregte die Wirkung einer Drossel. Die Synchronmaschine wird deshalb auch als Phasenschieber zur Erzeugung von Blindleistung und somit zur Spannungshaltung in Energieverteilungsnetzen eingesetzt.

#### 4.4 Anwendung

Hauptanwendungen der Synchronmaschinen sind die Wechsel- und Drehstrom-Generatoren in den Kraftwerken. Mehr als 99 % der elektrischen Energieerzeugung geschieht mit Synchrongeneratoren. Auch die Lichtmaschinen in Autos sind überwiegend Synchrongeneratoren mit nachgeschaltetem Gleichrichter. Ein besonders einfacher Synchrongenerator mit Permanentpol-Erregung ist der Fahrraddynamo.

Turbogeneratoren sind mit Dampfturbinen gekoppelt und meist zweipolig. Sie rotieren daher mit 3000 U/min (50 Hz) oder 3600 U/min (60 Hz) und können bis 1200 MVA gebaut werden. Vierpolige Turbogeneratoren laufen halb so schnell und können derzeit bis 1800 MVA realisiert werden.

Schenkelpolmaschinen in Wasserkraftwerken haben größere Polzahlen und daher geringere Drehzahlen von 750 U/min bis etwa 60 U/min.

In Pumpspeicherwerken werden die Synchronmaschinen als Motorgeneratoren sowohl im Pump- als auch im Generator-Betrieb verwendet.

Man kann sich bei Betrieb am starren Netz auf ihre konstante Drehzahl verlassen. (Früher gab es elektrische Uhren mit solchen Synchronmotoren.) Synchronmaschinen werden teilweise in Bahnantrieben (z. B. beim TGV), als Generatoren in allen Größen (von einigen Watt bis zu mehreren hundert Megawatt) und industriellen Hochleistungsantrieben, vor allem für Gebläse, Verdichter und Pumpen eingesetzt.

Ebenfalls sehr wichtige Sonderformen sind Schrittmotoren (hochpolige Synchronmaschinen, vorwiegend zur genauen Positionierung von Werkzeugen), aber auch sonstige Kleinmotoren, z.B. elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren mit Permanentmagnet-Läufer (Datenlaufwerke, Kopftrommel in Videorecordern, Niederspannungs-Axiallüfter).

#### 4.5 Synchrongenerator

Synchron-Generator von 1920 mit 2000 kW

Ein Synchrongenerator ist ein elektrischer Generator, bei dem der durch Spulen (Fremderregung) oder Dauermagnete (Selbsterregung) magnetisierte, sich drehende Rotor in den Spulen des Stators eine Spannung induziert.

Das Drehmoment an der Welle des Synchrongenerators bewegt den Rotor, der aus radial auf der Welle angeordneten Magneten besteht. Das magnetische Feld wird bei höheren Leistungen mit Elektromagneten erzeugt, bei kleinen Leistungen werden Permanentmagnete verwendet.

Der für die Erregung der Pole des Rotors erforderliche Gleichstrom wird diesem über Schleifringe und Kohlebürsten zugeführt und stammte früher meist aus einer an der Generatorwelle direkt angebauten Gleichstrom - Erregermaschine. Zur Erregung kann jedoch auch ein außenerrichter Wechselstromgenerator dienen, der sich samt Gleichrichter auf der Welle des Haupt-Generators befindet.

Der Stator wird zur Verringerung der Wirbelstromverluste aus geschichteten, elektrisch voneinander isolierten Magneteisenblechen gebildet. In achsparallele Nuten, zwischen den radial nach innen weisenden Polen des Stators, ist die Statorwicklung fest eingelegt und verschaltet. Die bei der Bewegung des Rotors mit umlaufenden wechselnden Magnetfelder überwinden den Luftspalt zwischen Rotor- und Statorpolen und schneiden die Statorwicklungen. Dort wird aufgrund der sich mit jedem Rotorlauf wechselnden Magnetfelder in jeder der Wicklungen eine Wechselspannung erzeugt, deren Frequenz synchron zur Rotordrehzahl ist. Durch geeignete Anordnung und Verschaltung der Statorwicklungen kann die Synchronmaschine ein- oder dreiphasige Wechselspannung erzeugen.

Ein Synchrongenerator (siehe Bild) wird als Schenkelpol - Synchrongenerator oder -maschine bezeichnet, wenn er konstruktiv gesehen ausgeprägte Magnetpole aufweist. Das ist besonders bei langsamlaufenden Maschinen mit vielen Polen der Fall.

Um die Drehzahl des Synchrongenerators und damit die Frequenz seiner erzeugten Spannung konstant zu halten, ist eine schnelle Anpassung der zugeführten mechanischen Leistung an das sich ändernde Bremsmoment des Generators bei sich änderndem Stromverbrauch der Verbraucher nötig. Ist der Generator mit einem Verbundnetz im Parallelbetrieb verbunden, bleibt die Drehzahl konstant, jedoch ergeben sich Änderungen im sog. Phasenwinkel des Rotors und damit treten Verlagerungen von Wirk- und Blindleistungen zwischen Generator und Netz auf.

Theoretisch kann jeder permanent- oder fremderregte Synchronmotor auch als Synchrongenerator betrieben werden.

## 5 DREHSTROM ASYNCHRONMASCHINE

Eine Drehstrom-Asynchronmaschine, auch Induktionsmaschine, Asynchronmotor oder Kurzschlussläufer (engl. Squirrel Cage Motor) genannt, ist ein häufig verwendeter Elektromotor, der mit Drehstrom betrieben wird. Bei der Asynchronmaschine ist die Drehzahl des Läufers im Motorbetrieb geringer als die Drehzahl des antreibenden elektromagnetischen Drehfeldes, d. h. der Läufer rotiert asynchron zum Drehfeld. Im Generatorbetrieb rotiert der Läufer schneller als das Magnetfeld und speist so Energie in das Netz ein.

Die Anschlüsse der bei Drehstrommotoren drei Strangwicklungen (U1-U2, V1-V2 und W1-W2) sind meist auf ein Klemmbrett herausgeführt, und zwar so, dass durch mitgelieferte, universell einsetzbare Kupferbügel die Anpassung an die gegebene Betriebsspannung vorgenommen werden kann. Drehstrom mit 230V wird beispielsweise von Frequenzumrichtern kleinerer Leistung mit einphasiger 230V-Speisung geliefert.

