

# Normung Technik Grundlagen

## Transformatoren



**ismet**

<b>1</b>	<b>ALLGEMEINE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>4</b>
1.1	<b>Gleichstromkreis.....</b>	<b>4</b>
1.1.1	Stromdichte.....	4
1.1.2	Die Grundelemente R und L im Gleichstromkreis.....	4
1.2	<b>Wechselstromkreis.....</b>	<b>5</b>
1.2.1	Wechselstromgrößen.....	5
1.2.2	Der Drehstromkreis.....	5
1.2.3	Zeigerdiagramm.....	6
1.2.4	Die Grundelemente R und L im Wechselstromkreis.....	6
1.3	<b>Das magnetische Feld.....</b>	<b>7</b>
1.3.1	Beschreibung des magnetischen Feldes.....	7
1.3.2	Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz.....	7
1.3.3	Die magnetische Flussdichte.....	7
1.3.4	Das Induktionsgesetz für ruhende Anordnungen.....	8
1.3.5	Magnetische Kopplung.....	9
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN DES TRANSFORMATORS.....</b>	<b>10</b>
2.1	<b>Sinn und Zweck.....</b>	<b>10</b>
2.2	<b>Aufbau.....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Transformatorkern von Einphasen- und Drehstromtransformatoren.....	10
2.2.2	Wicklung.....	12
2.2.3	Isolierung.....	13
2.3	<b>Wachstumsgesetze und Kühlung.....</b>	<b>13</b>
2.4	<b>Wirkungsweise des idealen Transformators.....</b>	<b>14</b>
2.5	<b>Betriebsverhalten des realen Transformators.....</b>	<b>15</b>
2.5.1	Leerlaufversuch.....	15
2.5.2	Kurzschlussversuch.....	15
2.5.3	Ersatzschaltbild.....	15
2.5.4	Kapp'sches Dreieck.....	16
2.6	<b>Einfluss von Belastungsänderungen.....</b>	<b>16</b>
2.6.1	Ausgangsspannung und Ausgangsstrom bei Belastung.....	16
2.6.2	Erwärmung.....	16
2.6.3	Isolationswiderstand und Spannungsfestigkeit.....	16
<b>3</b>	<b>DREHSTROMTRANSFORMATOREN.....</b>	<b>17</b>
3.1	<b>Schaltgruppen.....</b>	<b>17</b>
3.1.1	Übersetzungsverhältnis und Schaltgruppen.....	19
3.2	<b>Last.....</b>	<b>19</b>
3.2.1	Symmetrische Last, Schiefelast.....	19
3.2.2	Unsymmetrische Belastung.....	19
3.2.3	Auswahl der Schaltgruppen.....	23
<b>4</b>	<b>ANWENDUNGEN DES TRANSFORMATORS.....</b>	<b>24</b>
4.1	<b>Gleichspannungstransformatoren.....</b>	<b>24</b>
4.2	<b>Vollgesteuerte, halbgesteuerte oder ungesteuerte Stromrichterschaltungen.....</b>	<b>24</b>
4.3	<b>ungeregelte Gleichspannungsversorgungen.....</b>	<b>24</b>
4.3.1	Stromrichterschaltungen.....	24
4.3.2	Gleichrichterschaltungen.....	25
4.3.3	Wärmebelastung durch Oberwellen.....	27
4.4	<b>geregelte Gleichspannungsversorgungen.....</b>	<b>28</b>
4.4.1	Linearregler.....	28
4.4.2	Getaktete Gleichspannungsversorgung.....	28
4.5	<b>Anlasstransformator.....</b>	<b>29</b>
4.6	<b>Spartransformatoren.....</b>	<b>30</b>
4.6.1	Dimensionierung.....	30
4.7	<b>Steuertransformatoren.....</b>	<b>31</b>
4.8	<b>Potentialtrennung.....</b>	<b>32</b>
4.8.1	Potentialtrennung 1:1.....	32
4.9	<b>Spannungskonstanthalter.....</b>	<b>32</b>
4.10	<b>Schweißtransformatoren.....</b>	<b>34</b>
4.10.1	Wicklungsbeschaffenheiten des Schweißtransformators.....	34
4.11	<b>Streuerntransformator.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>DROSSELSPULEN.....</b>	<b>36</b>
5.1	<b>Allgemeine Angaben.....</b>	<b>36</b>
5.2	<b>Durchflutung.....</b>	<b>36</b>
5.2.1	Selbstinduktion.....	37
5.3	<b>Drosselarten und Einsatz.....</b>	<b>38</b>
5.3.1	Luftdrossel.....	38
5.3.2	Drosselspule mit Eisenkern für Wechselstrom.....	39
5.3.3	Drosselspule mit Eisenkern für Gleichstrom.....	45
5.3.4	Entstördrosseln.....	47
<b>6</b>	<b>TRANSDUKTOREN.....</b>	<b>48</b>
6.1	<b>Wirkungsweise.....</b>	<b>48</b>
6.2	<b>Anwendungen.....</b>	<b>48</b>
6.3	<b>Aufbau.....</b>	<b>48</b>
6.4	<b>Spannungssteuernde Transduktoren.....</b>	<b>49</b>
6.5	<b>Stromsteuernde Transduktoren.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>SINUSFILTER.....</b>	<b>52</b>
7.1	<b>Einleitung.....</b>	<b>52</b>
7.2	<b>Die Probleme von Umrichtern mit PBM.....</b>	<b>52</b>
7.3	<b>Wirkung.....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>DEFINITION DER SCHUTZARTEN.....</b>	<b>56</b>

<b>9</b>	<b>NORMUNG</b> .....	<b>57</b>
9.1	<b>Gültigkeitsbereiche:</b> .....	<b>57</b>
9.1.1	International .....	57
9.1.2	Europäisch (EN-Normen).....	57
9.1.3	National .....	57
9.2	<b>Normungsorganisationen</b> .....	<b>57</b>
9.2.1	ISO, IEC – Internationale Organisation für Normung.....	57
9.2.2	VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. ....	58
9.2.3	CEN.....	58
9.2.4	DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. ....	58
9.2.5	CECENELEC .....	59
9.2.6	IEC – Internationale Elektrotechnische Kommission .....	59
9.2.7	CSA – Canadian Standards Association.....	59
9.2.8	UL – Underwriters Laboratories, Inc. ....	60
9.2.9	Weitere wichtige Prüfzeichen .....	60
9.3	<b>Zulassungsverfahren:</b> .....	<b>60</b>
9.3.1	CCA-Verfahren (CENELEC Certification Agreement).....	60
9.3.2	Anmerkungen zum CB-Verfahren (Certification Board).....	60
9.4	<b>EN 61558 / VDE 0570</b> .....	<b>61</b>
9.4.1	Gliederung der Vorschriften entsprechend dem Isolationsaufbau .....	61
9.4.2	Wichtige Normen für unser Leistungsspektrum .....	62
9.4.3	Zeichen.....	63
<b>10</b>	<b>ABSICHERUNG</b> .....	<b>64</b>
10.1	<b>Absicherungstabelle für Typ CSTN</b> .....	<b>64</b>



# 1 Allgemeine Grundlagen

## 1.1 Gleichstromkreis

### 1.1.1 Stromdichte

Die Stromdichte in einem stromdurchflossenen Leiter mit der Querschnittsfläche  $A$  ist definiert als:

$$j = \frac{dI}{dA}$$

$dI$  :Stromelement  
 $dA$  :Flächenelement

### 1.1.2 Die Grundelemente R und L im Gleichstromkreis

#### 1.1.2.1 Widerstand

An einem ohmschen Verbraucher besteht zwischen Strom und Spannung ein lineares Verhältnis. Es gilt das Ohmsche Gesetz:

$$u = i \cdot R$$

$u$  : Spannung  
 $i$  : Strom  
 $R$  :Widerstand

#### 1.1.2.2 Induktivität

An einer Induktivität gilt: Die Spannung ist proportional zu der zeitlichen Änderung des Stromes.

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

$L$  : Induktivität  
 $di$  : Stromänderung  
 $dt$  : Zeitänderung

#### 1.1.2.3 Temperaturabhängiger Widerstand

Reale Widerstände ändern ihren Wert in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Zusammenhang ist in erster Näherung linear. Wird ein Widerstand  $R$  um  $\Delta \vartheta$  erwärmt, so ändert sich dieser um:

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \beta \cdot \Delta \vartheta)$$

$\beta$  : Temperaturbeiwert  
 $R_{20}$  :Widerstand bei Bezugstemperatur  
 $\Delta \vartheta$  : Temperaturdifferenz

#### 1.1.2.4 Spezifischer (materialabhängiger Widerstand)

Jeder Leiter ist mit Verlusten behaftet, d.h. jeder Leiter hat einen Widerstand der vom Material abhängig ist. Der spezifische Widerstand eines Leiter kann berechnet werden:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

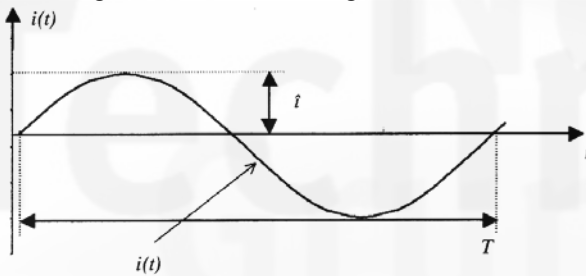
$R$  :Widerstand  
 $l$  :Länge  
 $A$  :Fläche  
 $\rho$  :spezifischer Widerstand

Material	Spez. Widerstand $\rho \cdot \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$
Kupfer	0.017
Eisen	0.1...0.4

## 1.2 Wechselstromkreis

### 1.2.1 Wechselstromgrößen

Wechselgrößen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie periodisch sind und der arithmetische Mittelwert Null ist.



$i$  : Augenblickswert  
 $\hat{i}$  : Scheitelwert, Amplitude  
 $T$  : Periodendauer  
 $t$  : Zeit

Bild 1.2.1: Kenngrößen einer Wechselgröße

#### 1.2.1.1 Arithmetischer Mittelwert

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) \cdot dt$$

Er entspricht der gesamten Fläche unter der Kurve in einer Periode unter Berücksichtigung des Vorzeichens.

#### 1.2.1.2 Der Gleichrichtwert

$$|\bar{i}| = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |i(t)| \cdot dt$$

Er entspricht der positiven Gesamtfläche unter der Kurve in einer Periode.

#### 1.2.1.3 Der Effektivwert

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot dt}$$

Der Effektivwert entspricht dem Gleichstromwert der in einer Periode an einem ohmschen Verbraucher dieselbe Energie umwandelt.

## 1.2.2 Der Drehstromkreis

Ein Mehrphasensystem ist ein Wechselstromsystem, das mehr als zwei Leiter hat. Hier werden Systeme mit drei Phasen betrachtet.:

- Im Stromkreis haben die Spannungen in den verschiedenen Strängen die gleiche Frequenz und gleiche Amplituden.
- Die Spannungen sind jeweils um  $120^\circ$  versetzt.
- Die Summe der drei symmetrischen Größen ist stets Null.

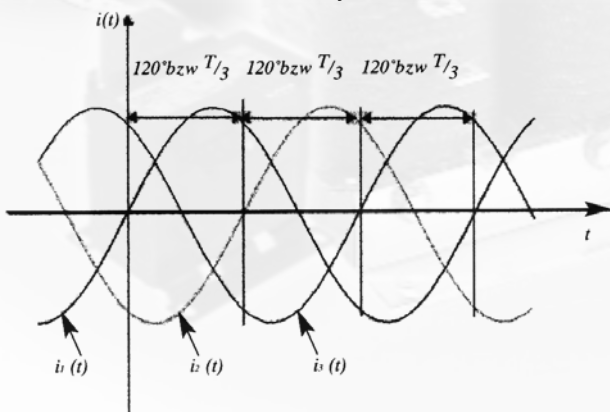


Bild 1.2.2 Drehstrom

### 1.2.3 Zeigerdiagramm

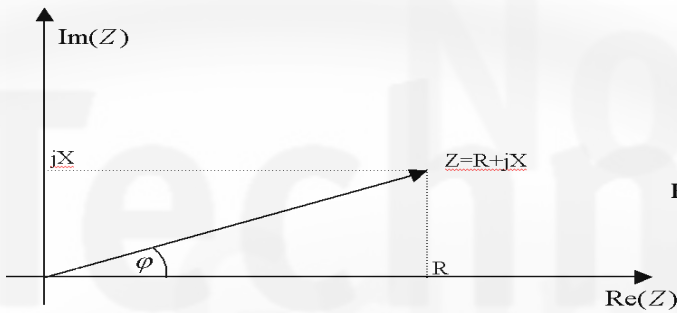


Bild 1.2.3: Das Zeigerdiagramm in der komplexen Zahlenebene.

Die rechnerische Behandlung ist im Zeitbereich, also in der Liniendarstellung, für den praktischen Gebrauch sehr unhandlich. Zur Vereinfachung geht man in den Bildbereich, in dem die sinusförmige Schwingung als komplexer Zeiger dargestellt wird.

- Dabei entspricht die Länge des Zeigers dem Scheitelwert der Wechselgröße
- Der Zeiger rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , oftmals wird aber die Zeit, wie hier im Bild "eingefroren", so dass ein zu einem bestimmten Zeitpunkt zugehöriges Diagramm entsteht.
- Die Phasenverschiebung  $\varphi$  wird durch die Lage des Zeigers beschrieben.
- Zeigerdarstellungen gelten für Wechselstromgrößen gleicher Frequenz.

### 1.2.4 Die Grundelemente R und L im Wechselstromkreis

#### 1.2.4.1 Widerstand

An einem ohmschen Verbraucher sind Strom und Spannung in Phase, d.h. es besteht, wie im Gleichstromkreis, zwischen Strom und Spannung ein lineares Verhältnis. Es gilt weiterhin das Ohmsche Gesetz.

$$u = i \cdot R$$

$u$  : Spannung  
 $i$  : Strang  
 $R$  : Widerstand



Bild 1.2.4: Zeigerdiagramm des Widerstandes.

Der Zeiger des Widerstandes ist rein reell und liegt auf der reellen Achse. Zwischen Strom und Spannung gibt es keine Phasenverschiebung.

#### 1.2.4.2 Induktivität

Im Wechselstromkreis ist der Verlauf des Stromes sinusförmig. Die Spannung, die zur zeitlichen Änderung, also der Ableitung des Stromes proportional ist, ergibt sich nun zu:

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{d(\hat{i} \cdot \sin(\omega t))}{dt} = L \cdot \omega \cdot \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$L$  : Induktivität  
 $\omega$  : Winkelgeschwindigkeit

Der Strom eilt der Spannung um eine viertel Periode nach. Eine Phasenverschiebung wird im Zeigerdiagramm durch eine Drehung des Zeigers dargestellt.

Der Zeiger der Induktivität ist rein imaginär und liegt auf der imaginären Achse. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist  $90^\circ$ .



Bild 1.2.5. :Zeiger der Induktivität.

### 1.3 Das magnetische Feld

#### 1.3.1 Beschreibung des magnetischen Feldes

Die Stärke und Richtung eines magnetischen Feldes kann mit Hilfe eines Probemagneten oder einem stromdurchflossenen Leiter bestimmt werden. Mathematisch kann das Magnetfeld durch ein Vektorfeld beschrieben werden. Die Ursache des magnetischen Feldes sind elektrische Ströme. Von ihnen hängen Betrag und Richtung der Wirklinien des Feldes ab.

Die magnetischen Feldlinien weisen folgende Eigenschaften auf:

- Die Tangente an die Feldlinien gibt die Krafrichtung an
- Die Feldlinien schneiden sich nicht
- Die Dichte der gezeichneten Feldlinien sind ein Maß für die Stärke der Kraftwirkung der magnetischen Feldstärke

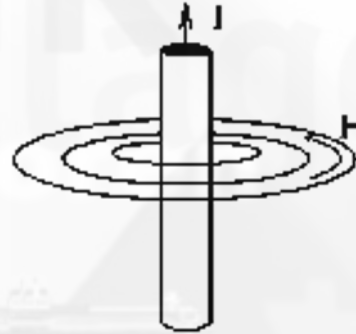


Bild 1.3.1: Feldlinienverlauf um einen Leiter.

#### 1.3.2 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz

Um einen stromdurchflossenen Leiter bilden sich wie in Bild konzentrische Kreise aus. Das Durchflutungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Stromstärke und der magnetischen Feldstärke.

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

$\vec{H}$  : magnetische Feldstärke

$d\vec{s}$  :Wegelement

$\vec{J}$  :Stromdichte

$d\vec{A}$  :Flächenelement

Auf einer geschlossenen magnetischen Feldlinie  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{s}$  ist die magnetische Spannung  $\Theta$ .

Das Integral  $\int_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$  ist die elektrische Durchflutung.

Wie in Bild 1.3.2 können sich mehrere Magnetfelder überlagern. Nach dem Durchflutungsgesetz gilt dann für die magnetische Spannung:

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

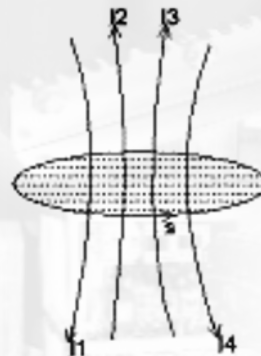


Bild 1.3.2: Stromdurchflossene Leiter und die magnetische Spannung

#### 1.3.3 Die magnetische Flussdichte

Die magnetische Flussdichte ist definiert als:

$$B = \frac{d\vec{\Phi}}{d\vec{A}}$$

$\vec{\Phi}$  : magnetischer Fluss

$d\vec{A}$  : Flächenelement

Daraus lässt sich der magnetische Fluss  $\Phi$  durch eine Fläche berechnen

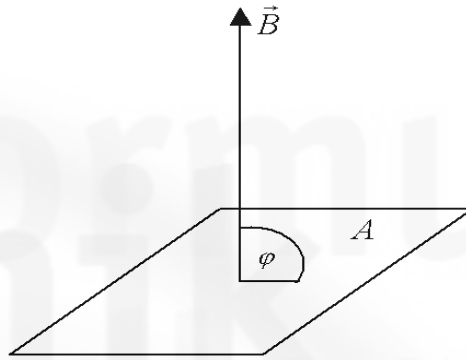


Bild1.3.3: Magnetischer Fluss durch eine Fläche

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot \cos(\varphi) \cdot dA$$

$\vec{B}$ : magnetische Flussdichte  
 $d\vec{A}$ : Flächenelement

Zwischen der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte gilt im Vakuum der Zusammenhang:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

### 1.3.4 Das Induktionsgesetz für ruhende Anordnungen

Es gilt, dass jede zeitliche Änderung des magnetischen Flusses  $\Phi$  eine elektrische Spannung induziert.

$$u_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$N$ : Windungen

- Die Spannung ist proportional zur Windungszahl  $N$  und zur zeitlichen Änderung des Flusses
- Die Spannung ist der Ursache entgegengesetzt (Lenz'sche Regel)
- Es ist gleichgültig ob die Änderung des Flusses durch eine Änderung des Magnetfelds (Transformatorprinzip) oder einer Änderung der Fläche (Generatorprinzip) hervorgerufen wird.

### 1.3.5 Magnetische Kopplung

Leiteranordnungen, die sich gegenseitig über ein Magnetfeld beeinflussen nennt man magnetisch gekoppelt. Durch die Kopplung kann ein Strom in einer Anordnung eine Spannung in einer anderen induzieren.

In Bild 1.3.4 soll Spule 2 offene Klemmen haben und in Spule 1 ein sich zeitlich ändernder Strom  $i_1$  fließen. Der Strom in Spule 1 erzeugt dem Fluss  $\Phi_{11}$  dessen Teilfluss  $\Phi_{21}$  auch Spule 2 durchsetzt.

Die Doppelindizierung ist wie folgt zu verstehen:

- 1.Index: Ort der Wirkung
- 2.Index: Ort der Entstehung

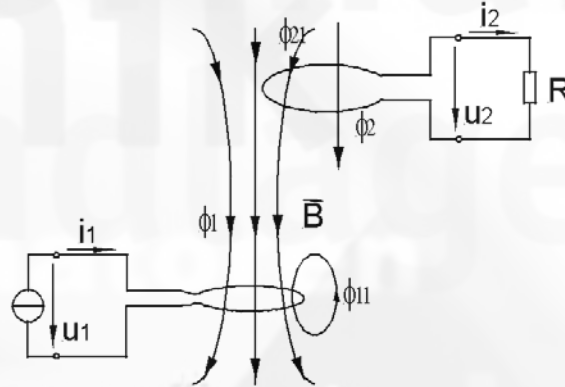


Bild 1.3.4: Magnetische Kopplung

Es muss hier mit den sogenannten Verkettungsflüssen  $\Psi_{11}$  und  $\Psi_{21}$  gerechnet werden, da nicht sämtliche Windungen von dem selben Fluss durchsetzt werden. Es entstehen folgende Spannungen:

$$\text{In Spule 1: } u_1 = u_{R1} + u_{L1} = i_1 \cdot R_1 + \frac{d\Psi_{m11}}{dt} \qquad \text{In Windung 2: } u_2 = \frac{d\Psi_{m21}}{dt}$$

Betrachtet man den umgekehrten Fall, also dass in Spule 2 der Strom  $i_2$  den Fluss  $\Phi_{22}$  induziert, und in Spule 1 bei offenen Klemmen der Teilfluss  $\Phi_{12}$  die Spannung  $u_1$  induziert, dann ergibt sich:

$$\text{für Windung 2: } u_2 = u_{R2} + u_{L2} = i_2 \cdot R_2 + \frac{d\Psi_{m22}}{dt} \qquad \text{für Windung 1: } u_1 = \frac{d\Psi_{m12}}{dt}$$

Fließen in beiden Spulen Ströme, dann ergibt sich ein magnetisches Feld, mit dem beide Spulen verkettet sind. Die Klemmenspannungen ergeben sich zu:

$$u_1 = i_1 \cdot R_1 + \frac{d\Psi_{m1}}{dt} \qquad u_2 = i_2 \cdot R_2 + \frac{d\Psi_{m2}}{dt}$$

Besteht der Feldraum aus einem Medium, in dem gilt  $B = f(H)$  ist linear, so gilt für den Verkettungsfluss jeder Spule:

$$\Psi_{m1} = \Psi_{m11} + \Psi_{m12} \qquad \Psi_{m2} = \Psi_{m22} + \Psi_{m21}$$

Man definiert nun die gegenseitige Induktivität:

$$L_{12} = \frac{\Psi_{m12}}{I_2}; \qquad L_{21} = \frac{\Psi_{m21}}{I_1} \qquad \Psi : \text{ Verkettungsfluss}$$

Die gegenseitige Induktivität zweier Leiteranordnungen ist ein Maß für die Verkettung.

## 2 Grundlagen des Transformators

### 2.1 Sinn und Zweck

Transformatoren ermöglichen die Umwandlung von der Spannungsebene  $u_1$  auf beliebige Spannungsebenen  $u_i$ . Mit Hilfe von Transformatoren können Spannungen so transformiert werden, dass Energie wirtschaftlich über längere Strecken transportiert werden kann. Des Weiteren können mit Transformatoren Netze voneinander getrennt werden, so dass durch die magnetische Kopplung Energie potentialfrei, d.h. ohne leitende Verbindung, übertragen werden kann.

### 2.2 Aufbau

Transformatoren bestehen aus einem gut magnetisierten Kern, den Primär und Sekundärwicklungen. Des Weiteren können diverse Konstruktionsteile wie z.B. Befestigungs- und Anschlussteile, Ölkessel und Überwachungseinrichtungen vorhanden sein.