Motoren für Drehstrom Y/ $\Delta$  690V/400V können bei Anschluss ohne Brücken im Motor-Klemmkasten durch geeignete Schützschtaltung zwischen Stern- und Dreiecksbetrieb umgeschaltet werden. Ein vorübergehender Stern-Betrieb an 400V ermöglicht einen sanfteren Anlauf des Motors, da er statt mit 690V nur mit 400V betrieben wird. Nach der Hochlaufzeit wird der Motor durch Umsteuerung der Schütze auf Dreieckbetrieb umgeschaltet.

Die für die Spannungsinduktion bzw. den Läuferstrom erforderliche Magnetflussänderung wird vom Ständer durch ein umlaufendes Drehfeld erzeugt. Elektrisch gesehen ist eine Asynchronmaschine ein kurzgeschlossener Drehstrom-Transformator mit Luftspalt, dessen Sekundärwicklung (der Rotor) drehbar gelagert ist.

Durch die an die Statorwicklung angelegte Netzspannung wird im Inneren der Maschine ein magnetisches Drehfeld erzeugt, welches in der kurzgeschlossenen inneren Wicklung (Anker) einen Strom induziert. Dieser Strom baut selbst wiederum ein magnetisches Feld im sich drehenden Rotor auf. Beide Magnetfelder wechselwirken so, dass letztlich ein Drehmoment erzeugt wird - das Ankerfeld wird mitgezogen. Für diese Momenterzeugung ist ein Rotorstrom notwendig, der eine Frequenz entsprechend der Schlupfdrehzahl (ca. 5 % der Netzfrequenz) besitzt. Dieser bleibt aber nur bestehen, wenn es eine relative Differenzdrehzahl zwischen Statorfeld und Rotor gibt.

Die Rotordrehzahl ist um die Schlupfdrehzahl gegenüber dem netzsynchronen Statorfeld verringert; dies ist bei Belastung erforderlich, um den Rotorstrom und dessen Feld zu erhalten, sodass mechanische Leistung abgegeben werden kann. Bei Motorleerlauf ist die Schlupffrequenz sehr niedrig, sie muss nur ausreichen zur Deckung der Lagerreibungsverluste, des wegen der sehr niedrigen Frequenz (etwa 1 % der Netzfrequenz) geringen Käfigwicklungs-Stromes und der ebenfalls sehr geringen Verluste im Rotorblechpaket wegen der sehr niederen Magnetisierung und niederen Frequenz. Der Läufer kann immer nur eine kleinere Drehzahl annehmen, als die Synchrondrehzahl des Netzes vorgibt (bei Motorbetrieb, als Generator: Läuferdrehzahl > Netzdrehzahl), darum auch der Name Asynchronmaschine.

Dadurch, dass bei der Asynchronmaschine der Rotorstrom durch Induktion erzeugt wird und nicht wie bei der Synchronmaschine durch die Erregerwicklung oder Permanentmagneten, wird sie gelegentlich als Induktionsmaschine benannt.

Die Drehmomenten- über Drehzahlkennlinie ist im Anlaufbereich bei diesem Motorprinzip sehr ungünstig. Der Motor ist nicht in der Lage, unter vollem Lastmoment anzulaufen. Er muss mit geringer Last auf etwa 90 % der Nenndrehzahl hochfahren, ehe er ein nennenswertes Drehmoment, sich errechnend aus:  $M_d = P_{abg} / (2 \cdot \pi \cdot n_{stat})$  abgeben kann.

Dieser Nachteil führte zunächst zur Entwicklung des Schleifringläufers, bei dem an extra angebrachten Rotorschleifringen zusätzliche Widerstände von außen an die gewickelte Rotorwicklung zwischen die 3 Außenleiterspannungen geschaltet werden, um so das maximale Drehmoment auch schon bei der Drehzahl 0 zu erreichen. □ Die Widerstände werden nur als Anlaufhilfe benötigt, sie werden nach dem Erreichen der Nenndrehzahl durch Kurzschluss der Schleifringe ausgeschaltet.

Später wurde dann der Kurzschlussläufermotor entwickelt, dessen Rotor aus einem geblechten Eisenkernläufer besteht, der seine „Wicklung“ mittels Aluminium-Druckguss in vorhandenen Bohrungen erhält. Die Kurzschlusswicklung ähnelt einem Hamsterlaufrad (englisch „squirrel cage motor“), daher die Bezeichnung Käfigläufermotor. Bei großen Leistungen wird die Käfigwicklung aus Kupfer- oder Bronzestäben aufgebaut, die stirnseitig in Kurzschlussringen verlötet werden.

Eine Modifikation des Querschnittsprofils der gegossenen Ankerstäbe führt zu besserem Anlaufverhalten: Sie werden radial nach außen verjüngt. Beim Anlaufen des Motors treten magnetische Wechselfelder mit beinahe Netzfrequenz im Rotor auf, die den Anker nur außen durchströmen, wo die Stäbe verjüngt sind. Dadurch kommt es zu einer Widerstandsvergrößerung im Käfigläufer. So wird erreicht, dass sich der beteiligte Querschnitt dynamisch mit der Drehzahl ändert. Diese Motoren werden Stromverdrängungsläufer genannt.

Zur Begrenzung hoher Anlaufströme erlauben die Energieversorgungsunternehmen bei Motorleistungen bis 10 kW die Stern-Dreieck-Schaltung einzusetzen.

### Vorteile

1. lange Lebensdauer, wartungsarm, kein Bürstenverschleiß, (typ. [MTBF](#) 20.000 Std.)
2. kurzzeitig stark überbelastbar
3. nahezu konstante Drehzahl, kein „Durchgehen“ im Leerlauf einsetzbar im Ex-Bereich (explosionsgefährdeter Bereich), da keine Bürsten oder Schleifringe
4. vergleichsweise geringe Herstellungskosten
5. Läufer spannungslos (kann auch in Medien oder in Gasen / im Vakuum laufen)

### Nachteile

1. hoher Anlaufstrom bei gleichzeitigem geringen Anzugsmoment
2. Drehzahlveränderung nur bei Sonderbauformen mit Polumschaltung oder mit zusätzlichem Frequenzumrichter möglich relativ großes Volumen/Leistungsverhältnis
3. 3 Außenleiter zur Versorgung notwendig
4. mäßiger Wirkungsgrad im Vergleich zur permanenterregten Synchronmaschine

## 5.1 Betrieb am starren Netz

Am starren Netz (50 Hz / 60 Hz) hat die Maschine abhängig von der Polpaarzahl eine fast synchrone Drehzahl  $n_{\text{sync}} = 60 \cdot f_{\text{Netz}} / p$ .

Polpaarzahl	$n_{\text{sync}}$ 50 Hz	$n_{\text{sync}}$ 60 Hz
1	3000 min <sup>-1</sup>	3600 min <sup>-1</sup>
2	1500 min <sup>-1</sup>	1800 min <sup>-1</sup>
3	1000 min <sup>-1</sup>	1200 min <sup>-1</sup>

Die Drehzahl bei Belastung ist dann um den Schlupf niedriger, der proportional zur Belastung der Maschine ist. Bei kleinen Maschinen beträgt der Nennschlupf bis zu 8 %, bei Maschinen größer 150 kW ist der Nennschlupf kleiner 1,5 %.

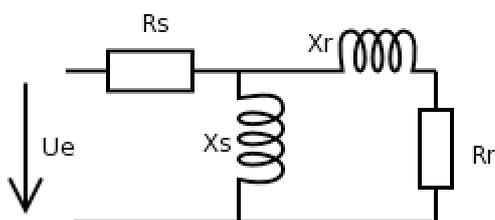
Die prozentualen elektrischen Läuferverluste sind proportional dem Schlupf. Die prozentuellen Gesamtverluste bei Vollast sind daher etwa beim drei- bis vierfachen Nennschlupf.

Bei Schleifringläufer-Maschinen kann die Schlupfleistung aus dem Läuferkreis über einen Stromrichter ins Netz zurückgespeist werden (untersynchroner Betrieb), oder es wird Leistung dem Läufer zugeführt (übersynchroner Betrieb). Diese Methode wird für große Antriebe mit begrenztem Drehzahlbereich verwendet, wie Windkraftanlagen, Kesselspeisepumpen oder Bahnstrom-Umformer. Im Jahr 2004 gingen die größten derartigen Kaskadenantriebe in Europa im Pumpspeicherwerk Goldisthal mit einer Leistung von 340 MVA (325 MW im Motorbetrieb / 265 MW im Generatorbetrieb) und einer Drehzahlverstellung von (-10 ... +4 %) in Betrieb.

## 5.2 Umrichterbetrieb

Mit einem Frequenzumrichter kann die durch die Netzfrequenz vorgegebene maximale Drehzahl einer Maschine überschritten werden. Für besonders hohe Frequenzen und damit hohe Drehzahlen am Umrichter sind Maschinen mit besonders ausgelegten Lagern und verstärkter Isolation verfügbar. Die Drehzahlregelung erfolgt in einfachen Fällen nach einer F/U Kennlinie. Mit der Vektorregelung erreicht der Asynchronmotor jedoch auch durchaus Eigenschaften von Servomotoren

Zum Verständnis der Vorgänge einer Drehzahlregelung ist die Betrachtung des Ersatzschaltbilds der Asynchronmaschine unumgänglich. Das Ersatzschaltbild zeigt eine zur Maschine elektrisch äquivalente Schaltung, wie sie auch der Frequenzumrichter sieht.



Auf der linken Seite sieht man die Ständerwicklung mit dem Kupferwiderstand  $R_s$  und Blindwiderstand der Induktivität  $X_s$ . Rechts sieht man den Läufer oder Rotor. Die Induktivität  $X_r$  des Rotors ist praktisch zu vernachlässigen, da sie beim Kurzschlussläufer in der Regel aus nur einer einzigen Windung besteht. Der Wirkwiderstand  $R_r$  entspricht hingegen direkt der von der Maschine abgegebenen Wirkleistung. Dieser Wert verändert sich in der Praxis mit der Veränderung des Drehmoments bzw. der Belastung der Maschine jedoch wesentlich. Er ist lediglich im Leerlauf der Maschine nahezu unendlich groß.

Im Leerlauf besteht das Ersatzschaltbild des Asynchronmotors im Wesentlichen also aus  $R_s$  und  $X_s$ , weshalb eine solche Maschine fast nur Blindleistung aufnimmt. Der Gesamtstrom entspricht im Leerlauf deshalb auch in etwa dem Nennstrom und die Maschine wird bei Leerlauf auch annähernd so heiß wie bei Nennbelastung. Mit zunehmender Belastung steigt der Wirkstrom durch  $R_r$ . Bei hochmagnetisierten Asynchronmotoren findet mit ansteigendem Drehmoment jedoch zunächst durchaus ein Rückgang des Gesamtstroms statt, welcher erst später mit steigendem Drehmoment dann wieder bis zum Nennstrom ansteigt.

Von der Asynchronmaschine wird also mit  $X_s$  ein Blindstrom aufgenommen, welcher für die Magnetisierung der Maschine sorgt. Im Gegensatz zur Synchronmaschine muss die magnetische Durchflutung in der Asynchronmaschine erst durch den Blindstrom in der Ständerwicklung aufgebaut werden. Ist dieser Blindstrom und damit die Durchflutung zu jedem Zeitpunkt konstant, so erreicht der Asynchronmotor ähnlich ideale Eigenschaften wie ein Synchronmotor, welcher mit Permanentmagneten aufgebaut sein kann.

Leider ist ein konstanter Blindstrom wegen des Spannungsabfalls über  $R_s$  nur sehr schwierig zu erreichen, da auch der stark belastungsabhängige Strom durch  $R_r$  einen Spannungsabfall über  $R_s$  erzeugt. Außerdem ist der Kupferwiderstand  $R_s$  stark temperaturabhängig. Hinzu kommt, dass im Umrichterbetrieb bei immer kleiner werdender Frequenz der Blindwiderstand  $X_s$  ebenfalls immer kleiner wird. Damit wird das Verhältnis des Spannungsteilers  $R_s$  zu  $X_s$  immer ungünstiger und  $R_s$  ist keineswegs mehr zu vernachlässigen. Aus diesem Grund kann mit der Asynchronmaschine ein Haltemoment bei der Drehzahl gegen Null nur noch mit der relativ aufwendigen Vektorregelung erreicht werden.

## 6 LEISTUNGSELEKTRONIKHALBLEITER

### 6.1 Der Thyristor

Der Thyristor ist ein Elektronisches Bauteil, ein Mehrschichthalbleiter. Der Name ist eine Schöpfung aus Thyatron und Transistor und bezeichnet einen steuerbaren Gleichrichter in Halbleiterausführung.

### 6.2 Aufbau & Funktionsweise

Er hat drei pn-Übergänge in der Folge pnpn. Wie eine Diode hat der Thyristor Anode und Kathode und zusätzlich einen Gate-Anschluss.