#### 2.2.1 Transformatorkern von Einphasen- und Drehstromtransformatoren

##### 2.2.1.1 Eisenquerschnitt

Der magnetische Kreis des Wechselfeldes muss mit Rücksicht auf die Wirbelstromverluste aus Blechen geschichtet sein, dabei werden heute durchweg kornorientierte 0,23 mm bis 0,35 mm starke Bleche verwendet. Die gegenseitige Isolation erfolgte früher durch aufgeklebtes Papier oder Lackierung. Heute übernimmt diese Aufgabe eine sehr dünne Silikat-Phosphatschicht, die bereits während dem Auswalzen der Bleche aufgebracht wird.

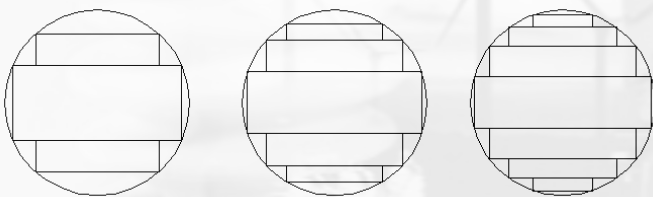


Bild 2.2.1:

Stufenweise Anpassung des Kernquerschnitts

$$A_{Fe} = D^2 \cdot \pi/4 \cdot k_a \cdot f_{Fe} \text{ an die Kreisform}$$

$k_a$  geometrischer Ausnutzungsfaktor,

$f_{Fe}$  Eisenfüllfaktor

Um den Innendurchmesser der Transformatorwicklungen möglichst gut auszunützen, nähert man durch eine 5- bis 15-fache Stufung der Blechbreiten den Eisenquerschnitt (Bild 2.2.1) an die Kreisform an. Mit Rücksicht auf die Geräuschbildung und zur Erzielung einer optimalen magnetischen Leitfähigkeit werden die Blechstreifen nicht stumpf, sondern verzapft zusammengesetzt. Bei kornorientierten Blechen muss dabei zur Beibehaltung der magnetischen Vorzugsrichtung ein Schrägschnitt (Bild 2.2) vorgesehen werden

### 2.2.1.2 Kernaufbau

Die gestuften Blechpakete werden durch Bandagen z.B. aus Glasfaser zu einem kompakten Querschnitt zusammengepresst. Ferner kann eine Verkeilung mit dem zylindrischen Wicklungsträger erfolgen. Bei großen Leistungen bringt man im Bereich des unteren und oberen Jochs zusätzlich eine kräftige Presskonstruktion an. Um Zusatzverluste zu reduzieren, ist man bestrebt, weitestgehend Pressungen mit Bolzen quer durch das Eisen zu vermeiden.

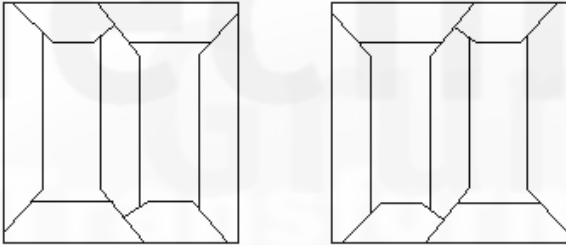


Bild 2.2.2: Schichtung eines Dreischenkelkerns mit kornorientierten Blechen

**Einphasenkerne.** Mit dem Kern- und dem Manteltyp (Bilder 2.2.3 und 2.2.4) bestehen zwei grundsätzliche Bauformen von Einphasentransformatoren. Allgemein bezeichnet man den von der Wicklung umschlossenen Teil des Eisenweges als Schenkel, Säule oder Kern und den äußeren Rückschluss als Joch.

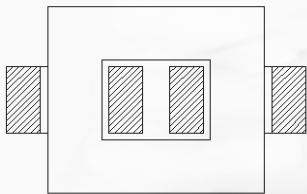


Bild 2.2.3: Aufbau eines Einphasen-Kerntransformators

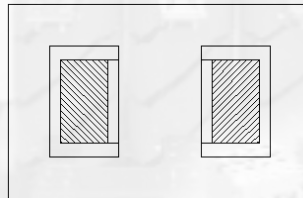


Bild 2.2.4: Aufbau eines Einphasen-Manteltransformators

Beim Einphasen-Kerntransformator ist auf jedem Schenkel die halbe Windungszahl untergebracht und der Eisenquerschnitt überall gleich. Der Einphasen-Manteltransformator trägt die gesamte Wicklung auf einem Mittelschenkel und spart durch die Aufteilung des Rückschlusses an Bauhöhe, da jede Jochhälfte nur den halben Fluss führt.

**Drehstromkerne.** Konzentriert man die Wicklungen von drei Einphasen-Kerntransformatoren, die an ein Drehstromsystem angeschlossen sind, jeweils auf einen der drei um  $120^\circ$  versetzten Schenkel, so wird in einer Leiterschleife, welche die drei zusammengestellten freien Schenkel umfasst, keine Spannung induziert. Die Kernflüsse sind wie die Strangspannungen jeweils  $120^\circ$  gegeneinander zeitlich verschoben und ergänzen sich in den Sternpunkten zu Null. Verbindet man die Joche miteinander, so können die freien Schenkel entfallen. Dies ergibt die als Tempeltyp bezeichnete Bauform eines symmetrischen Drehstromtransformators, die jedoch konstruktiv ungünstig ist.

Die Ausführung lässt sich vereinfachen, indem man alle drei Schenkel in eine Ebene legt (Bild 2.2.5). Es entsteht damit die Bauart des unsymmetrischen Drehstrom-Kerntransformators, in der heute die meisten Einheiten ausgeführt sind. Die Bezeichnung unsymmetrisch bezieht sich auf den Bedarf an Magnetisierungsdurchflutung für die drei Stränge, der für den mittleren auf Grund des kürzeren Eisenwegs geringer ist.

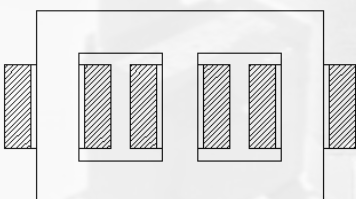


Bild 2.2.5: Aufbau eines Drehstrom-Kerntransformators (Dreischenkelkern)

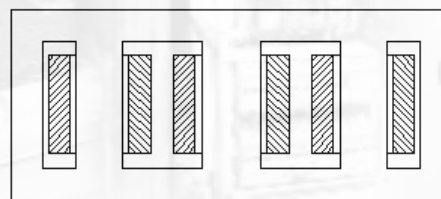


Bild 2.2.6: Drehstromtransformator mit Fünfschenkelkern

Besonders für sehr große Leistungen wird auch der Fünfschenkelkern (Bild 2.2.6) ausgeführt, der zwei zusätzliche äußere Rückschlüsse besitzt. Dadurch kann der Jochquerschnitt auf etwa 60% des Wertes der Schenkel gesenkt werden, womit man an Bauhöhe spart.

Der Transformator Kern besteht aus ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Kobalt, Nickel).

- Bei technischen Frequenzen  $< 1\text{kHz}$   
Zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten, bevorzugt aus dünnen isolierten geschichteten Elektro- oder Spezialblechen.
- Bei höheren Frequenzen  $> 1\text{kHz}$   
In gleicher Absicht aus besonders dünnen gewickelten Ring- bzw. Schnittbandkernen
- Bei hohen Frequenzen  $> 20\text{kHz}$   
Aus sogenannten Ferriten (Oxidkeramik), die das Magnetfeld bei begrenzter Aussteuerbarkeit ebenfalls gut leiten und einen sehr hohen Volumenwiderstand aufweisen.

Der Kern von Kleintransformatoren ist meist aus Blechen genormter Größe (DIN 41302 ff) und geeigneter Blechqualität hergestellt. Dabei werden heutzutage bevorzugt EI-, UI-, oder 3UI- Blechformen entsprechend Bild 2.2.7 verwendet.



Bild 2.2.7: Transformatorkerne

## 2.2.2 Wicklung

Nach der grundsätzlichen Ausführung lassen sich bei Transformatoren Zylinderwicklungen und Scheibenwicklungen unterscheiden. Innerhalb dieser zwei Typen bestehen je nach den Anforderungen durch die Höhe der Spannung, der Leistung und der besonderen Betriebsbedingungen sehr vielfältige Konstruktionen.

### 2.2.2.1 Zylinderwicklung

Meist wird die Zylinderwicklung (Bild 2.2.8) bevorzugt, wobei aus isolationstechnischen Gründen die Unterspannungswicklung dem Eisenkern zugewandt ist. Für niedrige Betriebsspannungen werden ein- oder mehrlagige Röhren aus Profilleitern hergestellt, die bei größeren Stromstärken in parallele Teilleiter aufgeteilt sind. Bei großen Leistungen muss man die Teilleiter zur Vermeidung von Zusatzkupferverlusten durch Stromverdrängung außerdem verdrehen.

Für höhere Spannungen wird die Zylinderwicklung in einzelne übereinanderliegende Spulen aufgeteilt. Diese können bei Querschnitten unter ca.  $5\text{ mm}^2$  aus Runddraht bestehen und sind durch Hartpapierscheiben voneinander getrennt.



Bild 2.2.9: Scheibenwicklung

UW      Unterspannungswicklung  
OW      Oberspannungswicklung

### 2.2.2.2 Scheibenwicklung

Bei der Scheibenwicklung (Bild 2.2.9) werden Ober- und Unterspannungswicklung unterteilt und abwechselnd übereinandergeschichtet. Zur Erzielung einer besseren Verkettung der Wicklungen und mit Rücksicht auf die Isolation beginnt und endet der Aufbau mit je einer Halbspule der Unterspannungsseite.

### 2.2.3 Isolierung

Die zulässige Erwärmung und damit die Lebensdauer elektrischer Maschinen ist durch die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe begrenzt. Es werden nach VDE 0532 mehrere Isolierstoffklassen unterschieden, denen jeweils eine höchst zulässige Dauertemperatur zugeordnet ist.

Zur Überprüfung der Erwärmung der Wicklungstemperatur wird meistens das Widerstandsmessverfahren angewendet.

Zur Leiterisolation wird meist eine Papierumbandlung gewählt. Zwischenisolationen, Abstützungen und die Distanzierung erfolgen durch Pressspan, Hartpapier und Holz. Die Beherrschung der teilweise hohen Betriebsspannungen auf möglichst engem Raum stellt hohe konstruktive Anforderungen an die Gestaltung der Transformatorisolation. Als Folge von Gewittern oder Schalthandlungen im Netz können überdies stoßartige Überspannungen auftreten, die zusätzlich ausgehalten werden müssen und besondere isolationstechnische Maßnahmen erfordern.

### 2.3 Wachstumsgesetze und Kühlung

Die Scheinleistung des Transformators bei spezifischer Belastung des Leitermaterials und dem Material des Magnetwerkstoffes kann mit Hilfe folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$S = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot J \cdot A_{Fe} \cdot A_{Cu}$$

$A_{Fe}$  : Querschnitt des Eisenkerns

$A_{Cu}$  : Querschnitt der Kupferwicklungen

Würde man bei einem Bezugstransformator alle geometrischen Abmessungen um den linearen Faktor  $\cdot k$  vergrößern, dann bei konstanter spezifischer Beanspruchung  $B$  und  $J$  die Kupfer- und Eisenquerschnitte jeweils quadratisch ansteigen. Für die Scheinleistung gegenüber einem Bezugstransformator gilt dann:

$$S^* = S \cdot k^4$$

Die Masse und damit auch die Verluste erhöhen sich mit dem Volumen.

$$m^* = m \cdot k^3$$

$$P_v^* = P_v \cdot k^3$$

Die wärmeableitende Oberfläche dagegen nimmt nur quadratisch zu:  $O^* = O \cdot k^2$

Daraus folgt:

- Eine geringere relative Masse pro Leistung
- Weniger relative Verluste pro Leistung
- Kleinere relative Kühlfläche pro Verluste

Man erhält also eine größere spezifische Leistung und einen besseren spezifischen Wirkungsgrad, muss aber trotzdem mehr kühlen.

Eine wirksame Kühlung geschieht bei Kleintransformatoren bevorzugt mit Luft, bei Großtransformatoren meist mit Flüssigkeiten (Öl). Die Kühlung schützt den Transformator vor einer thermischen Zerstörung.

## 2.4 Wirkungsweise des idealen Transformators

Das Prinzip des Transformators beruht auf dem Induktionsgesetz.

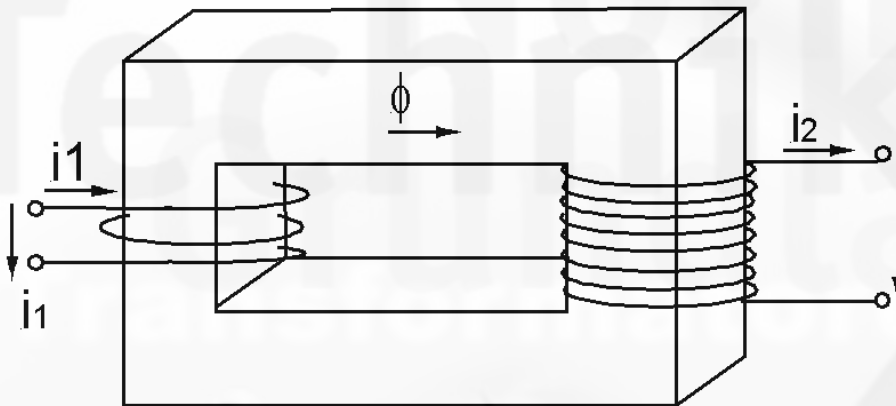


Bild 2.4.1: Prinzip eines Transformators

Für den idealen Transformator gelten folgende Vereinfachungen:

- Der Kern leitet das Magnetfeld perfekt ohne Verluste
- Die Wicklungen bestehen aus perfekt leitendem Material
- Die magnetische Kopplung zwischen den Wicklungen ist vollkommen (d.h. es gibt keine Streufelder)
- Der Kern hat keine resultierende Durchflutung

Es gilt allgemein:

$$u_1 = \frac{d\Psi_{m1}}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad u_2 = \frac{d\Psi_{m2}}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \frac{u_1}{N_1}$$

daraus folgt für das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$ :

$$\ddot{u} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \begin{array}{l} N_1: \text{Windungen der Primärspule} \\ N_2: \text{Windungen der Sekundärspule} \end{array}$$

Weiterhin gilt, da ein idealer Kern keine resultierende Durchflutung hat:

$$\Theta_1 + \Theta_2 = N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}$$

Bei sinusförmigen Spannungen  $u = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$  ergibt sich für den magnetischen Fluss  $\Phi$ :

$$\Phi(t) = \frac{1}{N} \cdot \int u_1 \cdot dt = \dots = -\hat{\phi} \cdot \cos(\omega \cdot t) = -A_{Fe} \cdot \hat{B}_{Fe} \cdot \cos(\omega \cdot t) = -A_{Fe} \cdot B(t)$$

Für den Effektivwert der Klemmenspannung ergibt sich damit:

$$U_{1,2} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B}_{Fe} \cdot A_{Fe} \cdot N_{1,2}$$

Diese Gleichung trägt auch den Namen Transformatorhauptgleichung und ist für die Dimensionierung von Transformatoren wichtig.

## 2.5 Betriebsverhalten des realen Transformators

Im Gegensatz zum idealen Transformator muss jetzt berücksichtigt werden, dass der reale Transformator:

- Wicklungsverluste in den Windungen aufweist
- Eisenverluste im Kern aufweist
- aufgrund der endlichen Permeabilität, Hysterese und Wirbelstromverluste aufweist
- keine perfekte magnetische Kopplung hat

### 2.5.1 Leerlaufversuch

Betrieibt man den realen Transformator im Leerlauf, so wird man feststellen, dass ein bestimmter Leerlaufstrom  $I_{10}$  fließt.

Mit dem Leerlaufstrom  $I_{10}$  und dem Bemessungsstrom  $I_{1N}$  wird der relative Leerlaufstrom  $i_{10}$  definiert:

$$i_{10} = \frac{I_{10}}{I_{1N}}$$

Der Leerlaufstrom setzt sich aus dem Eisenverluststrom  $I_{Fe}$  und dem Magnetisierungsstrom  $I_{\mu}$  zusammen. Dabei gilt, dass  $I_{Fe}$  senkrecht auf  $I_{\mu}$  steht.

#### 2.5.1.1 Einschaltstromstoß

Wird ein sekundär unbelasteter Transformator mit seiner Primärwicklung an das Netz angeschlossen, so stellt sich der stationäre Leerlaufstrom erst nach Abklingen eines Ausgleichvorgangs ab. Im ungünstigen Fall beginnt der Verlauf des Flusses  $\Phi$  bei  $\Phi_{rem}$  (Remanenzinduktion).

Fluss und Spannung sind über  $u = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$  verknüpft, daher steigt der Flussverlauf von  $\Phi_{rem}$  aus mit dem erforderlichen Differentialquotienten an und es ergibt sich die Spannung an der Primärseite. Dabei können sehr hohe Stromspitzen erreicht werden.

### 2.5.2 Kurzschlussversuch

Beim Kurzschlussversuch wird bei dem sekundärseitig kurzgeschlossenen Transformator die Spannung an der Primärseite so lange reduziert, bis die jeweiligen Bemessungsströme fließen.

Man kann hier die auf die Bemessungsspannung  $U_{1N}$  bezogene Kurzschlussspannung  $U_{1K}$  als relative

Kurzschlussspannung angeben als:  $u_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}}$

### 2.5.3 Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild gibt die Eigenschaften des realen Transformators wieder.

Es resultiert aus den gewonnenen Werten des Leerlaufversuchs und des Kurzschlussversuchs. Die mit Strich gekennzeichneten Größen sind die von der sekundären Seite auf die primäre Seite umgerechneten Größen.

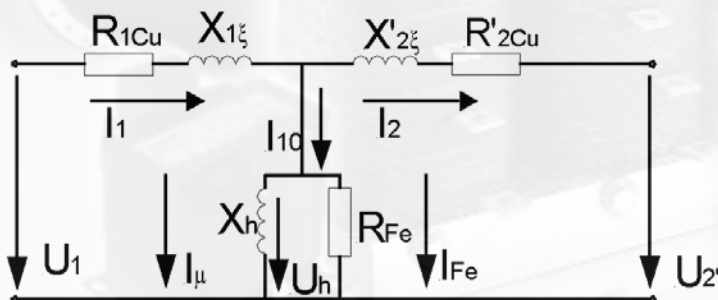


Bild 2.5.1: Ersatzschaltbild eines Transformators

Mit Hilfe des Ersatzschaltbildes kann das Zeigerdiagramm aufgestellt werden.

## 2.5.4 Kapp'sches Dreieck

Ein Transformator wird mit Nennleistung  $S_N$  betrieben, wenn bei Bemessungsspannung  $U_{1N}$  der Bemessungsstrom  $I_{1N}$  fließt. In diesem Fall kann man den Leerlaufstrom vernachlässigen.

Die Sekundärspannung weicht abhängig vom  $\cos(\varphi)$  der Nennspannung ab. Zu ihrer Bestimmung wird das Kapp'sche Dreieck verwendet.

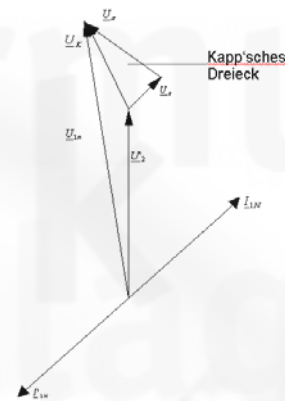


Bild: 2.5.2: Zeigerdiagramm für den Betrieb des Transformators mit Nennleistung

## 2.6 Einfluss von Belastungsänderungen

### 2.6.1 Ausgangsspannung und Ausgangsstrom bei Belastung

Nach VDE 0570 darf die Ausgangsspannung, bei Anschluss der Bemessungseingangsgrößen (Eingangsspannung, Frequenz) und Belastung mit einer Impedanz, die bei Bemessungsausgangsspannung und Bemessungsleistungsfaktor die Bemessungsleistung ergibt, nur in bestimmten Grenzen abweichen. Die Prüfung erfolgt durch Messung der Ausgangsspannung im Beharrungszustand. Ist ein Transformator mit Bemessungsausgangsspannung, Bemessungsausgangsstrom, Bemessungsleistungsfaktor gekennzeichnet, so müssen diese Werte vom Grundsatz her übereinstimmen.

### 2.6.2 Erwärmung

Nach VDE 0570 dürfen Transformatoren und ihre Unterlagen bei bestimmungsmäßigem Gebrauch keine unzulässigen Temperaturen annehmen.

Die Art der Prüfung richtet sich nach den Angaben des Herstellers über den Wert für  $t_a$  und die verwendeten klassifizierten Werkstoffe (Isolierstoffklassen).

- Die Prüfung findet in einer vorgeschriebenen Umgebung statt.
- Der Transformator wird an Nenn-Versorgungsspannung angeschlossen und mit einer Impedanz belastet, so dass sich die Nennausgangswerte ergeben. Sodann wird die Nenneingangsspannung auf den 1,06-1,1-fachen Wert unter Beibehaltung aller Einstellungen erhöht.
- Die Temperaturerhöhung der Wicklungen wird nach dem Widerstandsverfahren ermittelt, für andere Temperaturerhöhungen (Eisenkern, Oberfläche Isolierung) werden Thermolemente verwendet.
- Während der Prüfung dürfen bestimmte Temperaturen nicht überschritten werden.

### 2.6.3 Isolationswiderstand und Spannungsfestigkeit

Nach VDE 0570 müssen der Isolationswiderstand und die Spannungsfestigkeit ausreichend sein.

- Der Isolationswiderstand wird mit Gleichspannung gemessen.
- Die Spannungsfestigkeit wird mit einer im wesentlichen sinusförmigen Spannung geprüft. Am Anfang wird der halbe Wert der Prüfspannung angelegt und dann schnell auf den vollen Wert gesteigert. Während der Prüfung darf weder ein Überschlag noch ein Durchschlag auftreten.

## 3 Drehstromtransformatoren

### 3.1 Schaltgruppen

In der folgenden Übersicht (Tabelle 3.1.1) sind die wichtigsten Schaltgruppen für Drehstromtransformatoren mit Zeigerbild, Übersetzung, Kennzahl und Schaltung angegeben. Dabei bezeichnet man die Wicklungen mit der betriebsmäßig höchsten Spannung als Oberspannungswicklungen und kennzeichnet sie durch die vorgestellte Ziffer 1 vor den Anschlussbezeichnungen U, V, W.

Sinngemäß erhalten die Unterspannungswicklungen die Ziffer 2 und weitere Spannungsebenen mit abnehmender Spannung fortlaufend höhere Ziffern. Die Wicklungen selbst können in

Dreieck: D, d  
Stern: Y, y  
Zickzack: Z, z

verschaltet sein, wobei Großbuchstaben für die Oberspannungswicklung und Kleinbuchstaben für die Unterspannungswicklung stehen und in dieser Reihenfolge als Schaltgruppe des Drehstromtransformators bezeichnet werden. Ist in der jeweiligen Spannungsebene der Sternpunkt herausgeführt, so wird dies durch ein nachgestelltes **N, n** verdeutlicht.

Darüber hinaus wird durch die anschließende Kennzahl die Nacheilung der Unterspannung gegenüber der namensgleichen Oberspannung als Vielfaches von  $30^\circ$  angegeben.

Beispiel: Yzn5  
Oberspannungswicklungen in Stern  
Unterspannungswicklungen in Zickzack  
Sternpunkt der Unterspannungswicklungen herausgeführt  
Nacheilung der Unterspannung gegenüber der gleichnamigen Oberspannung  $5 \times 30^\circ = 150^\circ$

Die Bezeichnung Ober- bzw. Unterspannungswicklung darf jedoch nicht mit den Begriffen

Primärwicklung  $\triangle$  Energieaufnahme  
Sekundärwicklung  $\triangle$  Energieabgabe

verwechselt werden, die sich allein an der Energierichtung orientieren. Insbesondere muss die Oberspannungswicklung nicht zwangsläufig die Primärwicklung sein.

Kennzahl Code Nr. Indice	Schaltgruppe Connection group Couplage de branch.	Zeigerbild Vektorgroup symbol Schéma de vecteurs		Schaltbild Connection diagram Schéma de couplage		Sekundärer Sternpunkt Secondary neutral point point neutre secondaire
		OS above HT	US below BT	OS above HT	US below BT	
0	D d 0					nicht vorhanden not available non existant
	Y y 0					ca. 10 % belastbar approx. 10 % loadable charge admise 10 % env.
	D z 0					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
5	D y 5					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
	Y d 5					nicht vorhanden not available non existant
	Y z 5					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
6	D d 6					nicht vorhanden not available non existant
	Y y 6					ca. 10 % belastbar approx. 10 % loadable charge admise 10 % env.
	D z 6					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
11	D y 11					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
	Y d 11					nicht vorhanden not available non existant
	Y z 11					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %

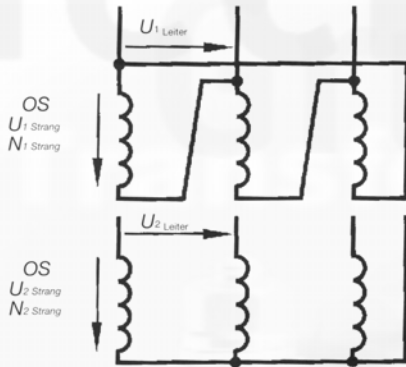
Tabelle 3.1.1: Schaltungen und Schaltgruppen

### 3.1.1 Übersetzungsverhältnis und Schaltgruppen

Die Stränge der Oberspannungsseite (OS) und der Unterspannungsseite (US) können jeweils in Stern (Y) oder in Dreieck (D) oder Zickzack (Z) geschaltet werden. Der Großbuchstabe bezeichnet die OS, der Kleinbuchstabe die US, ein herausgeführter N-Leiter wird durch den Buchstaben n bezeichnet, z.B. Dyn.

Als Übersetzungsverhältnis wird bei Drehstromtransformatoren das ungekürzte Verhältnis der Außenleiterspannung angegeben, z.B.  $\ddot{u} = 20\,000\text{V} / 400\text{V}$ .

Beispiel: Dyn-Schaltung (Bild 3.1.1)



Als Übersetzungsverhältnis ist festgelegt:

$$\ddot{u} = U_{1 \text{ Leiter}} / U_{2 \text{ Leiter}}$$

Für die Strangspannung gilt:

$$U_{1 \text{ Strang}} / U_{2 \text{ Strang}} = N_{1 \text{ Strang}} / N_{2 \text{ Strang}}$$

## 3.2 Last

### 3.2.1 Symmetrische Last, Schiefast

Große Übertragungs- und Verteilungstransformatoren werden üblicherweise symmetrisch belastet. Für diesen Belastungsfall kann der Transformator in jeder beliebigen Schaltgruppe betrieben werden.

Kleine Verteilungstransformatoren zur Versorgung von Haushalten hingegen werden oft unsymmetrisch, in Ausnahmefällen auch einphasig belastet. Da die US wegen des erforderlichen N-Leiters hier stets eine Y-Schaltung sein muss, kommen nur die Schaltgruppen Yyn und Dyn in Frage.

Gemäß Bild 3.2.4 wird bei einphasiger Belastung einer Yyn-Schaltung ausgangsseitig nur ein Schenkel belastet. Eingangsseitig muss der Strom des belasteten Stranges über die beiden anderen Wicklungen zurückfließen. In den beiden zugehörigen Schenkeln steigt der magnetische Fluss dadurch bis weit in die Sättigung, weil die zugehörige Gegendurchflutung der Ausgangsseite fehlt. Die Ausgangsspannung der unbelasteten Stränge steigt dadurch an. Der N-Leiter einer Yyn-Schaltung darf deshalb nur bis etwa 10% des Leiter-Nennstromes belastet werden.

Bei der Dyn-Schaltung gibt es dieses Problem nicht; sie ist auch einphasig bis zum Nennstrom belastbar.

### 3.2.2 Unsymmetrische Belastung

#### 3.2.2.1 Durchflutungsgleichgewicht.

Bei gleichmäßiger Belastung aller drei Stränge verhält sich jeder Drehstromtransformator, von den erwähnten Besonderheiten der Magnetisierung abgesehen, wie die einphasige Bauart. Das Betriebsverhalten lässt sich über das bekannte Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm, das jetzt für einen Strang gilt, berechnen. Die Erzeugung des Nutzflusses wird durch die Belastung nicht gestört, da sich für jeden Strang nach Bild 2.2.1 mit  $I_1 + I'_2 = I_0 \approx I_u$  stets ein Amperewindungsausgleich einstellt. Mit  $I_0 \rightarrow 0$  bedeutet dies, dass jede Durchflutung eines sekundären Laststromes  $I'_2$  durch einen entsprechenden Primärstrom  $I_1$  kompensiert wird.

Anders liegen die Verhältnisse bei unsymmetrischer Strombelastung der drei Stränge, wie sie bei Verteilertansformatoren durch ungleiche Lastverteilung auftreten kann. Da dem Verbraucher mit der Strang- und der Außenleiterspannung die zwei Spannungswerte 230V und 400V zur Verfügung gestellt werden, kommt für die Schaltung der Sekundärwicklung nur eine Stern- oder Zickzackschaltung in Frage. Nachstehend soll nun untersucht werden, inwieweit für verschiedene unsymmetrische Lastfälle in den möglichen Schaltgruppen eine ungestörte Kompensation der Laststrom-Durchflutung möglich ist.

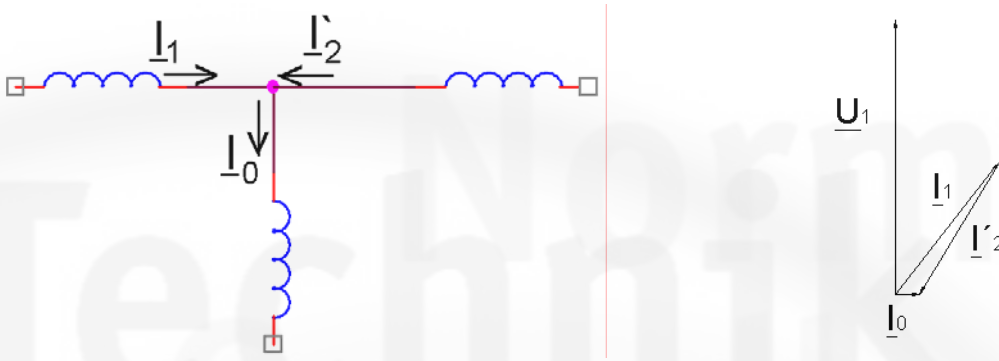


Bild 3.2.1: Lastkompensation beim Transformator

### 3.2.2.2 Zweisträngige Belastung in Stern-Sternschaltung.

Wird der Transformator in der Schaltgruppe Yyn nach Bild 3.2.3 nur zwischen zwei Außenleitern belastet, so ist das Durchflutungsgleichgewicht nicht gestört. Der Sekundärstrom  $I_2$  in zwei Strängen wurde durch den entsprechenden Strom  $I_1$  kompensiert, die dritte Wicklung bleibt stromlos.

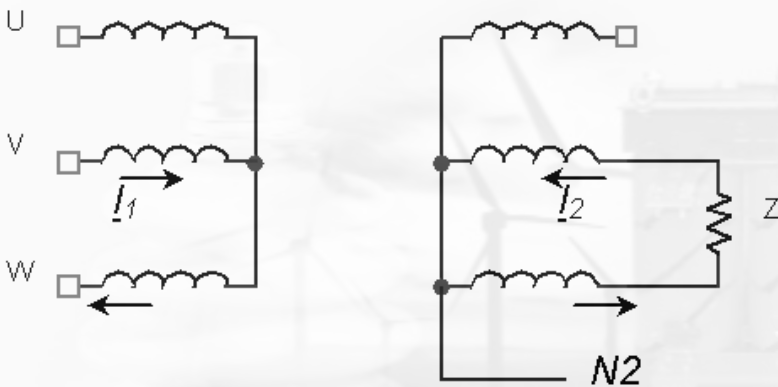
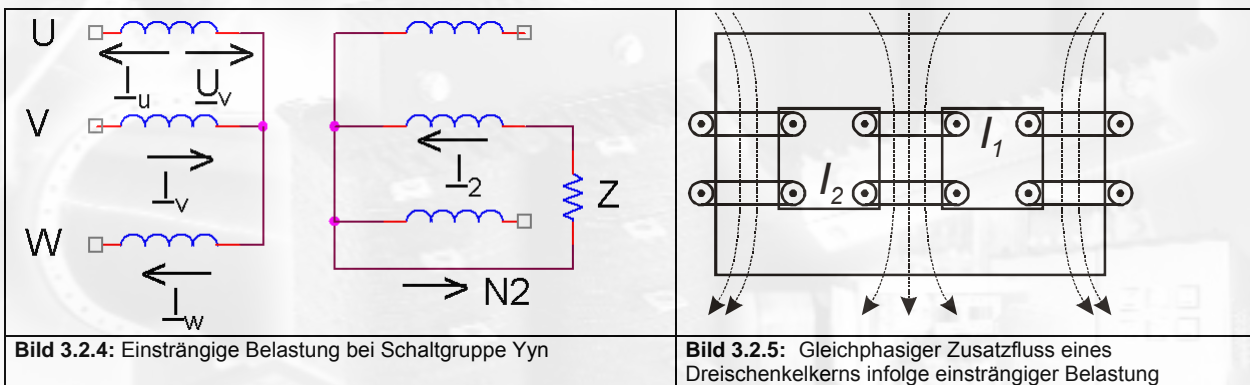


Bild 3.2.3: Zweisträngige Belastung bei Schaltgruppe Yyn

### 3.2.2.3 Einsträngige Belastung in Stern-Sternschaltung.

Der zweite extrem unsymmetrische Lastfall (Bild 3.2.4) tritt bei einer einsträngigen Last zwischen Außenleiter und Sternpunkt auf. Da der primäre Sternpunktleiter fehlt, ist eine gleichartige Stromaufnahme auf der Eingangsseite nicht möglich, so dass sich die angegebene Verteilung einstellt. Für die Durchflutung des Transformators in der üblichen Dreischenkelbauform ergibt sich damit ein Schema nach Bild 3.2.5.



Zur Berechnung der drei primären Strangströme wird zunächst die Knotenpunktgleichung aus Bild 3.2.4 gebildet. Zwei weitere Gleichungen erhält man aus der Bedingung, dass die Summe der Laststrom-Durchflutungen längs der zwei Transformatorfenster in Bild 3.2.5 Null sein müssen. Dies ist erforderlich, da das primärseitig an den Transformator angelegte symmetrische Spannungssystem nur gleichphasige Zusatzflüsse pro Kern zulässt.

Für die Berechnung der Strangströme  $I_U$ ,  $I_V$  und  $I_W$  gelten damit die Bedingungen:

Knotenpunktregel	$I_U$	$-I_V$	$+I_W$	$= 0$
Umlauf linkes Fenster	$I_U$	$+I_V$	$-I'_2$	$= 0$
Umlauf rechtes Fenster		$I_V$	$+I_W$	$-I'_2 = 0$

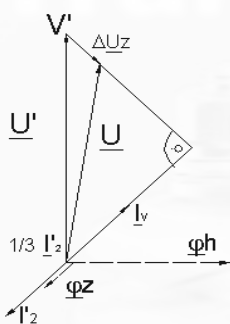
Die Auswertung der drei Gleichungen ergibt die Strangströme

$$I_U = I_W = \frac{1}{3} I'_2 \quad \text{und} \quad I_V = \frac{2}{3} I'_2$$

Damit entstehen folgende resultierende Laststrom-Durchflutungen pro Schenkel

äußere Schenkel:	$\Theta_{zU, W}$	$= N_1 \cdot I_{U, W}$	$= \frac{1}{3} N_1 \cdot I'_2$
mittlerer Schenkel:	$\Theta_{zV}$	$= N_1 (I'_2 - I_V)$	$= \frac{1}{3} N_1 \cdot I'_2$

Diese lastabhängigen Zusatzdurchflutungen erzeugen in allen drei Strängen gleichgerichtete Flüsse  $\varphi_z$  (Bild 3.2.5), die sich über die Luft oder die Kesselwandlung schließen müssen. Sie induzieren in den Strangwicklungen gleichgerichtete Zusatzspannungen  $\Delta U_z$ , wie dies in Bild 3.2.6 für den Strang V dargestellt ist.

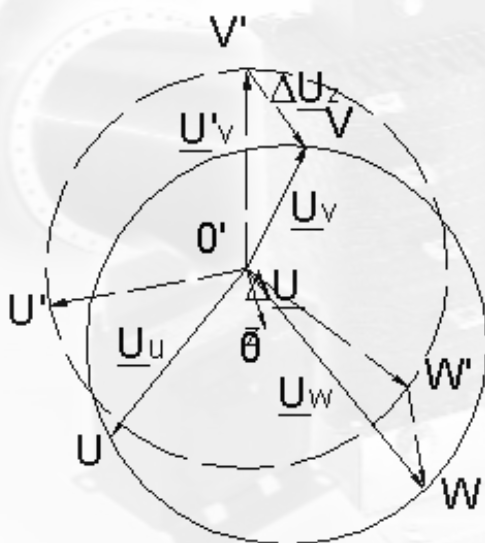


Durch den eigentlichen Magnetisierungsstrom, der wegen  $I_U \ll I'_2$  nicht eingetragen ist, entsteht der normale Kernfluss  $\varphi_h$  und die Strangspannung  $\underline{U}'$ . Der mit  $I'_2$  ohmsch-induktiv angenommene Laststrom wird durch  $I_V$  nur zu zwei Dritteln kompensiert und ergibt zusätzlich die Magnetisierungs-Durchflutung  $\Theta_z$ . Der Fluss  $\varphi_z \sim \Theta_z$  induziert in der Wicklung die Spannung  $\Delta U_z$ . Die resultierende Strangspannung ist damit  $\underline{U} = \underline{U}' + \Delta \underline{U}_z$ .

**Bild 3.2.6:** Zeigerdiagramm des belasteten Wicklungsstrangs bei einsträngiger Belastung in Schaltgruppe Yyn

### 3.2.2.4 Sternpunktsverlagerung.

Addiert man zu allen drei Strangspannungen den Zusatzbetrag  $\Delta U_z$  (Bild 3.2.7), so entstehen die Strangspannungen zwischen  $O'U$ ,  $O'V$ ,  $O'W$ . Da die Außenleiterwerte und so das Dreieck  $UVW$  durch das Netz fest vorgegeben sind, bedeutet dies eine Sternpunktverschiebung von  $O$  nach  $O'$ . Die einphasig belastete Wicklung bricht in ihrer Strangspannung teilweise zusammen. Inwieweit das geschieht, hängt nach  $\varphi_z = \Theta_z \cdot \Lambda_z$  bei gegebener Belastung und damit  $\Theta_z$  von dem magnetischen Leitwert  $\Lambda_z$  ab, den der Zusatzfluss vorfindet. In der Bauform des Dreischenkelkerns ist der Zusatzfluss auf den Weg von Joch zu Joch, d.h. auf den Streuweg beschränkt. Bei drei zusammengeschalteten Einphasentransformatoren oder dem Fünfschenkelkern kann er sich dagegen recht kräftig auf dem Eisenwege über den freien Rückschluss ausbilden. Hier ist bei Sternpunktbelastung eine starke Nullpunktverschiebung zu erwarten.



**Bild 3.2.7:** Sternpunktverschiebung bei einsträngiger Belastung

### 3.2.2.5 Sternschaltung mit Ausgleichswicklung.

Führt man den Transformator bei primärer und sekundärer Sternschaltung mit einer zusätzlichen Dreieckswicklung (Bild 3.2.8) aus, so ist eine Kompensation der Lastdurchflutung auch bei einsträngigem Sekundärstrom möglich.

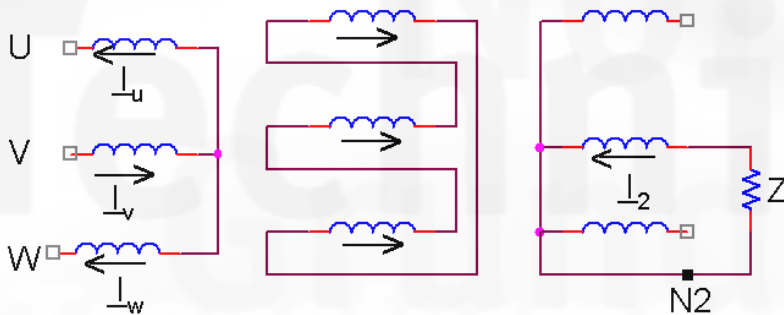


Bild 3.2.8: Einsträngige Belastung in Schaltgruppe Yyn mit Ausgleichswicklung

Die Ausgleichswicklung führt den zuvor nicht kompensierten Anteil  $I'_3 = I'_2 / 3$  als Kreisstrom. Für den belasteten Strang z.B. gilt die Durchflutungsgleichung der Lastströme

$$\Theta_V = N_1 (I'_2 - I'_3 - I_V) = N_1 (I'_2 - \frac{1}{3} I'_2 - \frac{2}{3} I'_2) = 0$$

Die Belastung des sekundären Sternpunktleiters führt damit bei Stern-Sternschaltung mit Ausgleichswicklung nicht zu einer Sternpunktverschiebung.

### 3.2.2.6 Dreieck-Sternschaltung.

Nach Bild 3.2.9 erkennt man, dass die Sternpunktbelastung keine Störung des magnetischen Gleichgewichtes hervorruft, da auch auf der Primärseite nur der belastete Strang Strom führt.

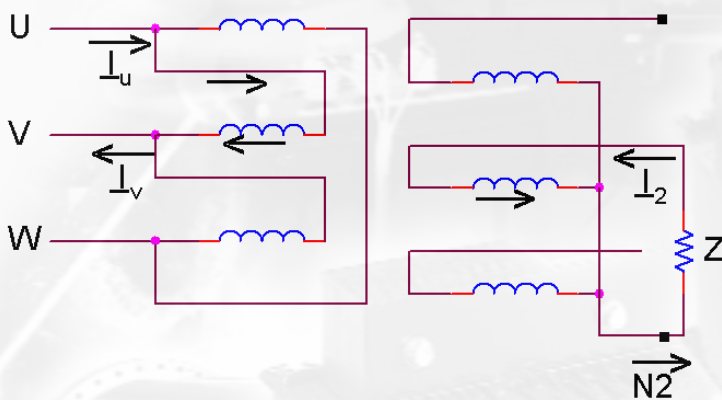


Bild 3.2.9: Einsträngige Belastung in Schaltgruppe Dyn

### 3.2.2.7 Stern-Zickzackschaltung.

Hier wird nach Bild 3.2.10 die Sekundärwicklung jeweils hälftig auf zwei Kerne verteilt, so dass ein einsträngiger Laststrom  $I_2$  entsprechend magnetisiert. Fließt  $I_2$  z.B. in den Strangwicklungen  $V$  und  $W$ , so kann dieser jetzt primärseitig durch  $I_V$  und  $I_W$  voll kompensiert werden.

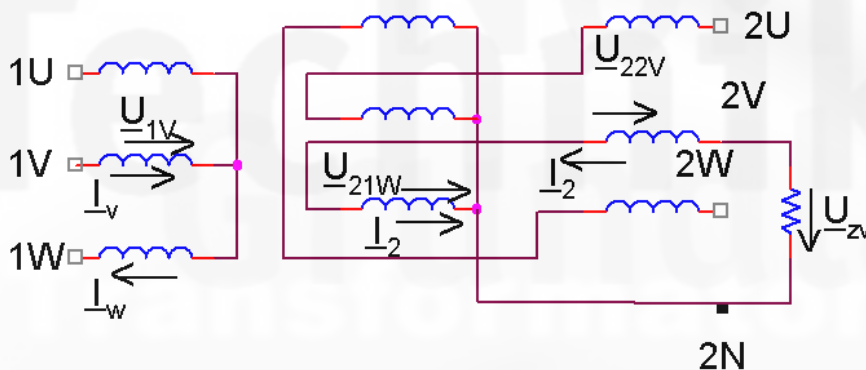


Bild 3.2.10: Einsträngige Belastung in Schaltung Yzn

Die Konstruktion der Spannungsdiagramme mit den in Bild 3.2.10 definierten Zählpfeilen für die drei Zeiger eines Strangs ergibt Bild 3.2.10.

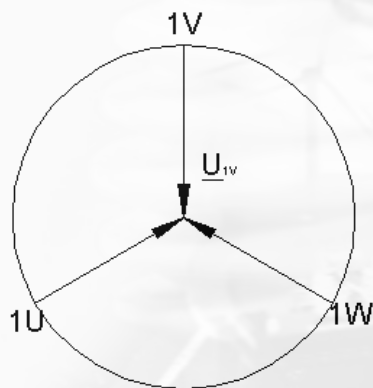


Bild 3.2.11: Spannungsdiagramme bei Schaltgruppe Yzn5

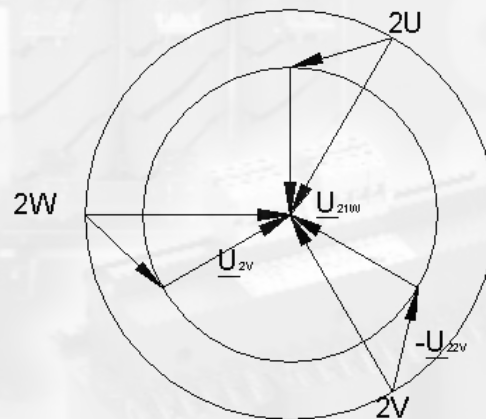


Bild 3.2.12: Einsträngige Belastung in Schaltgruppe Yzn

Durch die Phasenverschiebung der zwei Teilzeiger  $U_{21}$  und  $U_{22}$  entsteht eine Minderung der Wicklungsausnutzung im Bezug auf die Höhe der Sekundärspannung.

Ist  $N_2$  die gesamte sekundäre Windungszahl pro Kern, so gilt für die Beziehung

$$U_2 = U_1 \cdot \sqrt{3}/2 \cdot N_2 / N_1$$

### 3.2.3 Auswahl der Schaltgruppen.

Die Zulässigkeit einer einsträngigen Belastung von Drehstromtransformatoren verschiedener Schaltgruppen ist in VDE0532, Teil 10 entsprechend den obigen Ergebnissen geregelt. Danach dürfen Transformatoren in Stern-Sternschaltung ohne Ausgleichwicklung in den Bauarten als Mantel- und als Fünfschenkelkern sowie als Transformatorenbank nicht und Dreischenkeltransformatoren nur bis 10% des Bemessungsstromes einphasig belastet werden. Bei allen übrigen Schaltungen ist eine Sternpunktsbelastung bis zum vollen Strom zulässig.

## 4 Anwendungen des Transformators

### 4.1 Gleichspannungstransformatoren

### 4.2 Vollgesteuerte, halbgesteuerte oder ungesteuerte Stromrichterschaltungen

Dabei unterscheidet man unregelte und geregelte Gleichspannungsversorgungen.