Thyristor 100 Ampère/800 Volt

kleines Bild: Thyristor 13 Ampère/800 Volt in Standardgehäuse TO-220 (Bleistift zum Größenvergleich)

Im Grundzustand ist der Thyristor in beiden Richtungen sperrend. In Durchlassrichtung sperrt er bis zu einer Durchbruchspannung (Nullkippspannung für eine Gate-Kathoden-Spannung von 0 V). In Durchlassrichtung kann er durch einen Stromimpuls am Gate in einen leitenden Zustand geschaltet werden. In Sperrrichtung sperrt er den Strom wie eine normale Diode. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Zündung:

Konventionelle:

Steuerstrom (ein positiver Strom oder Stromimpuls am Gate),

Lichtzündung (Fotothyristor)

Praktisch wird der Thyristor als steuerbare Diode eingesetzt. Durch Strominjektion in die dritte Schicht (Ansteuerung am Gate) kann der Thyristor gezündet (leitfähig geschaltet) werden. Voraussetzung dafür ist eine positive Spannung zwischen Anode und Kathode, sowie ein Mindeststrom durch die mittlere Sperrschicht. Gelöscht (in den Sperrzustand versetzt) wird der Thyristor durch Unterschreiten des Haltestroms, im Allgemeinen durch Abschalten oder Umpolen der Spannung im Laststromkreis.

### 6.3 Einsatzgebiete

Thyristoren werden für große Ströme bis über 100 MA (Megaampere) gebaut. Problematisch ist die Stromdichte in der 3. Schicht beim Zündvorgang. Beim Injizieren der Elektronen wird die Schicht an der Eintrittsstelle leitend. Bis die gesamte Siliziumfläche leitend ist, konzentriert sich der Strom auf den schon leitenden Bereich, in dem die gesamte Verlustleistung umgesetzt wird. Dabei kann die Verlustleistungsdichte den zulässigen Wert überschreiten und zu örtlichen Temperaturerhöhungen, über die Schmelztemperatur (1.685 K) des Siliziums hinaus, führen. Deshalb ist es besonders wichtig, dass der Zündstrom einen steilen Stromanstieg hat. Dazu werden in der Praxis Diacs eingesetzt. Diese Vorgänge brauchen Zeit. Die üblichen Thyristoren haben daher Grenzfrequenzen von 200 Hz.

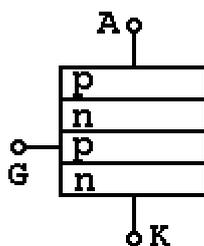
Thyristoren haben ein breites Anwendungsfeld, von der Steuerung elektrischer Motoren bis zur Lichtsteuerung (Dimmung). Thyristoren haben steuerbare Quecksilberdampfgleichrichter, wie Thyratrons, Ignitrons und Excitrons fast vollständig ersetzt. Sie werden auch für größte Leistungen, wie in Anlagen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung verwendet.

Im Bereich einiger Megawatt, wie z. B. in Elektrolokomotiven, wurden Thyristoren ihrerseits bereits wieder durch IGBTs verdrängt.

Die Kennbuchstaben für den Halbleiter, die ihn grob klassifizieren, werden meist aufgedruckt.

### 6.4 GTO-Thyristor

Der GTO-Thyristor (engl. Gate Turn-Off Thyristor) ist ein Thyristor, der wie ein normaler Thyristor mit einem positiven Spannungsimpuls am Steuereingang eingeschaltet werden kann. Im Gegensatz zum normalen Thyristor kann er allerdings auch mittels eines negativen Spannungsimpulses ausgeschaltet werden. Diese Abschaltmöglichkeit vereinfacht die Ansteuerelektronik und vermeidet die sogenannten Löschsaltungen klassischer Thyristorelektronik. Die elektrischen Eigenschaften sind vergleichsweise schlecht. Angewandt werden GTO-Thyristoren in einem Leistungsbereich, der über dem Leistungsbereich von Leistungstransistoren liegt und unterhalb dem Leistungsbereich klassischer Thyristoren. Eine Anwendung war die Bahnstromtechnik, vor der Einführung von IGBTs.



### 6.5 Triac

Triac ist die Kurzform für Thyristortriode. Damit ist ein elektronisches Bauteil gemeint, welches vom Prinzip her eine Antiparallelschaltung von zwei Thyristoren darstellt.

Dies ermöglicht es, beide Halbwellen einer Wechselspannung mit einem Bauteil zu steuern.

Ein Triac hat eine Steuerelektrode G (engl. gate) und zwei Anoden A1 und A2, wobei Anode A2 eine direkte Verbindung mit dem Gehäuse hat. Damit für die beiden Thyristoren ein Steueranschluß ausreicht, sind in Triacs zwei Zünd- oder Hilfsthystorenstrecken eingebaut, damit er mit positivem und negativem Steuerimpuls in den niederohmigen Zustand gekippt werden kann.

Triacs können nicht für sehr große Ströme hergestellt werden, deshalb werden dort immer noch einzelne Thyristoren eingesetzt.

## 6.6 Power MOSFET

Der Power MOSFET Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Field Effect Transistor (FET) ist ein industrielles Standardbauteil zur Beeinflussung des elektrischen Stromes. Er wird als Leistungsverstärker und Schalter verwendet und wirkt wie ein spannungsgesteuerter Widerstand.

Ein Power MOSFET ist eine spezialisierte Version eines MOSFET, die für das Leiten und Sperren von großen elektrischen Strömen und Spannungen optimiert ist (bis mehrere hundert Ampere und bis ca. 1000 Volt, bei einem Bauteilvolumen von ca. einem Kubikzentimeter). Die hohe Leistungsdichte wird durch eine Halbleiterstruktur erreicht, die einer Parallelschaltung von vielen einzelnen MOSFETs entspricht.

Von den in integrierten Schaltkreisen verwendeten MOSFETs unterscheiden sich Power MOSFETs bei gleichem physikalischem Prinzip durch andere geometrische Dimensionen. Ab einer Strombelastbarkeit von etwa 1A wird ein MOSFET den Power MOSFETs zugeordnet.

Power MOSFETs unterscheiden sich von Power Bipolartransistors sowohl in der Funktionsweise, als auch in der Effizienz. Einige Vorteile von Power MOSFETs sind die schnelle Schaltzeit, kein zweiter Durchbruch und stabile Verstärkungs- und Antwortzeiten.

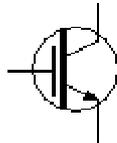
Der Aufbau des Power MOSFET entspricht dem des MOSFET allerdings ergeben sich zahlreiche Besonderheiten. Im Gegensatz zum Signaltransistor der Nachrichtentechnik ist die Anordnung von Source und Drain vertikal. In der Halbleiterstruktur von Gate, Drain und Source entstehen in einem MOSFET zahlreiche parasitäre Bauelemente wie z.B. Widerstände, Kapazitäten und Dioden. In der Leistungselektronik muss diesen Bauelementen besondere Beachtung geschenkt werden. Die enthaltenen Kapazitäten müssen bei jedem Schaltvorgang umgeladen werden, was besonders bei hohen Schaltfrequenzen zu erheblichen Schaltverlusten führt. Die prinzipbedingt immer mitenthaltene Diode, die im Normalbetrieb in Sperrrichtung geschaltet ist, kann wie eine zu Drain-Source parallelgeschaltete Diode schaltungstechnisch ausgenutzt werden. Je nach Anforderung müssen noch weitere Effekte berücksichtigt werden.

Es gibt hauptsächlich zwei Typen von Power MOSFETs, die DMOS und VMOS Struktur. Beide besitzen eine grosse Drain-Drift-Region, welche das Bauteil gegen Durchbruch bei hohen Sperrspannungen schützt

Power MOSFETs werden häufig in Verstärkerschaltungen durch die bedingte fast leistungslose Ansteuerung des Gates und als Schalter für die Pulsweitenmodulation

eingesetzt, z.B. in Wechselrichtern, Schaltnetzteilen, DC/DC Wandlern, Antriebssystemen. Weiterhin ist bei Verstärkerschaltungen die extrem schnelle Anstiegszeit bei MOSFET fast ideal. In diesen Anwendungen werden häufig induktive Lasten geschaltet. Induktive Lasten erzeugen bei einer schnellen Stromänderung, wie sie beim Schaltvorgang eintritt, große Spannungsspitzen, gegen die der Power MOSFET besonders geschützt werden muss. Dieser Schutz kann im Bauteil selbst vorhanden sein (Avalancheeffekt). Oft ist eine zusätzliche externe Beschaltung (Snubber) notwendig. Power MOSFETs sollten bei hohen Leistungen entsprechend gekühlt werden.

## 6.7 Insulated Gate Bipolar Transistor



Modul aus zwei IGBTs

Ein Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ist ein Halbleiterbauelement, welches zunehmend in der Leistungselektronik verwendet wird, da es die Vorteile des Bipolartransistors (gutes Durchlassverhalten, hohe Sperrspannung) und die Vorteile eines Feldeffekttransistors (nahezu leistungslose Ansteuerung) vereinigt. Vorteilhaft ist auch eine gewisse Robustheit gegenüber Kurzschlüssen, da der IGBT den Laststrom begrenzt.

IGBT werden unter anderem im Hochleistungsbereich eingesetzt, da sie über eine hohe Sperrspannung (derzeit bis 6,6 kV) verfügen und hohe Ströme (bis etwa 3 kA) schalten können.

Nachteilig sind die gegenüber Leistungs-MOSFET großen Schaltverluste sowie der prinzipiell vorhandene Spannungsabfall von wenigen Volt im eingeschalteten Zustand. Daher liegt der Hauptanwendungsbereich bei höheren Spannungen ab einigen 100V, hohen Leistungen und relativ geringen Arbeitsfrequenzen (max. 200kHz)

## 6.8 Eigenschaften

IGBTs haben wie bipolare Transistoren einen kleinen Durchlasswiderstand.

Die Durchlassverluste sind um einiges kleiner gegenüber vergleichbaren Feldeffekttransistoren.

Beim IGBT handelt es sich wie beim FET um ein spannungsgesteuertes Bauelement.

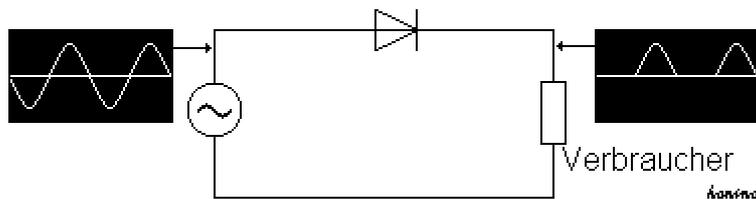
Im Gegensatz zu Leistungs-MOSFETs können Punch Through IGBTs (PT-IGBT) zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit nicht ohne weiteres parallel geschaltet werden. Non-Punch Trough IGBTs (NPT-IGBT) hingegen besitzen wie die Leistungs-MOSFETs einen positiven Temperaturkoeffizienten und können parallel geschaltet werden. In den meisten IGBT-Hochleistungsmodulen wird dies auch getan.

Der IGBT ist in Rückwärtsrichtung nur begrenzt sperrfähig, so dass bei Bedarf Freilaufdioden- beschaltungen mit kurzen Abschaltzeiten eingebaut werden müssen.

## 7 AC – DC GLEICHRICHTER

Gleichrichter werden in der Elektrotechnik zur Umwandlung des elektrischen Wechselstroms zu Gleichstrom verwendet.

### 7.1 Gleichrichterschaltungen



Es gibt gesteuerte (mit Thyristoren) und ungesteuerte (mit Dioden) Gleichrichterschaltungen. Sie reichen von der einfachen Einweggleichrichtung (1-pulsig) über 2-, 3-, 6-, bis zu 12-pulsigen Schaltungen und höher. Bei höherer Pulszahl sinkt die Welligkeit und der Glättungsaufwand sinkt.

### 7.2 Glättung

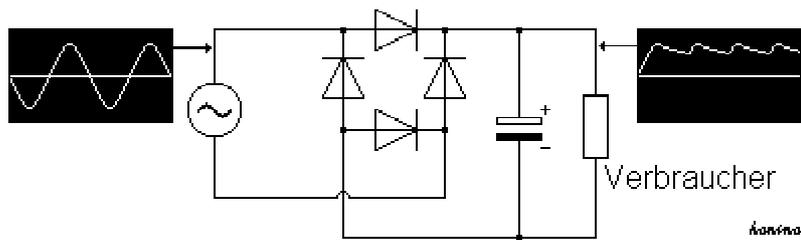
Durch Gleichrichtung entstehen aufgrund der ursprünglichen Wellenform der Spannung Unregelmäßigkeiten. Geglättet werden können diese durch einen parallel zum Verbraucher geschalteten Kondensator, der die Wellentäler ausgleicht. Die ab hier vorhandene Restwelligkeit bezeichnet man als Brummspannung. Weiter reduziert werden kann die Brummspannung durch nachgeschaltete so genannte Siebglieder (Filter).

Die Glättung ist umso besser, je höher die Kapazität des Kondensators und je geringer der Laststrom ist.