### 4.3 unregelte Gleichspannungsversorgungen

Bei den unregulierten Gleichspannungsversorgungen wird die Ausgangsgleichspannung nicht auf einen bestimmten Wert geregelt sondern ändert sich in Abhängigkeit der Eingangsspannung und Belastung. Die Welligkeit der Ausgangsspannung liegt normalerweise im Voltbereich und wird in Prozent angegeben. Der Vorteil hierbei liegt im robusten und unkomplizierten Aufbau und wird wegen der Langlebigkeit, wenn es die Anwendung zulässt, häufig verwendet. Dabei werden für die Stromrichterschaltungen ausschließlich Dioden als Ventile verwendet.

#### 4.3.1 Stromrichterschaltungen

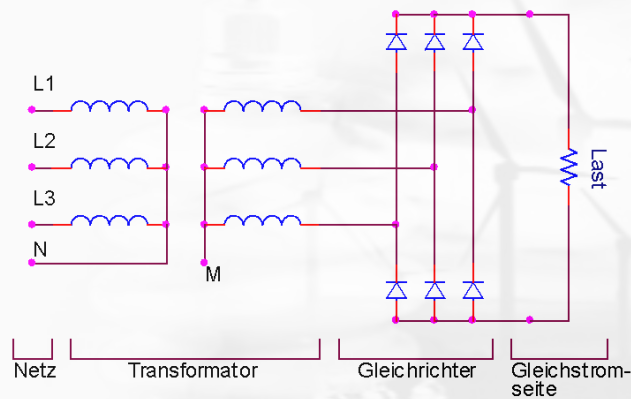


Bild 4.1.1: Prinzipschaltbild eines Stromrichters

##### 4.3.1.1 Gleichrichter- und Wechselrichterbetrieb von Stromrichtern

Unter bestimmten Voraussetzungen kann eine Stromrichterschaltung in Abhängigkeit von der Ansteuerung als Gleichrichter oder als Wechselrichter arbeiten.

Im Gleichrichterbetrieb wird Wechsel- oder Drehstrom in Gleichstrom umgewandelt. Die Energie aus dem Wechsel- oder Drehstromnetz wird über den Stromrichter dem Gleichstromnetz zugeführt. (Energiefluss vom Netz zur Last: Energiebezug).

Im Wechselrichterbetrieb wird Gleichstrom in einen ein- oder mehrphasigen Wechselstrom umgewandelt. Die Energie fließt von der Gleichstrom- zur Wechselstromseite. (Energiefluss von der Last zum Netz: Energieabgabe). Für den Wechselrichterbetrieb müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- es muss eine vollgesteuerte Stromrichterschaltung vorhanden sein (Schaltung darf keine Freilaufdiode enthalten)
- auf der Gleichstromseite muss eine aktive Last vorhanden sein, die eine Spannungsquelle bildet

### 4.3.1.2 Netzurückwirkungen von Stromrichterschaltungen

Aus der Wirkungsweise und dem Verhalten von Stromrichterschaltungen resultieren unerwünschte Rückwirkungen auf das speisende Wechsel- oder Drehstromnetz. Die Netzurückwirkungen lassen sich in 3 Gruppen einteilen:

1. Blindleistungsbelastung des führenden Netzes durch Stromrichter
2. Spannungs- und Stromüberschwingungen im führenden Netz durch die Schaltvorgänge in Stromrichtern
3. Hochfrequenzstörungen durch Stromrichter-Schaltvorgänge

Gegenmaßnahmen:

- Einsatz höherpulsiger Schaltungen
- Blindleistungskompensation
- Schirmung von Signalleitungen
- Filterschaltungen, die Resonanzfrequenzen kurzschließen und so ein Vordringen ins Netz verhindern.
- geeignete Leitungsführung und Abschirmung
- galvanische und räumliche Trennung entsprechender Baugruppen
- Einsatz optischer Übertragungsstrecken mit Lichtwellenleitern

## 4.3.2 Gleichrichterschaltungen

### 4.3.2.1 Einweggleichrichter

Die Eigenschaft der Halbleiterdioden nur in einer Stromrichtung zu leiten wird in der Technik sehr häufig angewendet.

Schließt man einen Verbraucher über eine in Reihe geschaltete Diode an eine Wechselspannungsquelle an, so leitet die Diode den Strom nur in der positiven Halbwelle der Wechselspannung. In der anderen Halbwelle sperrt die Diode.

Durch den Verbraucher fließt ein pulsformiger Strom immer in der gleichen Richtung.

Man sagt, der Strom ist "gleichgerichtet".

Da nur eine Halbwelle der sinusförmigen Wechselspannung ausgenutzt wird, nennt man diese Schaltung Einweggleichrichterschaltung.

Den Mittelwert dieser pulsierenden Gleichspannung kann man mit folgender Formel ausrechnen:

$$U_{\text{eff}} = 0,4 \cdot U_{\text{eff}} - 0,7V$$

Schaltet man einen Kondensator parallel zum Verbraucher, so wird sich dieser in der einen Halbwelle aufladen und in der anderen Halbwelle langsam über den Verbraucher entladen.

Die Gleichspannung wird dadurch etwas geglättet.

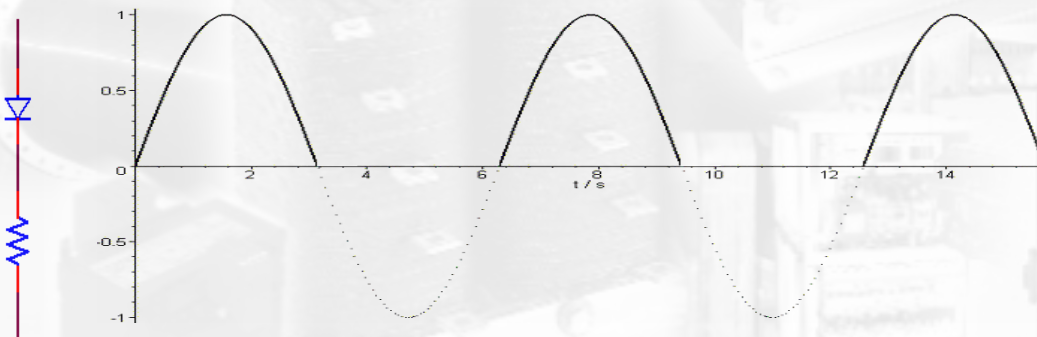


Bild 4.1.2

Bild 4.1.3: Spannungsverlauf bei einer Einweggleichrichterschaltung

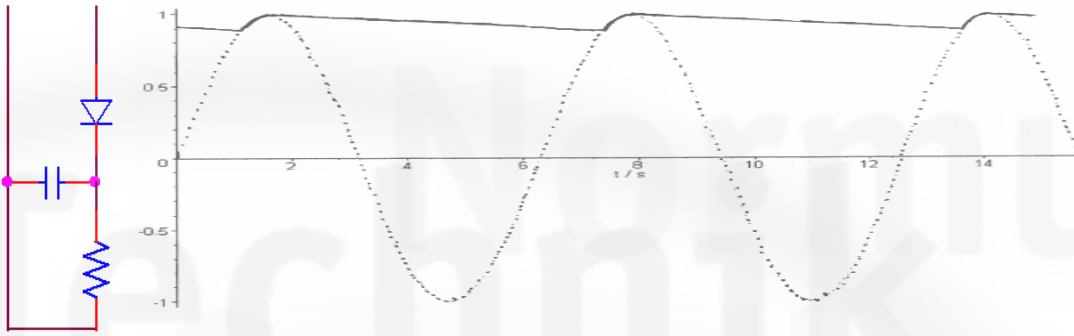


Bild 4.1.4 Bild 4.1.5: Spannungsverlauf bei einer Kondensator geglätteten Einweggleichrichterschaltung

### 4.3.2.2 Mittelpunkt-Zweiweggleichrichtung

Bei der Einweggleichrichtung wird eine der Halbwellen unterdrückt. Um diese auch auszunutzen, kann bei Verwendung eines Transformators mit zwei gleichen Wicklungen (oder Mittelanzapfung) eine Zweiweggleichrichtung angeschlossen werden.

In beiden Halbwellen fließt also der Strom in der gleichen Richtung durch den Verbraucher. Am Verbraucher liegt eine entsprechende Gleichspannung.

Durch Anschluss eines Ladekondensators an die Klemmen kann diese pulsierende Gleichspannung wie bei der Einweggleichrichterschaltung noch verbessert werden

Die Größe der Gleichspannung am Ladekondensator berechnet man wie bei der Einwegschaltung. Als Spannung muss hier der Effektivwert einer Wicklung eingesetzt werden. Auch die Sperrspannungen der Dioden bleiben gleich. Es handelt sich hier praktisch um zwei abwechselnd arbeitende Einweggleichrichter.

Kondensatorspannung =  $U_{CL}$        $U_{CL} = \hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_{eff}$

Dioden Sperrspannung =  $U_{SP}$        $U_{SP} = 2 \cdot \hat{u}$

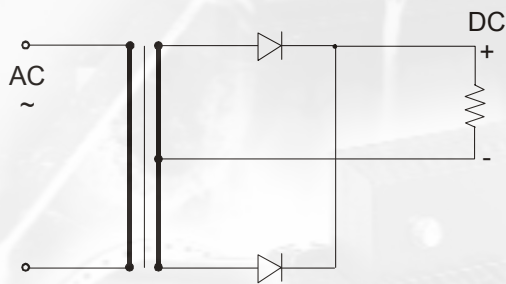


Bild 4.1.6: Schaltbild bei der Mittelpunkt-Zweiweggleichrichtung

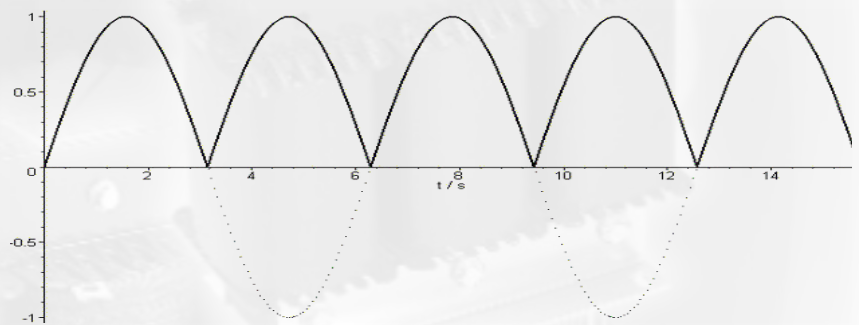


Bild 4.1.7: Spannungsverlauf bei der Mittelpunkt-Zweiweggleichrichtung

### 4.3.2.3 Brückengleichrichterschaltung

Steht kein Transformator mit Mittelanzapfung zur Verfügung, kann durch Verwendung von vier Dioden in Brückenschaltung ebenfalls eine Doppelweggleichrichtung erreicht werden.

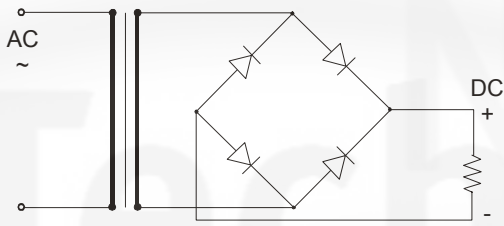
- Liegt auf der Sekundärseite des Transformators eine positive Spannung an, fließt der Strom über Diode D3 und Diode D2.
- In der nächsten Halbwelle fließt der Strom über die Diode D4 und die Diode D1.
- Durch den Verbraucher fließt immer der Strom in der gleichen Richtung (Gleichrichtung).

Natürlich lässt sich auch bei dieser Schaltung eine Verbesserung der Gleichspannung durch das Parallelschalten eines Ladekondensators erreichen. Die Berechnung der maximalen Gleichspannung am Ladekondensator erfolgt wie bei der Einwegschaltung.

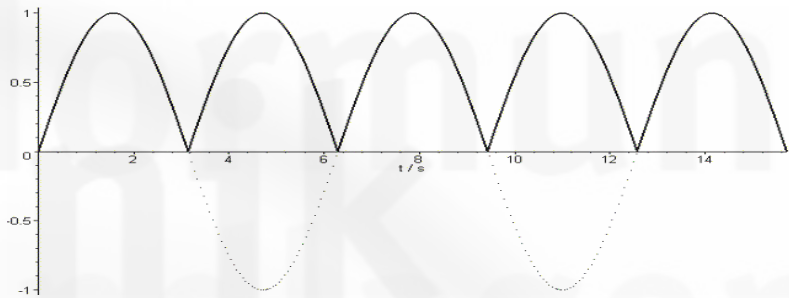
Die Sperrspannung der Dioden muss jetzt nur noch halb so groß sein wie bei der Einwegschaltung, da immer zwei Dioden in Reihe geschaltet sind.

Allerdings müssen die Sperrwiderstände beider Dioden genau gleich groß sein, da sich sonst die Sperrspannung ungleich auf beide Dioden verteilt.

Im Handel sind Brückengleichrichter erhältlich, bei denen die Dioden bereits in einem Gehäuse untergebracht sind.



**Bild 4.1.8:** Schaltbild bei der Mittelpunkt-Zweiweggleichrichtung



**Bild 4.1.7:** Spannungsverlauf bei der Brückengleichrichterschaltung

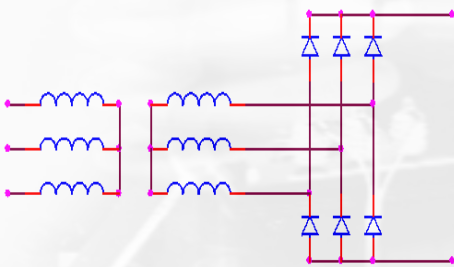
#### 4.3.2.4 Drehstrom-Brückengleichrichter

Die abgegebene Gleichspannung von Einphasen-Brückengleichrichtern hat jedoch immer noch eine Restwelligkeit von 48%. Eine geringere Restwelligkeit kann durch den Einsatz von Drehstromtransformatoren mit nachgeschaltetem Drehstrom-Brückengleichrichter erreicht werden.

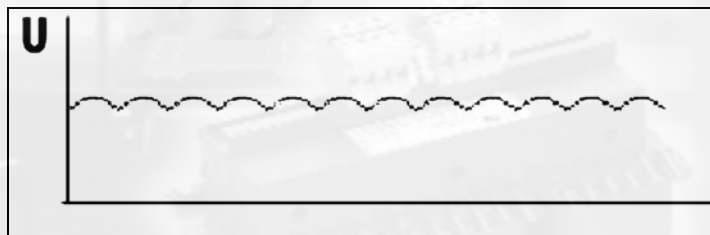
Durch die verschiedenen Phasen und deren jeweils zeitlich versetzten Halbwellen, erreicht man eine schon fast glatte Gleichspannung. Durch einen Kondensator kann diese noch verbessert werden.

Der Einsatz solcher Systeme sollte bei großen Gleichstromverbrauchern zum Einsatz kommen, die den Kondensator sonst zu schnell entladen und eine stabilere Gleichspannung benötigen ohne Restwelligkeit.

Diese geringste Restwelligkeit sorgt für eine noch stabilere Stromversorgung.



**Bild 4.1.9:** Schaltbild beim Drehstrom-Brückengleichrichter



**Bild 4.1.10:** Spannungsverlauf bei der Drehstrom-Brückengleichrichter

#### 4.3.3 Wärmebelastung durch Oberwellen

Normalerweise werden in Netzen an denen induktive Verbraucher arbeiten Kondensatoren zur Kompensation des Blindstromes eingesetzt. Jedoch falls dort Stromrichter oder andere Erzeuger von Oberschwingungen betrieben werden, entstehen zusätzliche hohe Netzbelastungen.

Die Impedanz des Kompensationskondensators sinkt bei höherer Frequenz und es kommt zu Resonanzerscheinungen zwischen der Netzinduktivität (Transformator) und dem Kondensator.

Der zusätzliche Strom belastet den Transformator, die Leitungen, Schaltelemente und den Kondensator.

Wenn die Belastung größer als 20 % der Nennleistung des Transformators beträgt, werden den Kompensationskondensatoren normalerweise Drosseln vorgeschaltet. Der entstehende Reihenschwingkreis reduziert die Oberwellen und so auch die Belastung von Netztransformator und Netzzuleitung.

Falls durch die Drosseln die Oberschwingungen nicht genügend klein gehalten werden können, müssen abgestimmte Filterkreise eingesetzt werden.

Diese Filterkreise werden gezielt auf die bestehenden harmonischen Frequenzen abgestimmt. Dadurch werden bis zu 90% der Oberwellen gedämpft.

## 4.4 geregelte Gleichspannungsversorgungen

Geregelte Gleichspannungsversorgungen unterscheidet man in lineargeregelte, primär- und sekundärgetaktete. Die Welligkeit der Ausgangsspannung liegt normalerweise im Millivoltbereich.

### 4.4.1 Linearregler

Dieser Regler besteht im Wesentlichen aus Leistungstransistoren, welche als veränderbare Widerstände wirken. Dabei wird der Istwert der Ausgangsspannung über einen Spannungsteiler abgefragt und mit dem Sollwert (Referenzspannung, in der Regel über eine Z-Diode) kontinuierlich verglichen.

Die Vorteile liegen vor allem in:

- kurzen Ausregelzeiten
- einfaches Schaltungskonzept, dadurch Preiswert
- sehr geringe Welligkeit

Die Nachteile sind bei diesen Regler:

Bei hohen Lastströmen  $I_{0\max} = \frac{U_0}{R_{L\min}}$  und vor allem bei großen Spannungsdifferenzen  $U_{CE\max} = U_{I\max} - U_0$

einen niedrigen Wirkungsgrad, da am Stellglied eine erhebliche Kollektorverlustleistung  $P_{C\max}$  entsteht.

### 4.4.2 Getaktete Gleichspannungsversorgung

Sind in der Regel auch als Schaltnetzteile und Schaltregler bekannt. Im Gegensatz zur linearen Gleichspannungs- bzw. Gleichstromversorgung wird hier die Ausgangsgröße nicht kontinuierlich geregelt sondern über Leistungs- transistoren geschaltet. Dadurch sind im Gegensatz zu Linearreglern wesentlich höhere Wirkungsgrade zu erreichen. Die Regelung erfolgt entweder durch die Änderung des Tastverhältnisses (Einschaltzeit zu Ausschaltzeit) bei konstanter Frequenz oder Änderung der Frequenz bei konstantem Tastverhältnis.

Sie zeichnen sich durch einen nahezu spannungsunabhängigen Wirkungsgrad von  $\eta = 75-90\%$  aus und eignen sich deshalb besonders für trafolose Netzteile mit großem Spannungsunterschied.

Vorteile:

- hoher spannungsunabhängiger Wirkungsgrad
- großer Eingangsspannungsbereich
- Einsparung von Eisenmasse und Bauvolumen (vor allem bei primärgetakteten Schaltnetzteilen)

Nachteile:

- niedrige Regelgeschwindigkeit bei plötzlichen Laständerungen
- prinzipbedingte Restwelligkeit der Ausgangsspannung
- zusätzlicher Schaltungsaufwand für Funkentstörung

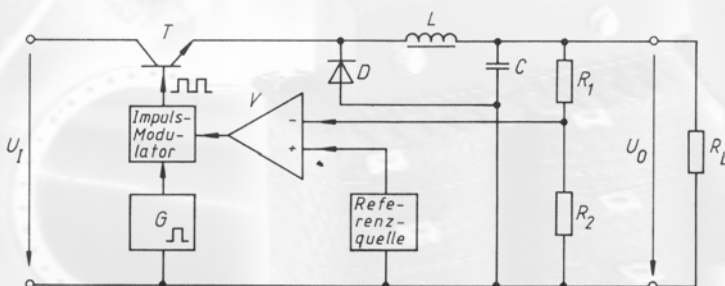


Bild 4.4.2.1 Prinzipschaltbild eines Schaltspannungsreglers

Das Leistungsstellglied ist ein Schalttransistor, der durch eine Rechteckimpulsfolge mit dem Tastgrad  $t_i/T_s$  auf- und zugesteuert wird. Die mittlere Verlustleistung am Stellglied beträgt dabei:

$$P_V = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_i} u_{CE}(t) i_C(t) dt$$

Betrachtet man den Transistor näherungsweise als idealen Schalter, so folgt daraus:

$$P_{V\max} \approx \frac{t_i}{6T_s} U_{CE\max} I_{C\max} \quad \text{mit } t_i/T_s < 1$$

Übliche Schaltfrequenzen für Regler liegen oberhalb des Hörbereiches bei  $f_s = 1/T_s = 16...25\text{kHz}$ .

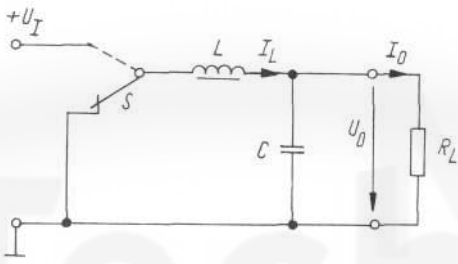


Bild 4.4.2.2 Zur Wirkungsweise des Schaltspannungsreglers

Zur Erklärung der Wirkungsweise sind im Bild 4.4.2.2 der Schalttransistor T und die Freilaufdiode D (Bild 4.4.2.1) durch einen mechanischen Umschalter S ersetzt. Sinkt  $U_o$  unter einen Schwellwert  $U_{O1}$ , so steuert der Komparatorverstärker durch und gibt über den Tastverhältnismodulator einen Impuls auf die Basis von T, so dass T öffnet (S an  $U_I$ ). Der Laststrom fließt über die Drossel L und lädt C auf, bis  $U_o$  einen oberen Schwellwert  $U_{O2}$  erreicht hat. Dabei wird der Tastimpuls unterbrochen und T gesperrt (S an Masse). Der Energiespeicher (L/C) übernimmt nun in der Sperrphase die Speisung des Verbrauchers, wobei der Stromfluss über L aufrechterhalten wird (Selbstinduktion). Beim Absinken von  $U_o$  wiederholt sich dieser Vorgang. Die Ausgangsspannung weist eine prinzipbedingte Welligkeit auf, deren Größe durch die Differenz der Komparatorschwellen gegeben ist (Bild 4.4.2.3). Schwankungen der Eingangsspannungen oder Laständerungen führen im Regler zu einem geänderten Tastgrad und somit zu kürzeren oder längeren Aufladezeiten für den Energiespeicher. Unter den idealisierten Bedingungen im Bild 4.4.2.2 folgt aus dem Induktionsgesetz ein linearer Stromanstieg in der Induktivität L während der Einschaltzeit  $t_i$  und ein linearer Stromabfall während der Ausschaltzeit  $T_s - t_i$ . Der Mittelwert der Ausgangsspannung  $U_{oAV}$  ist dem Tastgrad direkt proportional. Der Laststrom  $I_o$  darf einen Mindestwert  $I_{o,min}$  nicht unterschreiten, sonst wird der kontinuierliche Stromfluss in der Drossel unterbrochen (lückender Betrieb).

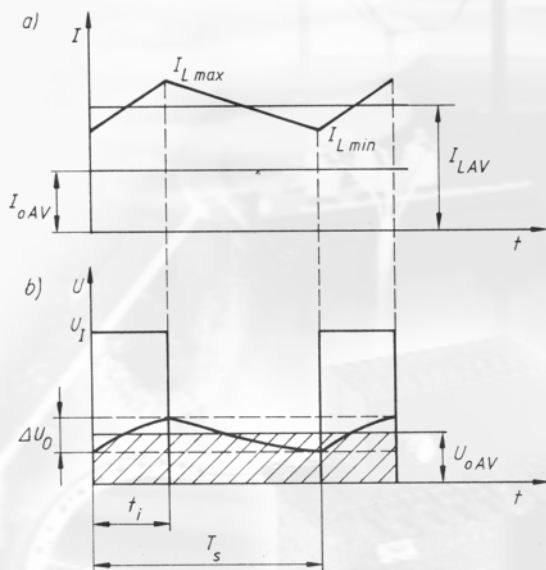


Bild 4.4.2.3  
a) Stromverlauf

b) Spannungsverlauf am Schaltspannungsregler

## 4.5 Anlasstransformator

Wird ein Drehstrommotor direkt eingeschaltet, verursacht der große Anlaufstrom einen Spannungsabfall im Netz. Die Energieversorgungs-Unternehmen haben deshalb Vorschriften erlassen, die ein direktes Einschalten von Motoren am öffentlichen Netz ab einer bestimmten Bauleistung beschränkt.

Um dennoch große Drehstrommotoren einzuschalten, kann man sich das Anlassen mit Transformatoren bedienen. Anlasstransformatoren setzen den Anzugsstrom während des Anlassvorgangs herab.

Dem Motor wird während des Anlassvorgangs die dem Übersetzungsverhältnis des Transformators entsprechend verminderte Netzspannung zugeführt. Dadurch wird das Anzugsmoment und der dem Netz entnommene Strom verringert.

Bei Bedarf kann der Anlaufvorgang auch über mehrere Spannungsstufen erfolgen. Am Ende des Anlaufes wird wieder direkt die Netzspannung an den Motor weitergegeben.

## 4.6 Spartransformatoren

Der Spartransformator ist ein induktiver Spannungsteiler der von beiden Seiten betrieben werden kann. Er erlaubt auch Spannungserhöhung und ist daher ein echter Transformator. Der Spartransformator ist ohne Einschränkungen durch die Ersatzschaltbilder für Transformatoren darstellbar.

Die wichtigen Unterschiede gegenüber einem normalen Transformator mit getrennten Wicklungen ist am vereinfachten Ersatzschaltbild des induktiven Spannungsteilers erkennbar.

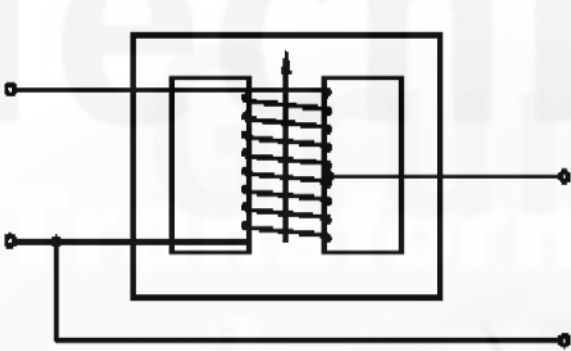


Bild 4.3.1: Skizze Spartransformator

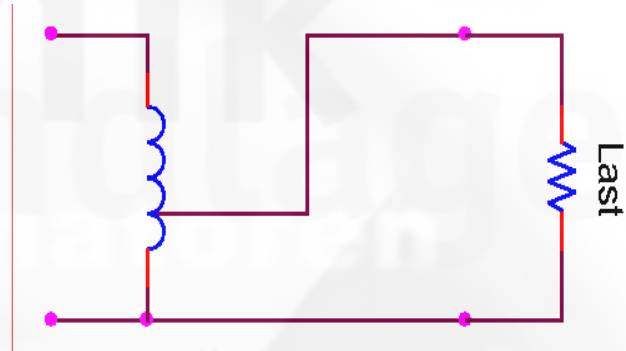


Bild 4.3.2: Schaltbild Spartransformator

Bei Spartransformatoren ist die Eingangs- und Ausgangswicklung miteinander verbunden.

Es gibt also nur eine Wicklung mit einer Anzapfung. Die zweite Wicklung ist gespart. Die übertragbare Leistung ist bei gleichen Abmessungen also größer.

Der Spartransformator hat also eine kleiner Baugröße als ein Trenntransformators.



**Der Spartransformator hat keine galvanische Trennung zwischen Eingang und Ausgang. Das gefährliche Erdpotential liegt am Ausgang an.**

Die Vorteile bei einem Spartransformator durch die gesparte Wicklung sind:

- Besonders bei größerer Bauweise eine enorme Gewichtsersparnis
- Kosteneinsparung bei der Produktion
- Geringe Verluste eines Spartrafos, und der dadurch erreichte hohe Wirkungsgrad
- Unabhängig von der Belastung spannungsfest

Möchte man am Ausgang einer Schaltung Wechselspannungen mit einstellbarer Höhe erzeugen, so erhält der Sekundärkreis entweder mehrere schaltbare Abgriffe, oder einen kontinuierlich einstellbaren Abgriff (Regeltransformator). Bevor es Leistungshalbleiter gab, war dies fast die einzige Möglichkeit, Netzgeräte mit variabel einstellbarer Ausgangsspannung zu bauen.

### 4.6.1 Dimensionierung

Beispiel :

Transformator mit einer Typenleistung von 1000 VA, einer Unterspannung von 230 V und einer Oberspannung von 400 V.

$$\text{Typenleistung} \times \left(1 - \frac{\text{Unterspannung}}{\text{Oberspannung}}\right) = \text{Nennleistung} \Rightarrow 1000\text{VA} \times \left(1 - \frac{230}{400}\right) = 425\text{VA}$$

Anstelle eines Transformators der Baugröße für 1000 VA wird also nur ein solcher für 425 VA benötigt

## 4.7 Steuertransformatoren

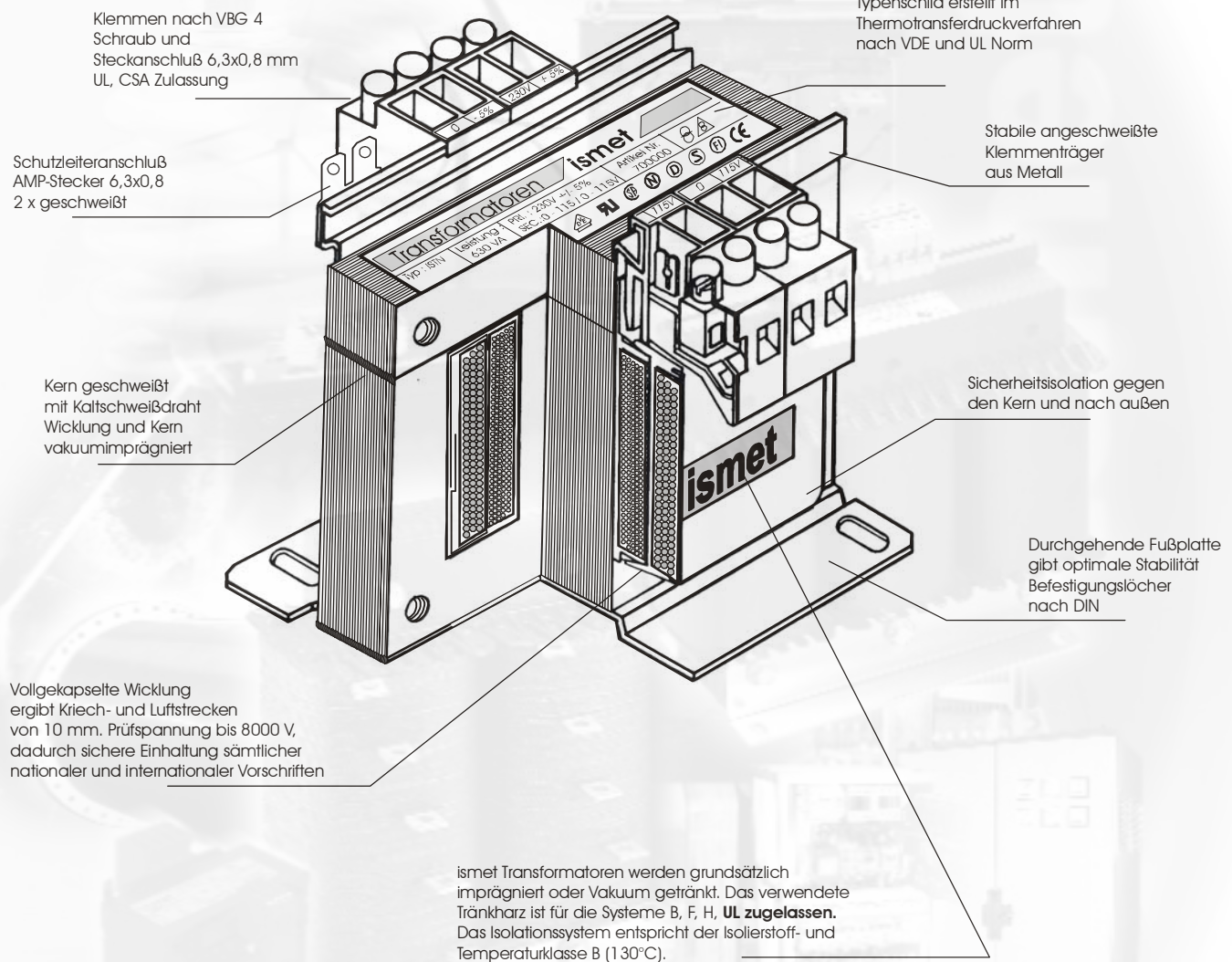
Steuertransformatoren ermöglichen den Anschluss von Maschinen und Anlagen an die weltweit verschiedenen Netzspannungen und Netzarten. Sie erhöhen die Funktionssicherheit von elektrischen Anlagen bei ständiger Über- und Unterspannung im Netz durch ihre serienmäßigen Zusatzanzapfungen von  $\pm 5\%$ .

Steuertransformatoren dämpfen im Störfall die Höhe des Kurzschlussstromes im Steuerstromkreis.

Steuertransformatoren sind Transformatoren mit elektrisch getrennten Wicklungen zur Speisung von elektronischen Steuer- und Meldestromkreisen.

Sie werden gemäß VDE 0570 Teil 2-2 gebaut. Die Kurzzeitleistung eines Steuertransformators ist die Ausgangsleistung bei  $\cos \varphi 0,5$  bei der die Ausgangsspannung höchstens 5% gegenüber dem Nennwert abfallen darf.

Steuertransformatoren finden ihren Einsatz im allgemeinen Steuerungsbau, in speziellen Stromversorgungsgeräten und vor allem in Schaltungen, die eine Netztrennung erfordern.



## 4.8 Potentialtrennung

Bei größeren Distanzen oder bei Datenübertragungen zwischen zwei Häusern müssen neben den Störungen die direkt auf die Datenleitungen einwirken auch mögliche Verschiebungen der Erdpotentiale (Blitzschlag, verschiedene Erdungssysteme) in Betracht gezogen werden.

Dies kann durch einen Transformator mit Potentialtrennung erreicht werden. Ein Überspannungsableiter kann zusätzlich vor Zerstörung schützen.

Bei einer potentialgetrennten Schnittstelle müssen eingekoppelte Störsignale auch nicht vollkommen unterdrückt werden, da die Störungen meist als Gleichtaktsignal in Erscheinung treten die nicht durch den Transformator weitergegeben werden.

### 4.8.1 Potentialtrennung 1:1

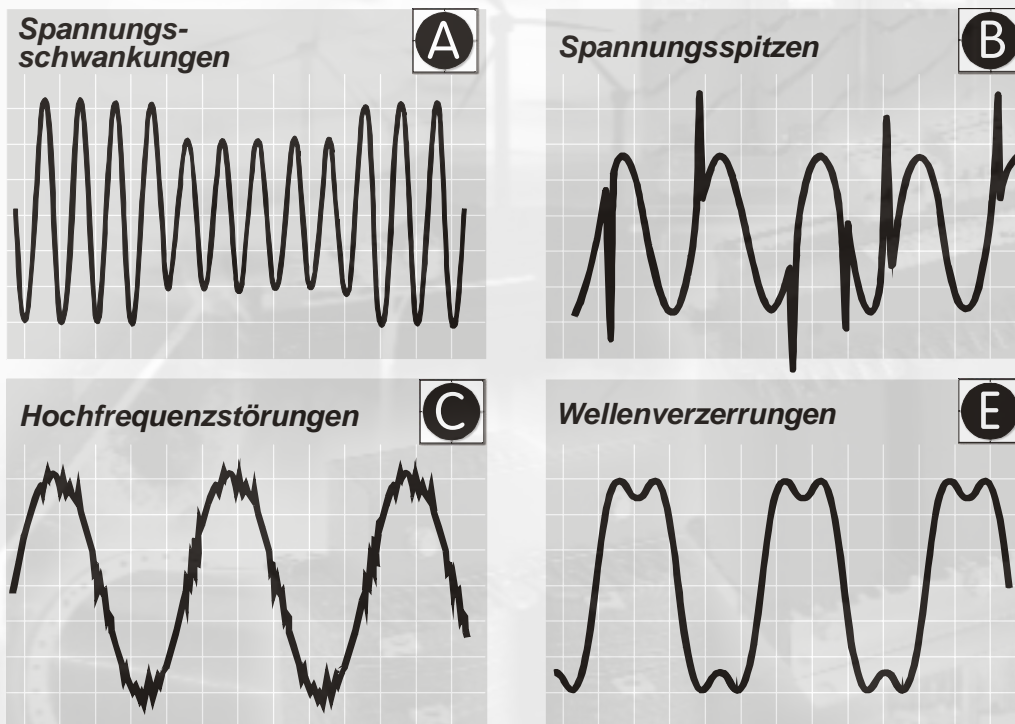
Eine potentialfreien Steuerspannung in Schaltanlagen oder für Arbeiten im Labor wird mit "Isoliertransformatoren" erzeugt, welche oft ein Übersetzungsverhältnis von 1:1 haben.

Diese Labortransformatoren nennt man Trenntransformatoren. Bei ihnen sind die Eingangs- und Ausgangswicklungen durch doppelte oder verstärkte Isolierung elektrisch getrennt.

Dadurch kann die Gefahr eingeschränkt werden, die durch das gleichzeitige Berühren von Erde und unter Spannung stehenden Teilen ergeben, die im Fall eines Isolationsfehlers unter Spannung stehen können.

## 4.9 Spannungskonstanthalter

Folgende elektrische Störfaktoren können auftreten:



Magnetische Spannungskonstanthalter werden meist in Bereichen der Technik eingesetzt, in denen sehr hohe Ansprüche an die Spannungskonstanz von Wechselspannungsnetzen gestellt werden. Dabei wird unmittelbar vor den Verbraucher ein Spannungskonstanthalter gestellt.

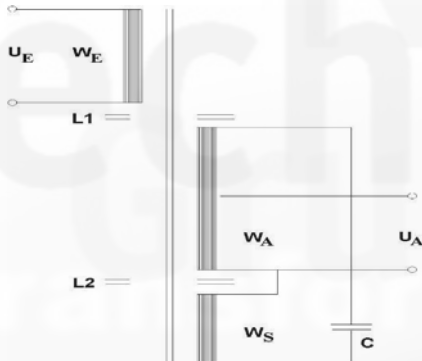
Aufgrund der Wirkungsweise des magnetischen Konstanthalters sowie des Aufbaus ergeben sich folgende Vorteile:

- Netzspannungsschwankungen werden mit sehr kurzer Ausregelzeit ausgeregelt
- Störspannungsspitzen werden unterdrückt
- Überbrückung kurzzeitiger Spannungseinbrüche
- Kurzschlussstrom wird begrenzt
- Keine Funkstörung
- Trennung vom Netz
- Wartungsfrei

Funktion:

Bei magnetischen Spannungskonstanthaltern ist die Ausgangsspannung von der Eingangsspannung und von der Belastungsgröße größtenteils unabhängig.

Für die Konstanzhaltung wird die ferromagnetische Sättigungseigenschaft des Blechpaketes ausgenutzt.

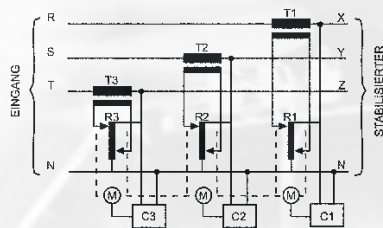


**Bild 4.6.1:** Prinzipschaltbild magnetisch

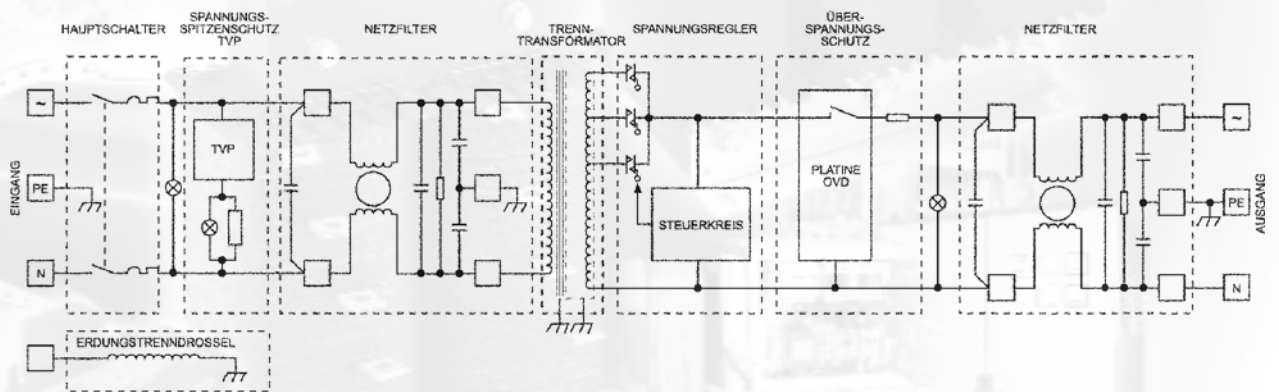
Beim magnetischen Spannungskonstanthalter ist die Eingangswicklung WE und die Ausgangswicklung WA auf einem Kern. Sie sind jedoch durch einen Nebenschluss mit Streuluftspalt weitgehend voneinander getrennt. Dadurch können die magnetischen Flüsse der Wicklungen WE und WA verschiedene Werte annehmen. Die Wicklung WA ist mit dem Kondensator C in Resonanz gebracht. Durch die Sättigung des Eisens ergibt sich eine konstante Ausgangsspannung.

Der Oberwellengehalt der Ausgangsspannung ist kleiner als 3%.

Neben den magnetischen Konstanthaltern gibt es auch elektromechanische und elektronische.



**Bild 4.6.1:** Prinzipschaltbild elektromechanisch



**Bild 4.6.1:** Prinzipschaltbild elektronisch

## 4.10 Schweißtransformatoren

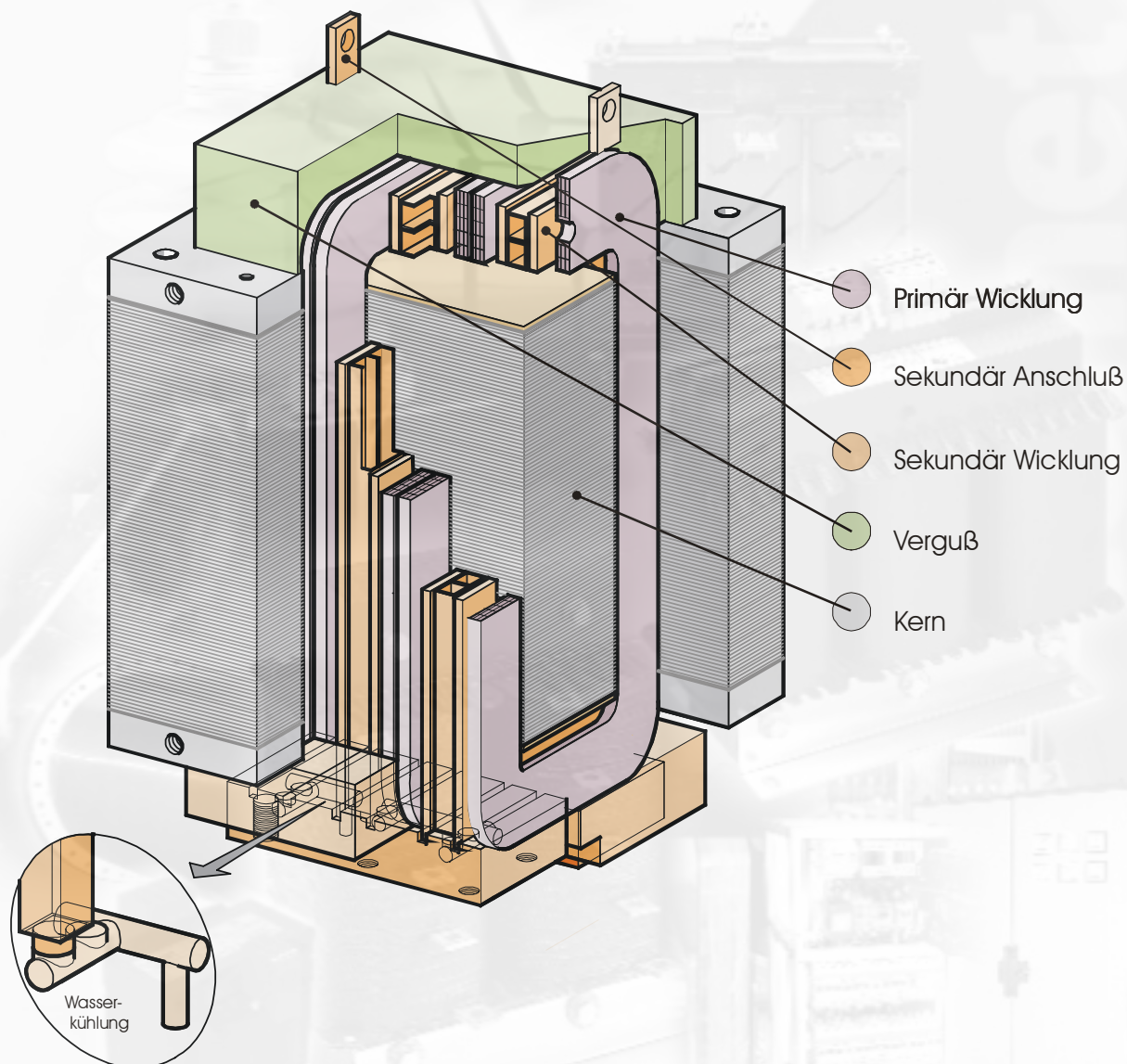
Der Schweißtransformator ist eine preisgünstige und robuste Schweißstromquelle. Er wandelt entsprechend seinem Übersetzungsverhältnis den aus dem Netz kommenden Wechselstrom hoher Spannung und niedriger Stromstärke in Schweißwechselstrom mit niedriger Spannung und hoher Stromstärke um.

Seine Hauptteile sind ein Eisenkern, eine Eingangswicklung (Primärwicklung) und eine Ausgangswicklung (Sekundärwicklung), sowie eine Einstellung für den Schweißstrom.

Beide Wicklungen sind isoliert. Der Netzstrom durchfließt die Eingangswicklung mit ihren zahlreichen Windungen. Elektrische Energie erzeugt im Eisenkern ein dauernd wechselndes Magnetfeld. Dadurch wird in der Sekundärwicklung eine Wechselspannung induziert.

Es lassen sich nicht alle Elektroden mit Wechselstrom verschweißen.

### 4.10.1 Aufbau eines wassergekühltem Schweißtransformators



## 4.11 Streukerntransformator

Die Anzapfungen an verschiedenen Windungen ermöglicht nur eine Verstellung des Stroms in Stufen. Für eine optimale Flexibilität ist allerdings eine stufenlose Einstellung günstiger.

Nach ersten Ansätzen mit Spulen, die gegeneinander auf dem Eisenkern verschiebbar waren, entstanden die so genannten Streukerntransformatoren.

Hierbei wurde früher ein Eisenpaket mehr oder weniger tief zwischen Primär- und Sekundärspule in das Magnetfeld eingeführt. Je nach Eintauchtiefe verlief dann ein größerer oder kleinerer Teil der magnetischen Feldlinien durch diesen Eisenkern.

Der dabei induzierte Strom wurde deshalb entsprechend variiert.