Wert der Brummspannung bei Einweggleichrichtung:

$$U_{BS} \approx \frac{I_L}{C \cdot f}$$

(Dioden-Schaltung nach Graetz mit Glättungskondensator)



### 7.3 Bauarten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung der Gleichrichtung:

Beim so genannten Kontaktgleichrichter wird ein Kontakt mit Hilfe eines Relais synchron zur Frequenz der gleichzurichtenden Wechselspannung bewegt.

Taucht man in verdünnte Schwefelsäure eine Platinelektrode und eine Niobelektrode ein und legt an diese eine Spannung, so kann nur Strom fließen, wenn die Niobelektrode Kathode ist. Man spricht hier von einem elektrolytischen Gleichrichter. Solche Gleichrichter können auch mit anderen Elektrolyten und Metallen realisiert werden. Wichtig ist, dass eine Elektrode aus einem Metall mit hoher Neigung zu Passivierung, wie einem Refraktärmetall oder Aluminium besteht.

Früher häufig verwendet war auch die Röhrendiode. Sie funktioniert durch Glühemission von Elektronen aus der beheizten Kathode einer Elektronenröhre. Die Kathode kann nur Elektronen emittieren, wenn sie Minuspol ist.

Beim Quecksilberdampfgleichrichter übernimmt eine Kathode aus flüssigem Quecksilber diese Funktion. Sie kann Elektronen leichter emittieren als die aus Eisen, Wolfram oder Graphit gefertigten Elektroden des Quecksilberdampfgleichrichters.

Heute wird nur noch der Halbleitgleichrichter verwendet. Er besteht aus einem n-dotierten und einem p-dotierten Material. Strom kann nur fließen, wenn das p-dotierte Material am positiven Pol und das n-dotierte Material am negativen Pol hängt. Andernfalls befinden sich in der Mitte des Gleichrichters zu wenig Ladungsträger und es fließt (im Idealfall) kein Strom.

Mit Schottky-Dioden können Gleichrichter mit besonders niedriger Flußspannung gebaut werden. Diese kommen vor allem in Schaltnetzteilen zur Anwendung.

Synchrone geschaltete Gleichrichter mit Mos-FETs als aktive Schalter. Dabei werden die Schalter zu bestimmten Zeitpunkten durch eine Steuerelektronik ein- und ausgeschaltet und damit eine Gleichrichtwirkung erzielt. Der Vorteil besteht trotz erhöhtem Schaltungsaufwand in den wesentlich geringeren Spannungsverlusten am Gleichrichter durch den Einsatz von Mos-FETs mit sehr kleinen Widerständen im durchgeschalteten Zustand. Synchron geschaltete Gleichrichter werden vor allem in Schaltnetzteilen mit niedrigen Ausgangsspannungen eingesetzt.

### 7.4 Geschichte

Die erste Vorrichtung zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom war der Kommutator einer rotierenden elektrischen Maschine (Umformer). Da an Kommutatoren relativ hoher Verschleiß an den Kohlebürsten auftritt, versuchte man bald andere Wege zur Gleichrichtung von Strom zu finden.

Der erste Schritt für hohe Spannungen bei kleineren Strömen war der Quecksilberdampfgleichrichter. Ein Quecksilberdampfgleichrichter besteht aus einem Glaskolben in dem unten eine Kathode mit einem Quecksilbersee ist. Darüber wölbt

sich ein Glaskolben, der das Quecksilber wieder kondensiert. Seitlich sind wie Arme Glaskolben mit Graphitelektroden als Anoden angeschmolzen. Der Strom kann nur durch das bei Entladungen verdampfte Quecksilber vom See zu den Graphitelektroden fließen, in die andere Richtung fehlt das leitende Quecksilber.

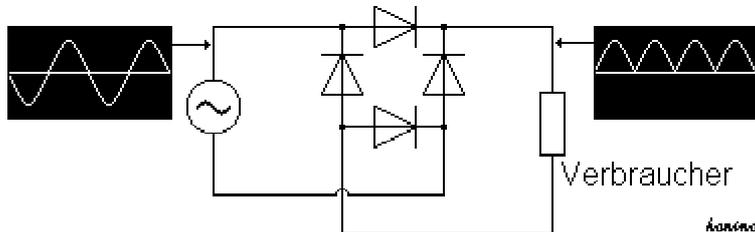
Später wurden die ersten Halbleitergleichrichter in Form von Selen-Plattengleichrichter erfunden. - Eine Selenplatte hat je nach Herstellung eine Sperrspannung von 15 bis 50 V und einen relativ hohen Flusswiderstand von ca 30 Ohm. Um große Spannungen gleichzurichten und um die Abwärme abzuleiten, wurden die Selenplatten gestapelt und mit Kühlflächen versehen, was diesem Gleichrichtern ein charakteristisches Aussehen verlieh.

Im Niederspannungsbereich wurden die Detektorkristalle aus Bleiglanz oder Pyrit benützt: Ein Halbleiter-Metall-Übergang der aus einem Halbleiterkristall und einer tastenden Metallspitze bestand.

## 7.5 Brückengleichrichter

Der heute vermutlich bedeutendste Gleichrichter ist der Brückengleichrichter (Graetzschaltung), der aus einer Schaltung von vier Dioden gebildet wird, die je nach Sperrrichtung der Diode nur eine Halbwelle des Wechselstromes durchlassen. So erscheint die negative Halbwelle des Wechselstromes im Gleichstromkreis ebenfalls positiv.

(Dioden-Schaltung nach Graetz)



## 7.6 Steuerbare Gleichrichter

Steuerbare Gleichrichter mit Thyristoren als Ventile sperren den Strom in beide Richtungen, bis an der Steuerelektrode eines Ventils ein Zündimpuls erfolgt. Auch nach Erlöschen des Steuerpulses bleibt der Stromfluss bestehen. Erst wenn der Strom unter einen bestimmten Schwellwert (Haltestrom) sinkt, sperrt er wieder. Es gibt allerdings auch sog. GTO-Thyristoren, die auch das Sperren eines Ventils durch einen Impuls erlauben. Steuerbare Gleichrichter finden Anwendung in Dimmern, Drehzahlsteuerung von Gleichstrom- bzw. Universalmotoren (z.B. in Industrieanlagen oder Haushaltsgeräten), in modernen Elektrolokomotiven zur Beaufschlagung des Gleichspannungs-Zwischenkreises und in Anlagen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. Früher wurden für diesen Zweck gittergesteuerte Quecksilberdampfgleichrichter, wie Thyratrons und Ignitrons eingesetzt. Heute werden für diesen Zweck nur noch Thyristoren verwendet.