Heute nutzt man meist eine Methode, wobei mit einem beweglichen Magnetjoch gearbeitet wird.

Der Streukern wird mit einer an der Oberseite des Transformatorgehäuses angebrachten Kurbel verstellt, womit eine stufenlose Stromeinstellung möglich ist.

Der Streukerntransformator hat jedoch auch ein Nachteil:

Bei unpräziser Führung des Streukerns oder nach dem gebrauchsbedingten Verschleiß der Führung entwickeln diese Geräte durch Vibration des Kerns im Magnetfeld unangenehme Brummgeräusche.



ismet

## 5 Drosselspulen

### 5.1 Allgemeine Angaben.

Im Gegensatz zum Transformator, der die Spannung nach oben oder nach unten transformiert, je nach Wicklungsauslegung, dient die Drosselspule zur Spannungs- oder Stromregelung im Wechselstromkreis, sperrt hochfrequenten Wechselstrom und glättet welligen Gleichstrom in Stromrichterkreisen. Drosseln sind Induktivitäten und wirken als magnetische Speicher. Induktivitäten bewirken, dass der Strom der Spannung nacheilt. Beim Kondensator ist es umgekehrt, der Strom eilt der Spannung voraus. Er wirkt als Energiespeicher.

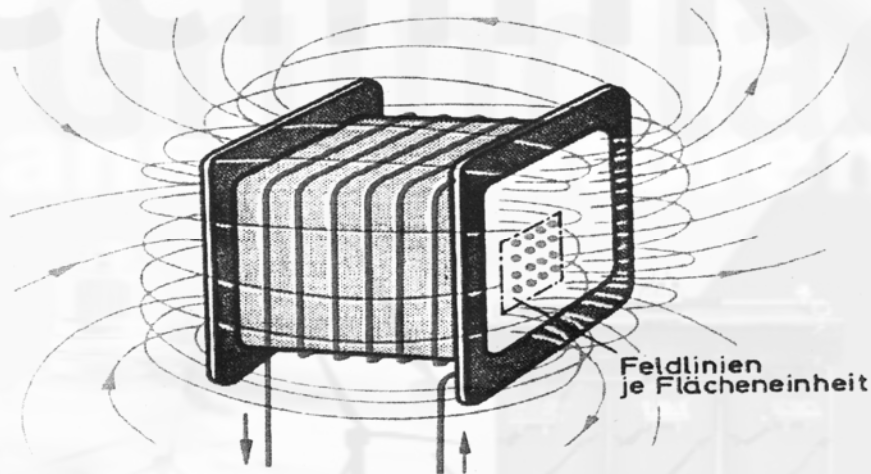


Bild 5.1: Magnetisches Feld einer stromdurchflossenen Spule

### 5.2 Durchflutung.

Das Produkt aus Strom und Windungszahl nennt man **Durchflutung**.

$$\Theta = I \times N$$

$\Theta$  : Durchflutung  
 $i$  : Strom  
 $R$  : Widerstand

Eine Spule mit 600 Windungen übt bei 2 A. die gleiche Kraft aus wie 1200 Wdg. bei 1 A = 1200 AW ( Ampèrewindungen.)

Die **magnetische Feldstärke**  $H = \frac{\Theta}{l_m} = \frac{I \times N}{l_m}$  ist bei gleicher Durchflutung umso grösser, je kürzer die mittlere Feldlinienlänge  $l_m$  ist.

Die Gesamtzahl der Feldlinien in einer Spule heisst **magnetischer Fluss**  $\Phi$  (Phi)  
Einheit Vs Voltsekunde.

Die **magnetische Flussdichte** (magnetische Induktion  $B$ ) gibt an, welcher magnetische Fluss die Fläche von  $1\text{m}^2$  senkrecht durchsetzt.  $B = \frac{\Phi}{A}$  ohne Eisenkern  $B = \mu_0 \times H$

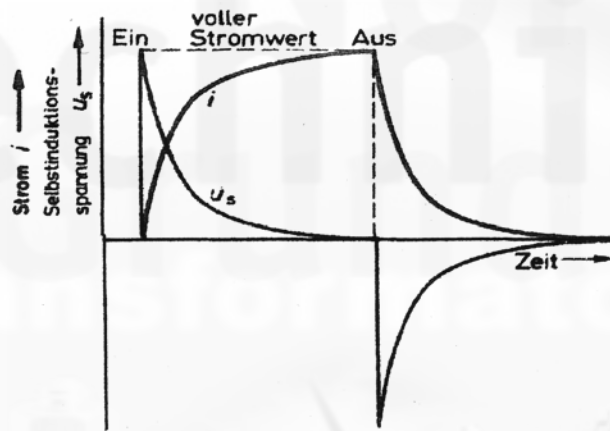
( A Fläche  $\text{m}^2$  )  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

Die Einheit der Flussdichte ist  $1 \text{Vs}/\text{m}^2$  oder das **Tesla**, früher auch die Einheit Gauss. 1 Gauss entspricht einer Feldlinie je  $\text{cm}^2$ . **1 Tesla gleich 10 000 Gauss.**

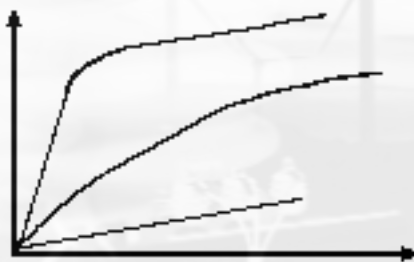
Eine Spule hat die Induktivität von 1 Henry, wenn bei einer gleichförmigen Stromänderung von 1 A in 1 s eine Spannung von 1 Volt induziert wird.

## 5.2.1 Selbstinduktion

Ändert man in einer Spule den magnetischen Fluss (Ein-, Ausschalten, Frequenz oder Spannungsänderung), so entsteht in jeder Spulenwindung eine Induktionsspannung. Diese wirkt der Flussänderung entgegen (Selbstinduktion). Der Strom kann also nicht sofort den Maximalwert erreichen.



Eisen leiten die Feldlinien besser als Luft. Die Ursache für die Verstärkung des magnetischen Flusses ist das Ausrichten der Elementarmagnete im Eisen. Je höher der Strom, desto grösser die Durchflutung in der Spule, jedoch nur bis zur Sättigung des Eisens.



Im Eisenkern aus Trafoblech ohne Luftspalt.

Mit Luftspalt

Drosselspule ohne Eisenkern (linear)

Bild 5.2.1: Magnetisierungskennlinien

Bei Gleichstrom bleibt die Richtung des Magnetflusses immer gleich. Die Drosselspule wirkt wie ein Magnet (Vormagnetisierung) und die Oberwellen beeinflussen zusätzlich die Wicklung, den Kern und die Induktion.

Bei Wechselstrom entstehen im Eisen durch die Ummagnetisierung Verluste, das sich dadurch erwärmt. Die Induktion muss dementsprechend angepasst werden.

Im Eisengeschlossenen magnetischen Kreis ist der Fluss homogen. Am Besten im Ringkern.

Durch den Einbau von Luftspalten im Eisenkern müssen die Kraftlinien diese Strecke überwinden. Ein grosser Teil nimmt den Weg aussen herum.

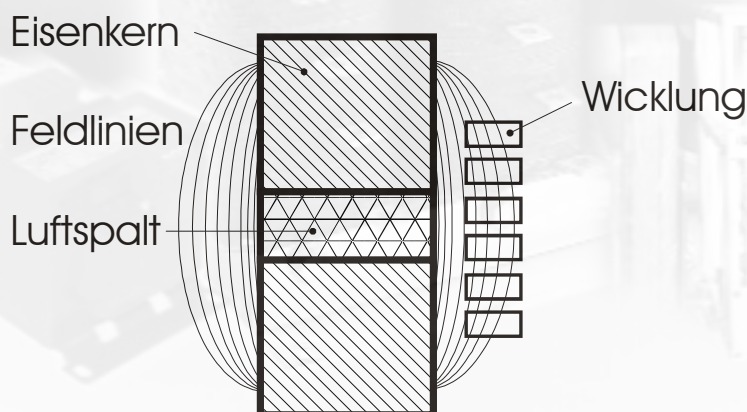


Bild 5.2.2: Wicklung

Ist die Wicklung in der Nähe des Luftspaltes, erwärmen die austretenden Feldlinien die Drähte umso mehr, je dicker und näher sie sind.

Je nach Anwendung der Drossel wirken enorme magnetische Kräfte auf die Wicklung, Kern und Luftspalt, sodass alles gut fixiert sein muss, sonst wird die Drossel in kurzer Zeit zerstört. ( Verleimen des Luftspaltes und Vakuum imprägnieren der ganzen Drossel)

Durch die Grösse des Luftspaltes wird der magnetische Fluss beeinflusst. Ein grösserer Luftspalt braucht mehr Strom um die gleiche Induktivität zu erzeugen bzw. die Induktivität nimmt ab bei gleichem Strom. Durch die Luftspaltgrösse kann also die Induktivität in engen Grenzen abgestimmt werden. Er bestimmt wesentlich das Verhältnis Leerlaufinduktivität zur Nenninduktivität.

### 5.3 Drosselarten und Einsatz.

#### 5.3.1 Luftdrossel

Luftdrosseln werden 1 phasig und 3 phasig eingesetzt. Da kein Eisen vorhanden ist, verläuft die Induktion linear mit dem Strom. Es entstehen keine Verzerrungen. Bei höheren Frequenzen ändert sich die Induktion nur wenig infolge der Stromverdrängung. Bei großer Stromsteilheit und sehr hohen Frequenzen muss die Wicklung entsprechend angepasst werden, z.B. mit Litze. Ein Nachteil ist aber die kleinere Feldstärke (Henry) wie bei einer Drossel mit Eisenkern. D.h. also mehr Windungen oder größere Durchmesser. Bei hohen Spannungen entfällt die Isolierung gegen den Kern, was sich als Vorteil erweist.

In der Starkstromtechnik werden solche Spulen vielseitig eingesetzt als:

##### 5.3.1.1 Kurzschluss – Drosselspulen

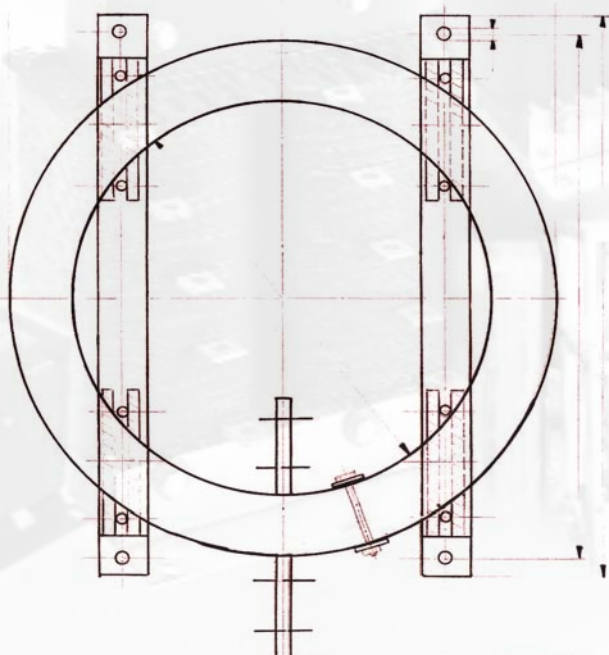
Sie werden in Reihe mit einem System geschaltet, um die Fehlerströme zu begrenzen. In Netztransformatoren mit 3 Wicklungen werden sie häufig zur Begrenzung der Kurzschlussströme der Unterspannungsseite eingebaut. ( $I_k$  Max. 25 Fach  $\times I_{nenn}$  während 3 Sek.) Das bedeutet sehr große Kräfte, die im Kurzschluss auf die Wicklung einwirken. Die Wicklung wird rund hergestellt und speziell abgestützt.

##### 5.3.1.2 Erdschluss - Löschspulen

Sie sind einphasige Drosselspulen, die in induktiv geerdeten Netzen zwischen Sternpunkt und Erde geschaltet werden. Sie kompensieren die Grundschiwingung des im Erdschlussfall über die Fehlerstelle fließenden kapazitiven Netzstromes.

Kleine Luftspulen werden eingesetzt in der Elektronik oder in der Elektroakustik z.B. als Frequenzweiche. Auf diese Anwendung wird später eingegangen.

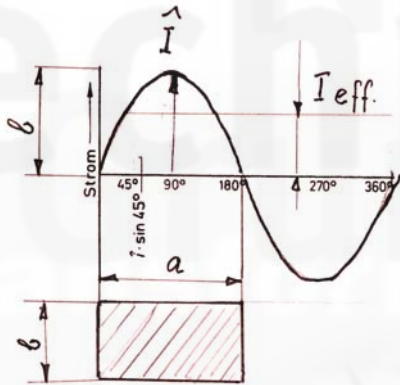
Luftdrossel-Spule



## 5.3.2 Drosselspule mit Eisenkern für Wechselstrom.

### 5.3.2.1 Scheitelwert und Effektivwert.

Sinusförmige Wechselspannung von z.B. 10 V<sub>eff.</sub> hat den gleichen Wert wie 10 V Gleichspannung.



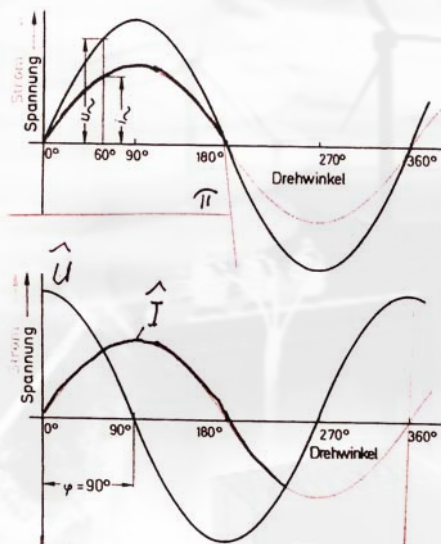
10 A<sub>eff.</sub> hat den gleichen energetischen Wert, wie 10 A Gleichstrom.

$$I_{\text{eff.}} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = \frac{100\%}{1,41} = 70,7\%$$

$$\text{Mittelwert} = 100\% \times \frac{2}{\pi} = 64\%$$

$$\text{Formfaktor} = \frac{70,7\%}{64\%} = 1,11$$

### 5.3.2.2 Phasenverschiebung.



Phasengleiche periodische Vorgänge bei Belastung mit einem Wirkwiderstand z.B. Glühlampe, Heizkörper.

Phasenverschiebung durch Belastung mit einer reinen Induktivität. Der Strom eilt der Spannung 90° nach. Bei kapazitiver Belastung eilt der Strom der Spannung 90° voraus.

Rein induktive Blindwiderstände lassen sich nicht herstellen und enthalten immer einen Anteil Wirkwiderstand z.B. Drossel oder Motor etc.

### 5.3.2.3 Wechselstromwiderstände

Der induktive **Blindwiderstand** einer Spule ist umso grösser, je grösser die Induktivität der Spule und je höher die Frequenz ist.

Induktive Reaktanz  $XL = 2 \times \pi \times f \times L$ , (L in Henry)

z.B. für eine Spule mit 2H bei 50 Hz:  $XL = 2 \times 3,14 \times 50 \text{ Hz} \times 2\text{H} = 628 \text{ Ohm}$

Da jede Spule zum Blindwiderstand auch einen Wirkwiderstand enthält der um 90° verschoben ist, können die Werte nur geometrisch erfolgen. Diesen Wert nennt man:

$$\text{Scheinwiderstand ( Impedanz } \mathbf{Z} ) = \sqrt{R_w^2 + XL^2} \longrightarrow \cos \varphi = \frac{R}{Z}, \text{ (Rw in Ohm)}$$

Wie hoch ist Z und  $\varphi$  einer Spule von L = 200 mH und R = 40 Ohm an 200 kHz oder an 50 Hz?

Z bei 200 kHz = 251000 Ohm und  $\cos \varphi = 0.000159$ , Z bei 50 Hz = 74 Ohm und  $\cos \varphi = 0,54$

Beim Kondensator ist es umgekehrt.

Der kapazitive Blindwiderstand wird umso kleiner, je höher die Frequenz ist.

$$XC = \frac{1}{\omega \times C}, \text{ (Omega } \omega = \text{ Kreisfrequenz } 2 \times \pi \times f )$$

### 5.3.2.4 Wechselstromkreis mit reiner Induktivität.

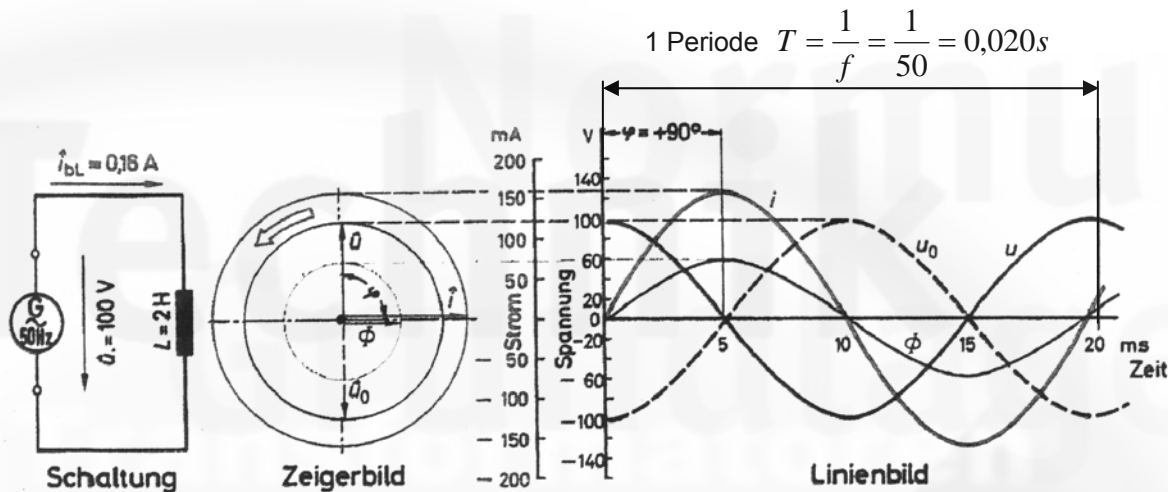


Bild 5.3.2.4.1 Wechselstromkreis mit reiner Induktivität

Der Strom  $I$  erzeugt einen phasengleichen magnetischen Fluss  $\Phi$ . Als Folge der Flussänderung entsteht die Gegenspannung  $U_0$ . Die stärkste Flussänderung ergibt sich jeweils im Nulldurchgang der Flusskurve. In diesem Moment erreicht die Gegenspannung ihren Scheitelwert. Die Gegenspannung wirkt in jedem Zeitpunkt der Netzspannung entgegen. Der Spulenstrom erreicht seinen Scheitelwert jeweils  $\frac{1}{4}$  Periode =  $90^\circ$  später als die angelegte Spannung.

### 5.3.2.5 Einsatz von Drosseln im Wechselstromkreis.

**Wechselstromdrosseln** liegen direkt im Wechselstromkreis und werden für Netzstromkreise oder für tonfrequente Stromkreise in allen Bereichen der Elektrotechnik, Fernmelde- Funktechnik, Elektroakustik und Elektronik eingesetzt. Z.B. auf der Primär- oder Sekundärseite eines Stromrichtertransformators zur Begrenzung der Stromaufnahme und Rückstörungen auf das Netz. Im Primärkreis bestehen bessere Abstimmöglichkeiten mit Anzapfungen, da kleinere Ströme, als im Sekundärkreis. Die Anzapfungen sind einfacher auszuführen.

**Entkopplungsdrosseln** sind Drosseln die in Wechselstromzuleitungen mehrerer voneinander unabhängig arbeitender Stromrichter an einer gemeinsamen Transformatorwicklung oder an einem gemeinsamen Netz betrieben werden.

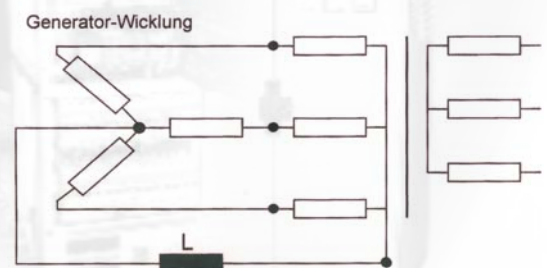
**Erdschlusslöschspulen** sind einphasige Drosselspulen, die in induktiv geerdeten Netzen zwischen Sternpunkt und Erde geschaltet werden. Sie kompensieren die Grundschiwingung des im Erdschlussfall über die Fehlerstelle fließenden kapazitiven Netzstromes.

**Sternpunkt-Erdungsdrosselspulen.** In geerdeten Netzen können die Sternpunkte einzelner Transformatoren über einphasige, niederohmige Sternpunkt-Erdungsdrosseln geerdet werden. Die im Erdschlussfall auftretenden Spannungen und Ströme zw. Sternpunkt und Erde können so begrenzt werden.

**Nullleiterdrosseln** werden eingesetzt zur Eliminierung der 3. oder 5. Oberwelle je nach System.  
z.B.: Gen. 270KVA, 400A, 3 x 400V, 50 Hz. 5.Oberwelle (250 Hz) Nullleiter max. 100A, 13.5V

$$\text{Induktivität der Drossel: } L = \frac{13,5V}{2 \times \pi \times 250\text{Hz} \times 100A}$$

Damit in der Drossel gleiche Verluste entstehen wie bei 50Hz muss für die 250Hz die Induktion herabgesetzt werden, wegen der Erwärmung und Verluste im Kern.



**Kompensationsdrosseln** sind zur Kompensierung der kapazitiven Ladeleistung langer, schwach belasteter Leitungen zur Begrenzung von Überspannungen.

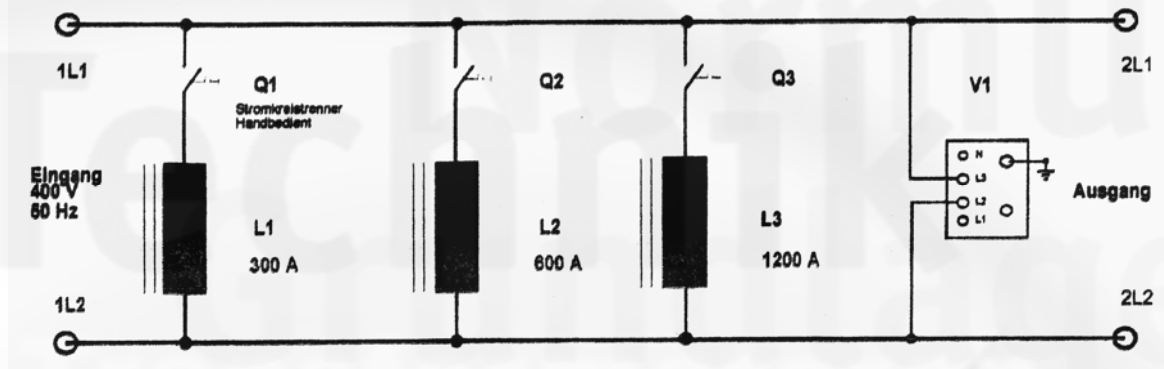
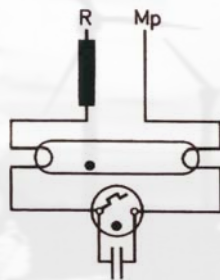


Bild 5.3.2.5.1 KDL 840 Anlage für Kabelmessprüfeinrichtungen.

**Strombegrenzungsdrossel für Leuchtstofflampen.**

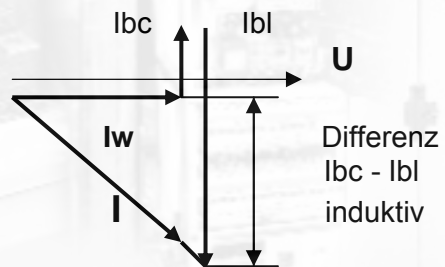
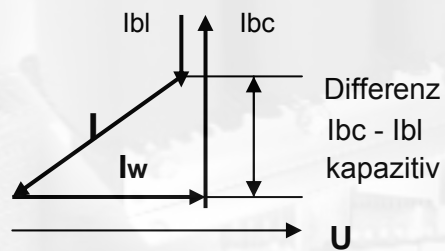
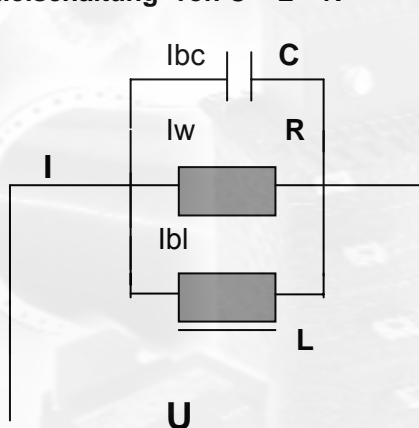
Die hohe Zündspannung für den Start der Lampe wird durch die vorgeschaltete Drossel in Verbindung mit einem sogenannten Zünder oder Starter erzeugt. Wenn die Glimmentladung aufhört, öffnet der Starter. Diese Unterbrechung des Stromkreises hat durch die Selbstinduktion in der Drossel einen Spannungsschoss von etwa 1000V zur Folge. Im Betrieb dient die Drossel zur Strombegrenzung, sodass nur noch eine Brennspannung von ca. 100V an der Lampe liegt.



**Filterdrosseln**

Filterdrosseln werden entweder parallel oder in Serie mit einem Kondensator betrieben. In den Drosseln fließt die Grundwelle und die Oberwelle, die gefiltert oder gesperrt werden soll.

**Parallelschaltung von C – L – R**

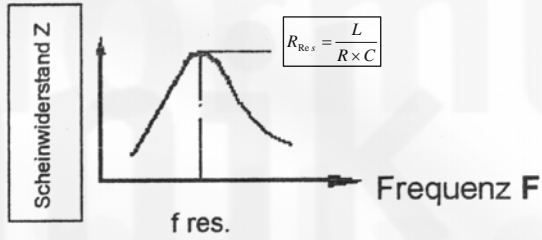


$$I = \sqrt{I_w^2 + (I_{bl} - I_{bc})^2}$$

Ist der Strom in der Induktivität grösser als der Strom in der Kapazität, so wirkt die Schaltung wie ein induktiver Verbraucher.

Sind die Ströme durch die Induktivität und durch die Kapazität gleich gross, tritt der **kleinste** Strom in der Leitung auf. Der Schwingkreis hat den grössten Widerstand. Es entsteht eine Eigenfrequenz. Hat die zugeführte Frequenz die gleiche Grösse, so tritt Resonanz ein.

$$f_{res.} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$



Den Parallelschwingkreis benutzt man, um aus einem Frequenzgemisch eine bestimmte Frequenz, die Resonanzfrequenz herauszusieben.

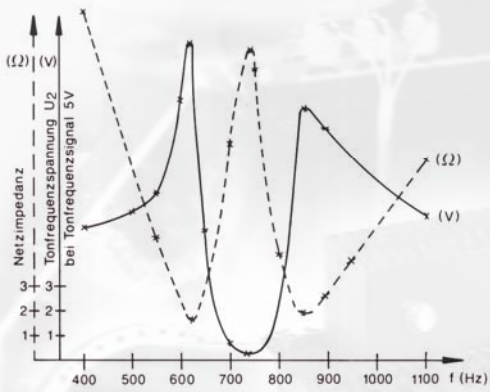
Beispiel:

Zwischen Antenne und Erde liegen alle Frequenzen welche die Antenne empfangen kann. Schaltet man einen Parallelschwingkreis dazwischen, werden alle **Frequenzen ausser der Resonanzfrequenz kurz geschlossen**. Abstimmung auf einen bestimmten Sender.

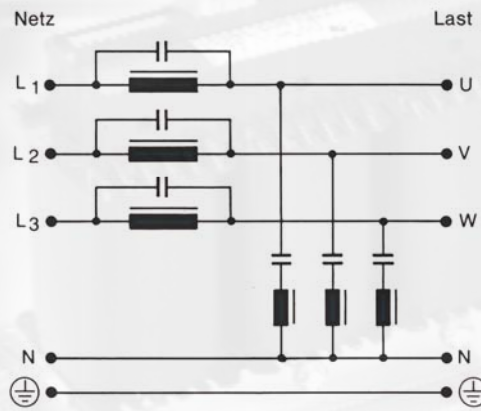
Schaltet man den Parallelschwingkreis in Reihe mit dem Verbraucher, so sperrt er die Resonanzfrequenz, weil bei ihr der hohe Resonanzwiderstand auftritt. In dieser Schaltung nennt man den Parallelschwingkreis auch **Sperrkreis** z.B. zur Dämpfung der Netzkommandosignale.

In Elektrizitätsverteilernetzen werden der Netzspannung Tonfrequenzsignale überlagert, um damit ferngesteuerte Schaltungen vorzunehmen. Diese teilweise störenden Signale verringert ein Filterkreis der auf die genaue Impulsfrequenz abgestimmt ist.

Impedanzkurve 3ph Filterkreis 3 x 400V, 50/60Hz 16A, F=745Hz

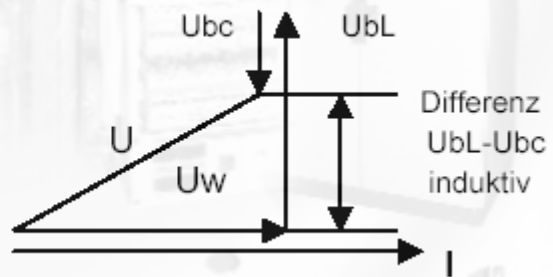
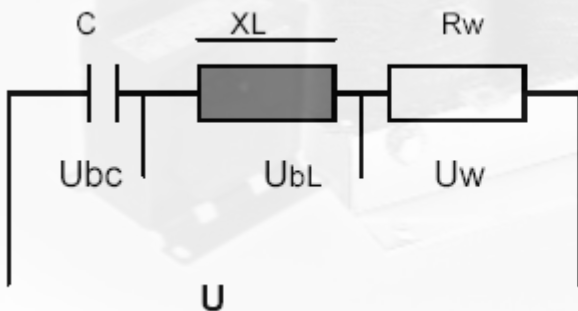


Schaltschema

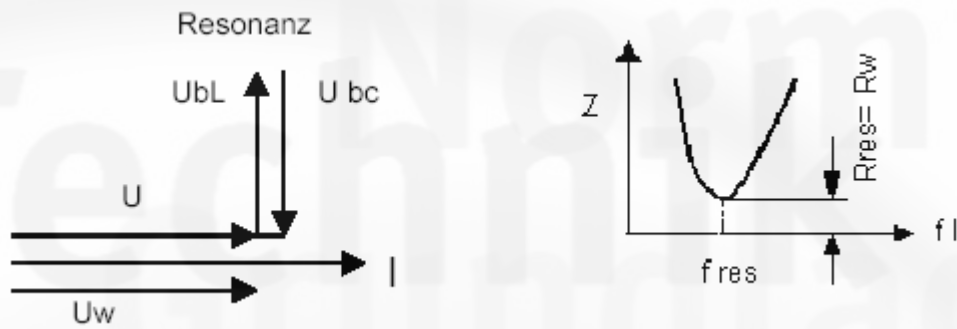


### Reihenschaltung

Reihenschaltung von Wirkwiderstand, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand. Es entstehen entgegengesetzte Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung.



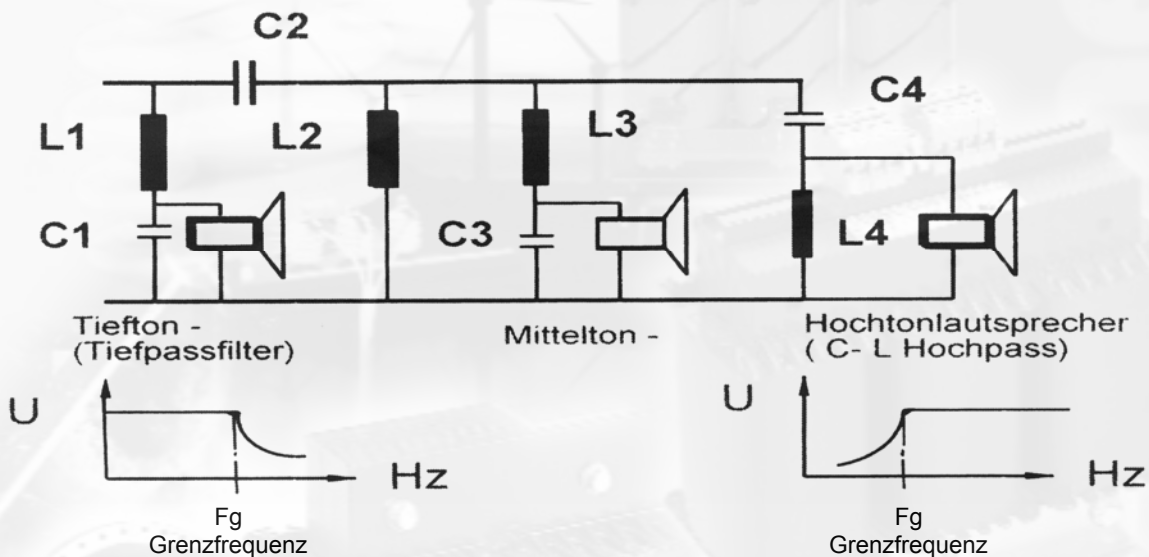
## Reihenschwingkreis



Der Reihenschwingkreis wirkt bei Resonanz nur noch wie ein Wirkwiderstand. Dieser Wirkwiderstand ist der Resonanzwiderstand  $R_{res}$ . Der Reihenschwingkreis hat bei Resonanz seinen kleinsten Widerstand. An Spule und Kondensator tritt Spannungsüberhöhung auf.

Den Reihenschwingkreis benutzt man, um in einem Frequenzgemisch die Resonanzfrequenz zu unterdrücken. Schaltet man ihn an einen Wechselspannungserzeuger, der ein Frequenzgemisch erzeugt, so schliesst er seine Resonanzfrequenz kurz. Man nennt den Reihenschwingkreis in dieser Schaltung auch Saugkreis.

Beispiel einer 3 Weg Frequenzweiche.



Alle Frequenzen kleiner als  $F_g$  werden durchgelassen.

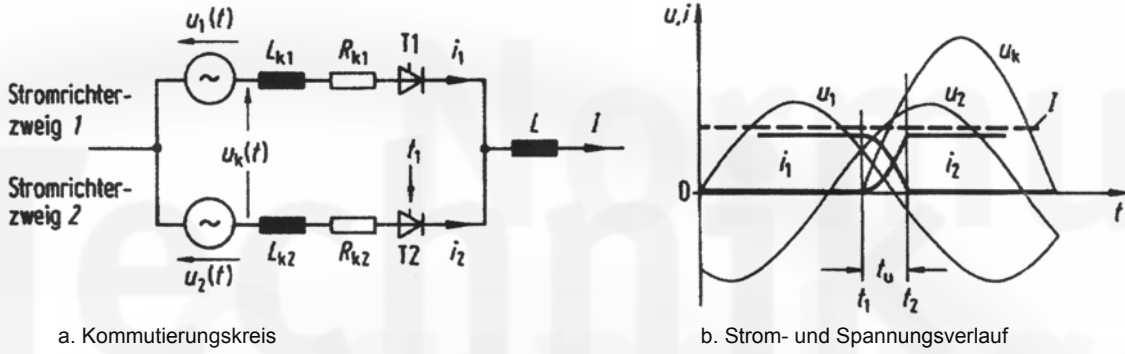
Alle Frequenzen grösser als  $F_g$  werden durchgelassen.

Dank der Spule  $L1$  werden die tiefen Frequenzen zum Tiefton-Lautsprecher geleitet. Die hohen und mittleren Frequenzen gehen über  $C2$  zu den andern Lautsprechern.  $C2$  ist ein Hindernis für tiefe Frequenzen bis ca. 4000 Hz.  $L1$  ist ein Hindernis für hohe Frequenzen.  $L2$  leitet die durchgegangenen tiefen Frequenzen nach unten ab, bzw. werden kurzgeschlossen.  $C1$ ,  $C3$ ,  $L4$  wirken als Bypass für die durchgegangenen Frequenzen. Durch entspr. Werte der Spulen und Kondensatoren können die Frequenzen selektiv den Lautsprechern zugeführt werden.

## Kommutierungsrosseln

Die Kommutierungsrossel  $L_{k1}$  und  $L_{k2}$  soll den Kurzschlussstrom während der Kommutierung begrenzen. Kommutierung ist der Übergang des Stromes von einem Zweig des Stromrichters in einen anderen, wobei während der Überlappungszeit  $t_u$  beide Zweige Strom führen.

Bild 5.3.2.5.2 Natürliche Kommutierung



Beispiel für WR (Wechselrichter)

Für elektronisch geregelte WR erhält die Kommutierungsdrossel KD eine Mittelanzapfung. Für magnetisch geregelte WR braucht die Drossel 2 getrennte Wicklungen mit entgegengesetztem Wickelsinn.

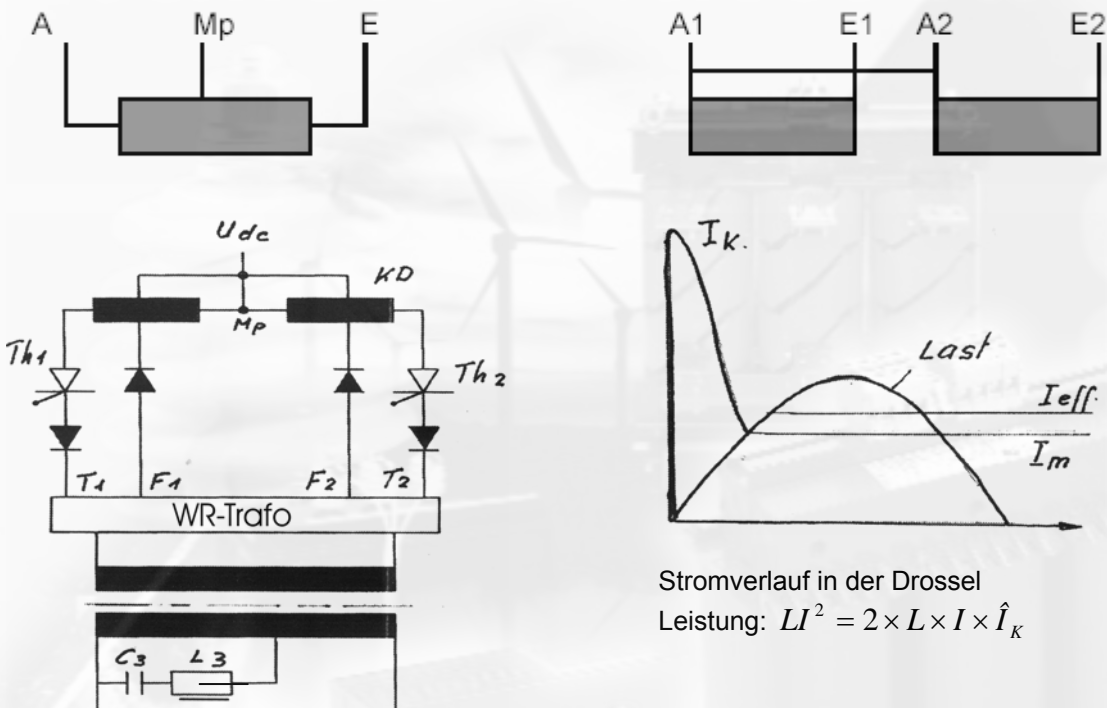


Bild 5.3.2.5.3 Kommutierungsdrossel im WR - Stromkreis mit Spannungskonstanthalter.

5.3.2.6 Formel für die Berechnung von Induktivität L, Strom I und Spannung U

$$L = \frac{U}{2 \times \pi \times f \times I} \text{ in Henry, } I = \frac{U}{2 \times \pi \times f \times L} \text{ in Amper, } U = L \times I \times \omega \text{ in Volt}$$

Die Drosselleistung für sinusförmigen Wechselstrom ergibt sich aus:

$$P = 2 \times \pi \times f \times L \times I_{eff} \text{ oder } P = V \times I_{eff} \quad (\hat{I} = \text{Strom im Scheitelwert, Dach oder Spitze})$$

Wenn  $\hat{I}$  größer ist als  $\sqrt{2} \times I_{eff}$ , muss die Drossel entsprechend vergrößert werden.

Da die Drossel nur eine Wicklung hat, nicht zwei wie ein Trafo mit getrennter Primär- und Sekundärwicklung, beträgt die Baugröße nur etwas mehr als die Hälfte vom Trafo. Dies ist abhängig vom Strom und Luftspalt.

### 5.3.3 Drosselspule mit Eisenkern für Gleichstrom.

#### 5.3.3.1 Glättungsdrosseln

Drosselspulen auf der Gleichstromseite des Stromrichters sind Glättungsdrosseln, die im Hauptstromkreis liegen und vom gleichgerichteten Strom durchflossen werden. Der pulsierende Gleichstrom soll geglättet werden.

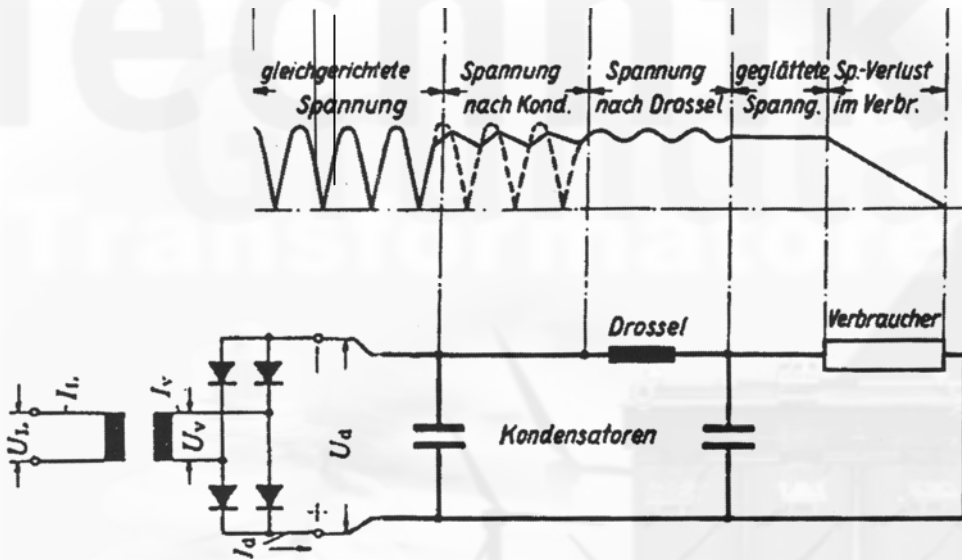


Bild 5.3.3.1.1 Siebkette

Eine Siebkette besteht aus 2 oder 3 quergeschalteten Kondensatoren und 1 oder 2 längsgeschalteten Drosselspulen. Die Drosselspulen stellen den Pulsationen einen grossen induktiven Widerstand entgegen und schwächen sie. Der nicht pulsierende Gleichstromanteil hat nur den geringen ohmschen Widerstand zu überwinden. Die Kondensatoren leiten die Pulsationen wie Wechselströme von der Plus- zur Minusleitung. Sie laden sich ausserdem bei den einzelnen Impulsen auf und geben die Ladung zwischen den Impulsen wieder an die Leitung ab, wodurch die Glättung unterstützt wird.

Für ganz kleine Leistungen können anstelle der Drosselspulen ohmsche Widerstände verwendet werden.

Stromrichter erzeugen durch die nicht linearen Schaltfunktionen der Stromrichterventile Oberschwingungen in der Spannung und im Strom sowohl auf der Wechsel- bzw. Drehstromseite als auch auf der Gleichstromseite. Bei Anschnittsteuerungen sind die Oberschwingungen noch grösser. Die Pulszahl der Stromrichterschaltung bestimmt die Ordnungszahl der auftretenden Oberschwingungen. Die Grösse der auftretenden Oberschwingungen hängt dann nur noch von der Ordnungszahl ab.

Bei der Pulszahl 6 und Vollaussteuerung und idealer Glättung treten folgende Oberschwingungen auf:

Oberwelle	5.	7.	11.	13.	17.	19.	23.
Strom in %	20	14,29	9,09	7,69	5,88	5,26	4,35

Je nach Steuerwinkel und Gleichstromwelligkeit werden die Oberschwingungen beeinflusst. Für die Berechnung der Drossel müssen diese Oberwellen miteingerechnet werden.

Für die Herstellung von Drosseln ist die Berücksichtigung der Pulszahl - die Frequenz - wichtig.

Siehe Tabelle:

Bei Netzspannung 50 Hz		Pulszahl	Frequenz
1 Ph.	Brückenschaltung	2	100 Hz in der Drossel,
3 Ph.	Sternschaltung und halbgesteuert	3	150 Hz erste Harmonische
3 Ph.	Brücken- oder Doppelsternschaltung, vollgesteuerte Schaltungen ( 6 Thyristoren)	6	300 Hz

Je nach Schaltung beträgt die Welligkeit des Gleichstromes 1,21-1,03 % was auf die Glättung und die Drosselgrösse Einfluss hat.

Die Bauleistung von Glättungsdrosseln steigt linear mit der Induktivität und quadratisch mit dem Gleichstrom im Arbeitspunkt an. Gleichstromdrosseln haben wegen ihrer Gleichstromvormagnetisierung eine stark stromabhängige Induktivität. Die Kurzschlussinduktivität ist wegen der Sättigung des Eisenkerns viel kleiner als die Nenninduktivität.

Drosseln mit Eisenkern für höhere Frequenzen und Stromsteilheiten müssen wegen der Wirbelströme mit dünnen Ring- oder Schnittbandkernen gebaut und durch mehrere Luftspalten im Eisen unterteilt werden.

Beispiel 1:

Glättungsdrossel zu 1Ph. Brückengleichrichter  $L = 3\text{mH}$   $I_{GL} = 30\text{ A}$   $\hat{I} = 47,6\text{ A}$

$$I_{O_{eff.}} = \frac{\hat{I} - I_{GL}}{\sqrt{2}} = \frac{47,6 - 30}{1,41} = 12,4\text{ A} \text{ bei } 100\text{Hz}, I_{eff.} = \sqrt{30^2 + 12,4^2} = 32,5\text{ A}$$

Bauleistung Drosseltyp  $LI^2 = L \times I_{eff.} \times \hat{I} : 1000 = 3 \times 32,5 \times 47,6 : 1000 = 4,6$

Für  $LI^2 = 4,6$  ergibt sich eine Baugröße von EI 150/49,6 Blech 0.5 mit  $24\text{ cm}^2$  Eisenquerschnitt.

$$\sqrt{\frac{L \times 10^5 \times \delta}{1,25 \times Q_{Fe}}} = \sqrt{\frac{3\text{mH} \times 10^5 \times 0,4\text{cm}}{1,25 \times 24}} = 63\text{Wdg}, (\delta = \text{delta} - \text{Luftspalt})$$

Nachdem die Drossel prov. zusammengestellt ist, muss sie eingestellt werden. Die  $3\text{mH}$  ergeben eine Spannung bei einem Strom von ca. 80 % von 25 A

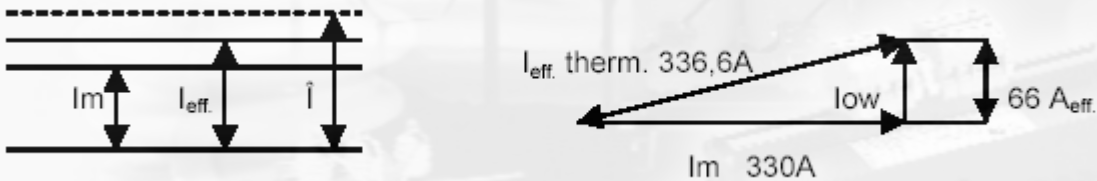
$$U = L \times I \times 0,314 = 3 \times 25 \times 0,314 = 23,6\text{ V}$$

Auf die Drosselspule wird nun 23,6 V eingespeist und die Luftspaltdicke angepasst, bis die 25 A +/- 5% erreicht sind. Für Wechselstromdrosseln sollte die Differenz höchstens 2% betragen.