## 8 DC – AC UMRICHTER

### 8.1 Die PWM Modulation

Die Pulsweitenmodulation (PWM) ist eine Modulationsart bei der eine technische Größe (z. B. elektrischer Strom) zwischen zwei Werten wechselt. Dabei wird das Tastverhältnis bei konstanter Frequenz moduliert. Ein PWM Signal wird allgemein über einen Tiefpass demoduliert. Die resultierende demodulierte technische Größe, entspricht dem Integral und damit der Fläche unter der modulierten Größe (Integralrechnung).

PWM ist auch unter Pulsbreitenmodulation (PBM) und Pulsdauermodulation (PDM) bekannt.

Ein anschauliches Beispiel für diese Modulationsart ist ein Schalter mit dem man eine Heizung ständig ein- und ausschaltet. Je länger die Einschaltzeit gegenüber der Ausschaltzeit ist, um so höher die mittlere Heizleistung. Die Temperatur der Heizung kann nur vergleichsweise langsam dem Ein- und Ausschaltvorgang folgen und ergibt so das notwendige Tiefpassverhalten zur Demodulation.

Einsatzgebiete

Die Pulsweitenmodulation wird zur Informationsübertragung und zusätzlich häufig zur Steuerung der Energieumwandlung in einem technischen System eingesetzt.

### 8.2 Steuerungstechnik

Um analoge Signale über eine digitale Strecke zu Übertragen, nutzt man die glättende Tiefpasswirkung einer Induktivität, z.B. eines Motors oder einer Spule, um digitale Impulse wieder in eine analoge Schwingung zu verwandeln. So lassen sich mit Schaltungen wie z.B. Mikrocontrollern, die nur digitale Signale „verstehen“, analoge Signale erzeugen, bzw analoge Geräte (Motoren usw). ansteuern

### 8.3 Leistungselektronik

Weiteres wichtiges Einsatzgebiet der PWM ist die Leistungselektronik. Da an Leistungsschaltern möglichst wenig Verlustenergie abgegeben werden soll, werden diese nur in zwei Kennpunkten betrieben: Voll sperrend (kaum Strom, voller Spannungsabfall) oder voll durchgeschaltet (voller Strom, kaum Spannungsabfall). Der Effektivwert der Spannung wird dabei um das Verhältnis Einschaltzeit / Periodendauer reduziert.

Einsatzbereiche sind Gleichstromsteller, Frequenzumrichter bzw. Elektromotoren, Heizelemente, Dimmer, PC-Netzteile.

### 8.4 Erzeugung

Zur Erzeugung eines PWM-Signales aus digital vorliegenden Daten (z.B. Motorsteuerung) kommen geeignete Zähler/Vergleicherschaltungen zum Einsatz. Die

Timer-Funktionen in vielen Mikrocontrollern enthalten bereits entsprechende Funktionen.

Ein PWM-Signal kann auch mittels eines Komparators durch Vergleich des Analogsignals mit einem geeigneten Trägersignal erzeugt werden, wobei vor allem Sägezahn- und Dreieckssignale zum Einsatz kommen:

ansteigendes Sägezahnsignal (rückflankenmoduliert): Die Vorderflanke (ansteigende Flanke) der Schaltfunktion ist fest und die Position der Rückflanke (abfallende Flanke) wird moduliert.

abfallendes Sägezahnsignal (vorderflankenmoduliert): Die Position der Vorderflanke der Schaltfunktion wird moduliert und die Rückflanke bleibt fest.

Dreieckssignal für symmetrische Modulation: Bei dieser Modulationsart werden die Positionen beider Flanken der Schaltfunktion moduliert. Ändert der Sollwert innerhalb einer Trägerperiode nur wenig, so sind die beiden Schaltflanken näherungsweise symmetrisch zu den Scheitelpunkten des Dreieckssignals.

## 9 AC – AC FREQUENZUMRICHTER

Ein Frequenzumrichter ist ein Gerät, das aus einem Wechselstrom (auch Drehstrom) mit bestimmter Frequenz eine veränderte Spannung in Höhe und Frequenz generiert. Mit dieser umgerichteten Frequenz wird dann der Verbraucher betrieben.

Heute werden dazu meist elektronische Geräte verwendet, früher wurden Netze unterschiedlicher Frequenz über rotierende Umformer gekoppelt. Allerdings werden mechanische Anlagen immer noch in Bahnstromumformerwerken verwendet.

### 9.1 Grundsätzliches

Im Prinzip besteht der elektronische (statische) Frequenzumrichter aus einem Gleichrichter, der einen Gleichstrom- oder Gleichspannungs-Zwischenkreis speist, und einem aus diesem Zwischenkreis gespeisten Wechselrichter. Die Höhe der Ausgangsspannung und auch deren Frequenz können in weiten Grenzen geregelt werden.

Des Weiteren findet man gelegentlich sogenannte Direktumrichter, auch Matrixumrichter genannt, bei denen über Halbleiterschalter jede Netzphase mit jeder Phase der Last direkt verbunden werden kann. Der Zwischenkreis mit der Gleichgröße entfällt somit.

Ein Direktrichter kann jedoch nur Ausgangsfrequenzen kleiner der Eingangsfrequenz erzeugen, ein Zwischenkreisumrichter kann auch Ausgangsfrequenzen erzeugen, die deutlich oberhalb der Eingangsfrequenz liegen (bis mehrere hundert Hz).

## 10 DC-DC GLEICHSTROMSTELLER

Ein Gleichstromsteller (auch als DC-DC-Steller, DC-DC-Wandler oder getakteter Spannungssteller bezeichnet) ist eine elektronische Schaltung zur Spannungswandlung. Zur Speicherung der Energie wird dabei eine Induktivität benutzt (induktiver Wandler). Im Gegensatz dazu werden Wandler mit kapazitiver Speicherung (kapazitiver Wandler) als Ladungspumpen bezeichnet.

Induktive Wandler haben den Vorteil, dass sie größere Mengen Energie als die kapazitiven Wandler zwischenspeichern können und damit in der Leistungselektronik eingesetzt werden können. Ladungspumpen hingegen werden eingesetzt, wenn entweder - wie in integrierten Schaltungen - keine Induktivitäten vorhanden sind, oder wenn so wenig Ausgangsleistung erforderlich ist, dass sich der Einsatz der teuren Spulen gegenüber den billigen Kondensatoren nicht lohnt.

### 10.1 Bauarten

Ein Gleichstromsteller besteht prinzipiell aus einem elektronischen Schalter (meist ein IGBT oder Power MOSFET), einer Spule und einer Diode. Es werden drei grundsätzliche Topologien unterschieden (siehe Bilder):

Abwärtswandler (Tiefsetzsteller, "Step down"- oder Buck-Converter)

Aufwärtswandler (Hochsetzsteller, "Step up"- oder Boost-Converter)

In Anlehnung an die weiter unten beschriebenen kombinierten Bauarten nennt man einen einfachen Gleichstromsteller auch Einquadrantensteller (1qS).

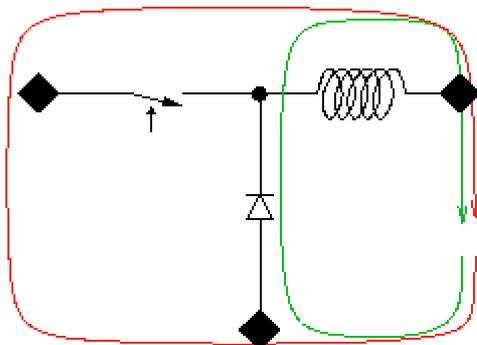
### 10.2 Tiefsetzsteller, Step Down Converter, Buck Converter

Beim Tiefsetzsteller ist die Ausgangsspannung immer kleiner als die Eingangsspannung.

Ist der Schalter geschlossen, fließt der Strom entlang des roten Pfades. Der Strom in der Spule wird größer.

Bei geöffnetem Schalter leitet der passive Schalter (die Diode) und der Strom fließt entlang des grünen Pfades. Der Strom in der Spule wird kleiner.

Anhand der Pfeile erkennt man, dass der Ausgang kontinuierlich mit Strom versorgt wird, während der Eingang lediglich bei geschlossenem Schalter mit der Aufladung der Spule belastet wird.



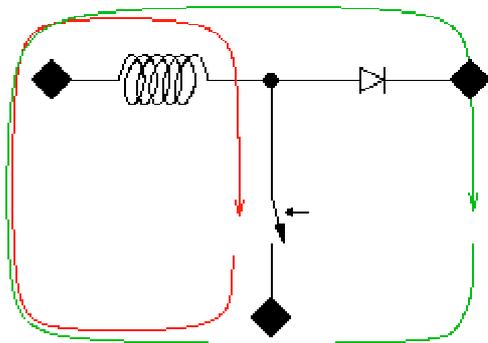
### 10.3 Hochsetzsteller, Step Up Converter, Boost Converter

Beim Hochsetzsteller ist die Ausgangsspannung immer größer als die Eingangsspannung.

Ist der Schalter geschlossen, fließt der Strom entlang des roten Pfades. Der Strom in der Spule wird größer. Der magnetische Speicher (die Spule) wird geladen.

Bei geöffnetem Schalter leitet der passive Schalter (die Diode) und der Strom fließt entlang des grünen Pfades. Der Strom in der Spule wird kleiner. Die Energie, die im Magnetfeld der Spule gespeichert war wird nun an den Verbraucher abgegeben.

Anhand der Pfeile erkennt man, dass der Eingang kontinuierlich, aber mit wechselnder Belastung mit Strom belastet wird, während der Ausgang lediglich phasenweise mit Spulenstrom versorgt wird.



### 10.4 Eigenschaften

Prinzipbedingt kann bei einem Gleichstromsteller der Strom nur in eine Richtung fließen (in der anderen Richtung wäre die Diode in Sperrstellung). Damit Gleichstromsteller in der Praxis sinnvoll eingesetzt werden können (Motor im Rechts- und Linkslauf, Generator/Bremse im Rechts- und Linkslauf), ist meist eine Kombination aus mehreren verschiedenen Bauarten zu einem Zwei- oder Vierquadrantensteller nötig.

Für die Regelung der Schalterstellung (ein/aus) gibt es unterschiedliche Verfahren.

Da Gleichstromsteller den Eingangsstrom ständig ein- und wieder ausschalten, liegt am Ausgang kein reiner Gleichstrom vor. Vor allem kann der Strom nicht schlagartig ausgeschaltet werden, da im Schaltkreis immer Induktivitäten (Drosseln, Filter, Motorspulen, sog. parasitäre Induktivitäten) enthalten sind, in denen magnetische Feldenergie gespeichert ist, die erst abgebaut werden muss. Zu diesem Zwecke kommt antiparallel zum Schalter immer auch eine Freilaufdiode zum Einsatz, die den Stromfluss übernimmt (Kommutierung). Bei vielen Verbrauchern können die rechteckförmigen Spannungen auch zu Störungen führen, weshalb man die Spannung am Ausgang meist noch mittels eines Glättungskondensators glättet. Häufig wird auch ein linearer Spannungsregler nachgeschaltet, um die restlichen Störungen zu glätten.

### 10.5 Einsatzgebiet

Gleichstromsteller finden sich in Schaltnetzteilen, mit der Verbraucher wie PC-Netzteile, Notebooks, Mobiltelefone, Kleinmotoren, HiFi-Geräte uvm. betrieben werden. Ihre Vorteile gegenüber Linearnetzteilen liegen im besseren Wirkungsgrad und geringerer Wärmeentwicklung. Vor allem ersteres spielt bei der Wandlung einer Batteriespannung eine große Rolle, da die Lebensdauer der Batterie bei einem Schaltnetzteil wesentlich höher liegt: Bei einem linearen Spannungsregler oder einem Vorwiderstand hingegen wird die überflüssige Spannung einfach "verheizt". Die beim Schaltnetzteil auftretenden Schaltverluste sind demgegenüber zu vernachlässigen.

Neben seinem Zweck als Spannungswandler dient ein getakteter Spannungssteller auch gleichzeitig als Filter, um gerade bei Hochleistungsanwendungen wie Elektrolokomotiven den negativen Einfluss der Maschine auf das Stromnetz (sog. Netzurückwirkung) so gering wie möglich zu halten.

GNU Free Documentation License  
Version 1.2, November 2002

Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.  
59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA  
Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies  
of this license document, but changing it is not allowed.

## 0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

## 1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical

connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title"

of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

## 2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

## 3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material.

If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

#### 4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D. Preserve all the copyright notices of the Document.
- E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- H. Include an unaltered copy of this License.
- I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- J. Preserve the network location, if any, given in the Document for

- public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
  - L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
  - M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
  - N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
  - O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties--for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

## 5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but

different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number.

Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

## 6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

## 7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form.

Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

## 8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

## 9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

## 10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.  
Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document  
under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2  
or any later version published by the Free Software Foundation;  
with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.  
A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts,  
replace the "with...Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the  
Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being  
LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.