Beispiel 2:

Gleichstromdrossel für Gleichrichter 6 pulsrig ( $F = 300\text{ Hz}$ )  $L = 0,34\text{ mH}$   $I_m = 330\text{ A}$   $I_{eff.} = 336,5\text{ A}$ . Oberwellengehalt low. = 20% Ripple.

$$\text{low } 20\% \times 330\text{ A} = 66\text{ A} \times 1,41 = \hat{I}_{low} = 93\text{ A} \quad \hat{I} = I_m + \hat{I}_{low} = 330 + 93 = 423\text{ A}$$



$$\text{Typenleistung } LI^2 = L \times I_{eff.} \times \hat{I} : 1000 = 0,34 \times 336,5 \times 423 : 1000 = 48,4 \text{ das ergibt eine}$$

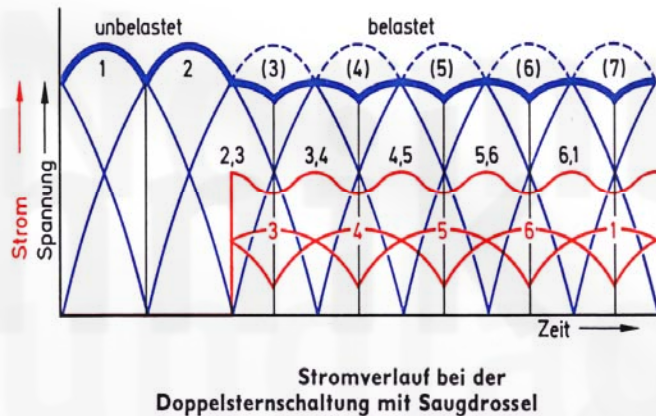
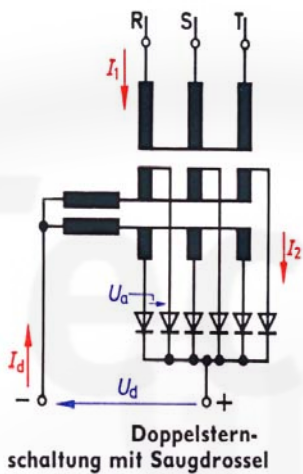
Baugröße von UI 180/78 in Isol. Klasse F, kornorientiertes Blech und sechs Luftspalten.

Da der Strom gross ist wird die Wicklung parallel auf zwei Säulen geschaltet. Dadurch halbiert sich der Strom in der Wicklung. Jede Säule erhält dann 28 Windungen. Das hat einen Vorteil für die Verarbeitung und kleinere Kupferverluste.

Für den Anwender können die Angaben der Verluste und der Linearität wichtig sein. Für diese Drossel wären die Verluste  $V_{cu}$  ca. 170 W  $V_{Fe}$  ca. 50 Watt. Die Drossel arbeitet beim Spitzenstrom immer noch linear bei 1,2 Tesla.

### 5.3.3.2 Saugdrosseln

Saugdrosseln sind magnetisch miteinander verkettete Glättungsdrosseln. Ihre Wicklungen werden von den gleichgerichteten Strömen parallel geschalteter Phasen, oder versetzter Kommutierungsgruppen durchflossen. Bei Saugdrosseln hebt sich die Vormagnetisierung bei symmetrischer Belastung der parallel geschalteten phasenversetzten Kommutierungsgruppen auf. Die Bauleistung wird daher geringer als bei Glättungsdrosseln. Der Luftspalt fällt weg oder wird ganz klein. Saugdrosseln müssen die Spannungsdifferenz gleichzeitig arbeitender Phasen aufnehmen. An ihnen liegt eine nichtsinusförmige Wechselspannung doppelter, dreifacher oder sechsfacher Netzfrequenz je nach Schaltung. Der Magnetisierungsstrom der Saugdrossel überlagert sich dem Gleichstrom.



Bei grösserer Belastung erzeugt der zurückfliessende Gleichstrom in der Drossel einen kräftigen Magnetismus. Beim Übergang der Belastung von einem Strang auf den andern ändert sich in der Drossel die Richtung des Magnetfeldes. Die Drossel versucht den Zustand beizubehalten, sie bremst also den Übergang auf den neuen Strang und saugt aus dem vorhergehenden Strang noch Strom ab. Dadurch erzwingt diese Saugdrossel die Arbeit von jeweils 2 Strängen. Die Bauleistung des Transformators ist ca. 1,3 mal so gross wie die Gleichstromleistung.

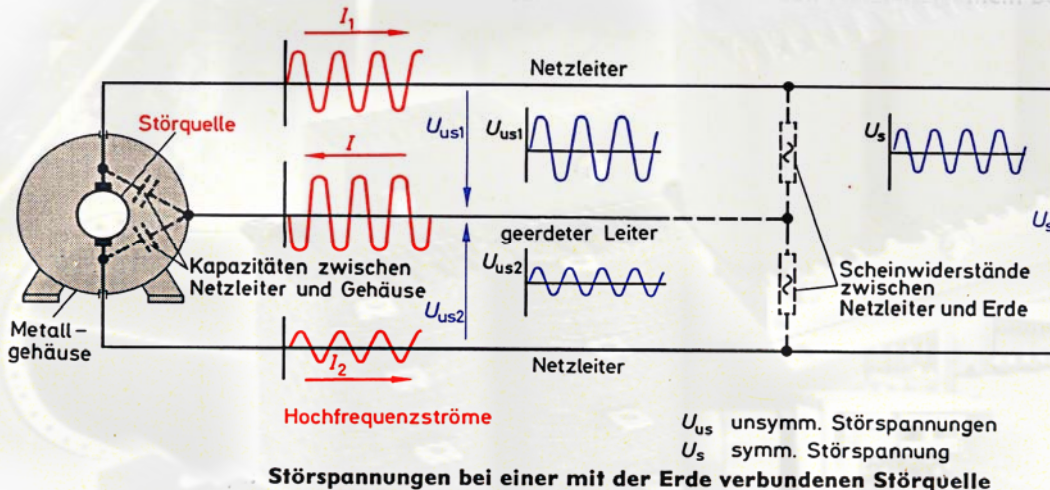
### 5.3.4 Entstördrosseln

Funktentstördrosseln werden verwendet für elektrische Handwerkzeuge und Haushaltmaschinen mit Kollektormotoren.

Verwendet werden hierbei:

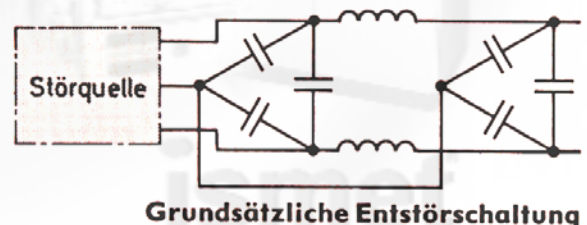
Ringkern- Stab- Stromkompensierte Drosseln für Schaltnetzteile. HF-Drosseln für die Industrie und Unterhaltungselektronik in der Ausführung als Ringkerne, E – I – U oder Schalenkerne aus Ferrit und zum Teil mit HF-Litzen wegen den hohen Frequenzen. Entstördrosseln für Thyristoren, Breitbanddrosseln zur Unterdrückung von Strahlungen bei Rundfunk, Fernsehgeräten sowie für Zündanlagen. Perlendrosseln zur Unterdrückung von unerwünschten HF-Schwingungen und Rückkopplungseffekten.

Ringkern-drosseln verursachen weniger Störungen und haben eine bessere Ausnutzung durch das homogene Feld, bedingen jedoch eine spezielle Wickeltechnik.



Der Motor wirkt als Funkstörquelle. Die in ihr entstehenden hochfrequenten Ströme rufen in der Leitung und im Motor hochfrequente Spannungsabfälle hervor. Funkstörspannungen gelangen über das Netz und durch Strahlung in die Empfangsanlagen von Radio und Fernsehen. Sie werden durch Stromwendermotoren, Schleifringmotoren, Schalter, Temperaturregler oder Zündkerzen etc. hervorgerufen.

Eine Funkentstörung ist auch mit Drosseln möglich, die in Reihe mit der Störquelle geschaltet werden. Sie lassen den hochfrequenten Störstrom nicht ins Netz. Da Drosseln teurer sind als Widerstände, werden sie nur bei schwierigen und grösseren Entstörungsaufgaben eingesetzt.



## 6 Transduktoren

### 6.1 Wirkungsweise

Die Wirkungsweise von Transduktoren oder magnetischen Verstärkern (Magnetverstärker) beruht auf der Ausnutzung der magnetischen Kennlinie von ferromagnetischen Werkstoffen, insbesondere derer, die eine ausgeprägte Sättigung aufweisen. Dieses nichtlineare Verhalten ist in Form der Hystereseschleife allgemein bekannt und zeigt, dass selbst bei erheblicher Steigerung der Feldstärke ein bestimmter Sättigungswert kaum zu überschreiten ist. Hauptbestandteil eines Transduktor ist ein bewickelter Eisenkern, der in sich geschlossen ist, um die magnetische Sättigung möglichst wenig durch Luftspalteinflüsse zu schwächen. Somit stellt ein solcher Transduktor einen induktiven Widerstand dar, dessen Größe von den magnetischen Eigenschaften sowie der konstruktiven Ausführung des Kernes abhängt. Da der Transduktor in seinem prinzipiellen Aufbau dem eines Transformators gleicht, wird bei der Herstellung von Transduktoren auf die langjährigen Erfahrungen des Transformatorbaues zurückgegriffen, so dass sich das Transduktor-Bauteil durch seine Robustheit bei praktisch unbegrenzter Lebensdauer auszeichnet. Wird nun eine Transduktordrossel in Reihe mit einem Verbraucher an die Netzspannung angeschlossen, so kann mit einem Gleichstrom kleiner Leistung die Leistung am Verbraucher stufenlos verändert werden. Die Ausgangsspannung am Transduktor kann eine Wechselspannung oder unter Nachschaltung eines Gleichrichters eine Gleichspannung sein.

Auf Grund der verschiedenen Schaltungsarten von Transduktoren, sowie des gewünschten Transduktorausganges, sind diese in den meisten Anwendungsfällen mit Trockengleichrichtern ausgerüstet. Die verschiedenen Schaltungsarten werden im nachfolgenden Text kurz erläutert.

### 6.2 Anwendungen

Die Anwendung der Transduktoren in Steuer- und Regelkreisen ist praktisch unbeschränkt, wobei ihr Einsatz überall dort besonders gerechtfertigt ist, wo unbegrenzte Lebensdauer, Wartungsfreiheit, sofortige Betriebsbereitschaft sowie Lage- und Erschütterungsunempfindlichkeit Voraussetzung für das einwandfreie Arbeiten einer Anlage ist.

Sie werden unter anderem als Endverstärker, Zwischenverstärker, Vorverstärker, Messwertverstärker sowie als Regelverstärker mit PID-Verhalten für die verschiedensten Steuerungs- und Regelungsprobleme wie z. B. die Regelung bzw. Steuerung von Spannung, Strom, Leistung, Drehzahl, Temperatur usw. herangezogen.

Zu den typischen Anwendungen gehören alle jene Fälle, die das typische Verhalten des stromsteuernden Transduktors ausnützen. Hier ist vor allem die Konstanzhaltung von Strömen für Heiz- oder Lichtbogenlampen zu erwähnen oder auch die Helligkeitssteuerung von Leuchtröhren. Der Transduktor kann auch als Kurzschlussstrombegrenzung eingesetzt werden, wie dies z. B. bei der Stromversorgung von Senderöhren oder Hochspannungsfiltern der Fall ist.

### 6.3 Aufbau

Jeder Transduktor besteht aus zwei magnetisch getrennten Transduktordrosseln (Einzeldrosseln). Auf jeder Drossel befindet sich eine Arbeitswicklung, die für die halbe Transduktorleistung ausgelegt ist und entweder Wechsel- oder Halbwellenstrom führt.

Der Aufbau einer Transduktor-Einzeldrossel wird in Bild 6.3.1 dargestellt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die von der Lastwicklung in den Steuerwicklungen induzierten Spannungen durch gegensinnige Zusammenschaltung der Steuerwicklungen aufgehoben werden.

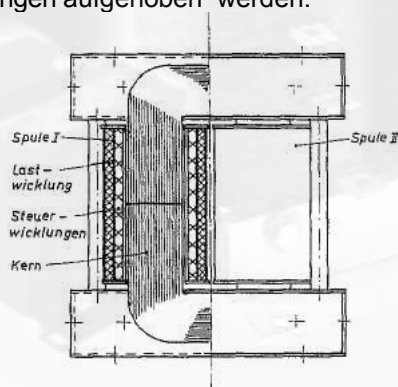


Bild 6.3.1 Kern- und Wicklungsaufbau einer Transduktor-Einzeldrossel

Bei positivem Potential an den Steuerwicklungen öffnet der Transduktor, und umgekehrt ist er gesperrt.

Vorgenanntes trifft jedoch nur für sämtliche spannungssteuernden Transduktoren zu, da die stromsteuernden Transduktoren eine richtungsunabhängige Aussteuerung besitzen.

Näheres ist unter Spannungs- und Stromsteuernde Transduktoren ausgeführt.

Bei den übrigen Transduktor-Typen (spannungssteuernd), die aus ebenfalls zwei Einzeldrosseln bestehen, wurde der Aufbau so vorgenommen, dass sich die Spannungen in den Steuerwicklungen bereits aufheben.

Die konstruktive Ausführung ist aus Bild 6.3.2 zu ersehen.

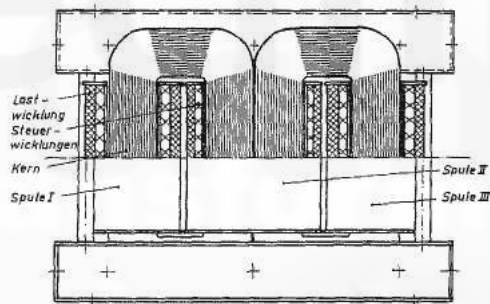


Bild 6.3.2 Kern- und Wicklungsaufbau eines Transduktors, bestehend aus zwei zusammengeführten Kernen

Hierbei sind 2 Kerne konstruktiv so zusammengefügt, dass sich ein Dreischenkelnkern ergibt, bei dem die beiden äußeren Schenkel mit je der halben Lastwicklung und der mittlere Schenkel mit den Steuerwicklungen bewickelt ist. Punkto Aussteuerung gilt dasselbe wie bei den Transduktoren, bestehend aus zwei Einzeldrosseln.

## 6.4 Spannungssteuernde Transduktoren

Spannungssteuernde Transduktoren sind Verstärker, deren Ausgangsspannung sich durch eine leistungsschwächere Eingangsgröße steuern lässt, wobei die Ausgangsgröße im Wesentlichen nur von der Eingangsgröße abhängig ist. Die spannungssteuernden Transduktoren lassen sich auf das Prinzip der Selbstsättigungsschaltung zurückführen, die, wie der Name bereits sagt, sich durch ihren eigenen Ausgangsstrom in Sättigung bringen. Um die Arbeitsweise des spannungssteuernden Transduktor besser zu verstehen, sei zunächst die einphasige Schaltung nach Bild 6.4.1 betrachtet.

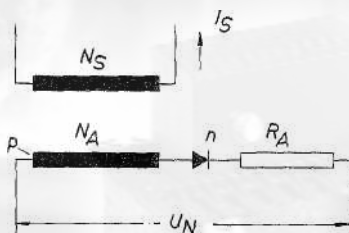


Bild 6.4.1 Einphasiger spannungssteuernder Transduktor

Es ist eine Reihenschaltung der Drossel  $p$  mit der Arbeitswindungszahl  $N_A$ , dem Gleichrichterventil  $n$  sowie dem Ausgangswiderstand  $R_A$ , die an der Wechselspannung  $U_N$  liegt. Die Drossel besitzt noch eine Steuerwicklung mit der Windungszahl  $N_S$ , die vom Steuerstrom  $I_S$  durchflossen wird.

Für die Betrachtung sei eine rechteckförmige Hystereseschleife angenommen (Bild 6.4.2) sowie von folgenden vereinfachten Voraussetzungen ausgegangen.

- Die Arbeits- und Steuerwicklungen seien verlustlos und hätten gleiche Windungszahlen.
- Der Gleichrichterwiderstand sei in Sperrrichtung unendlich groß und in Durchlassrichtung null.
- Die Drossel ist so ausgelegt, dass von ihr die Halbwelle der Wechselspannung gesperrt werden kann.
- In der Steuerwicklung fließt kein Strom.

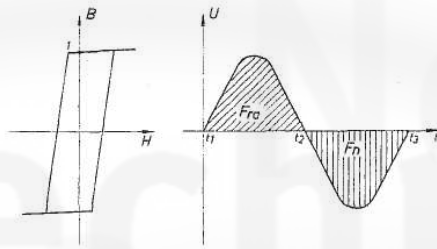


Bild 6.4.2

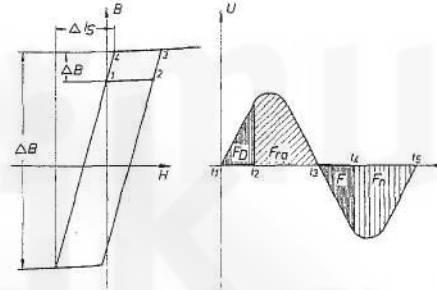


Bild 6.4.3

Wenn man nun annimmt, dass sich im Zeitpunkt  $t_1$  die Drossel in Sättigung Punkt 1 befindet, so kann einer positiven Halbwelle kein Widerstand entgegengesetzt werden, so dass der Strom nur vom Widerstand  $R_a$  begrenzt wird. Dieser Strom treibt die Drossel noch mehr in Sättigung, so dass sie keine Spannung aufnehmen kann und diese somit als Fläche  $F_{ra}$  am Widerstand abfällt.

Im Zeitpunkt  $t_2$  ist der Strom und die Spannung gerade Null und die Drossel befindet sich wieder im Punkt 1. Die negative Halbwelle wird vom Gleichrichter  $n$  als Fläche  $F_n$  aufgenommen und verhindert eine Stromumkehr.

Die Spannung am Widerstand  $R_a$  ist gleich Null. Vom Zeitpunkt  $t_3$  an wiederholt sich der Vorgang.

Fließt in der Steuerwicklung ein Strom  $I_s$ , so bewirkt dieser eine Verschiebung des Koordinatenkreuzes in horizontaler Richtung.

Fließt z.B. ein Steuerstrom so durch die Steuerwicklung, dass die selbstsättigende Wirkung des Gleichrichters  $n$  unterstützt wird, so entspricht dies einer Verschiebung des Achsenkreuzes nach rechts, d.h. die Drossel kommt dadurch noch mehr in Sättigung.

Bei entgegengesetzter Steuerstromrichtung verschiebt sich das Achsenkreuz nach links, so dass sich nach Bild 5 ein Schnittpunkt zwischen der Abszisse und dem linken Ast der Hystereseschleife Punkt 1 ergibt. Befindet sich also die Drossel im Punkt 1, so ist sie im ungesättigten Teil, so dass die positive Halbwelle nunmehr keinen so großen Strom hervorrufen kann.

Im ersten Moment erscheint die fast volle Spannung an der Drossel und bewirkt eine Aufmagnetisierung dieser über Punkt 2 nach Punkt 3 hin. Im Zeitpunkt  $t_2$  ist die Drossel in Sättigung Punkt 3 und kann somit keine Spannung mehr übernehmen, so dass der Rest der Halbwelle, die Fläche  $F_{ra}$  am Widerstand  $R_a$  abfällt.

Vom Zeitpunkt  $t_1$ - $t_2$ , also der Aufmagnetisierung, kann die Drossel entsprechend der Induktionsänderung  $\Delta B$  eine Spannung aufnehmen entsprechend der Fläche  $F_D$  und es fließt nur ein kleiner Magnetisierungsstrom, der am Widerstand  $R_a$  nur einen kleinen Spannungsabfall hervorruft.

Im Zeitpunkt  $t_3$  ist der Punkt 4 erreicht und es beginnt die Abmagnetisierung, hervorgerufen durch die negativ anliegende Halbwelle, und zwar so weit, bis Punkt 1 erreicht ist.

Für die Rückmagnetisierung wird eine Spannungszeitfläche  $F$  benötigt, die der Fläche  $F_D$ , also der Aufmagnetisierungszeitfläche entspricht. Die Rückmagnetisierung ist im Zeitpunkt  $t_4$  beendet, und ab da übernimmt wieder der Gleichrichter die Spannung Fläche  $F_n$ .

Im Zeitpunkt  $t_5$  wiederholt sich der Vorgang. Bei noch größeren Steuerströmen wird der Punkt 1 so weit auf der Hystereseschleife nach unten verschoben, bis die Drossel in der Lage ist, die gesamte Spannungszeitfläche aufzunehmen. Am Widerstand  $R_a$  stellt sich ein Spannungsminimum ein. Somit ist es möglich, die Spannung am Widerstand mit Hilfe eines Steuerstromes zwischen einem Minimum und Maximum einzustellen.

Der Steuerstrom liegt in der Größenordnung des Magnetisierungsstromes der Arbeitswicklung entsprechend Bild 6.5.3  $\Delta I_s$ . Man sieht daraus, dass der Steuerstrom umso kleiner wird, je steiler die Hysteresekurve, d.h. je besser die Blechqualität ist.

In der Praxis jedoch erreicht man keine vollständige Sättigung mit dem Gleichrichter  $n$ , da in Sperrichtung Sperrströme fließen, die bereits einen Einfluss auf die Selbstsättigung haben. Hinzu kommt, dass die Eisenbleche keine rechteckige, sondern gekrümmte Magnetisierungskurve aufweisen.

Außerdem bewirken die vorhandenen Blind- und Wirkwiderstände der Drossel sowie der Innenwiderstand des Gleichrichters einen merklichen Abfall der Ausgangsspannung.

Wird das Achsenkreuz durch einen noch größeren Strom  $J_s$  nach links verschoben, dann steigt die Spannung linear wieder an, wobei der Anstieg sehr flach ist, da der Verstärker in diesem Bereich stromsteuernde Eigenschaften aufweist, d.h. einem bestimmten Steuerstrom ist ein bestimmter Laststrom zugeordnet, unabhängig vom Ausgangswiderstand  $R_a$ , sofern der Regelbereich des Transduktor dies zulässt.

## 6.5 Stromsteuernde Transduktoren

Stromsteuernde Transduktoren haben das Verhalten einer Konstantstromquelle mit sehr hohem Innenwiderstand. Die Verstärkung ist wesentlich geringer als bei den spannungssteuernden Transduktoren, so dass sie vorwiegend als Konstantstromquellen oder als Gleichstromwandler Verwendung finden. Während bei dem Gleichstromwandler die Arbeitswicklungen in Reihe geschaltet sind und der Steuerkreis hochohmig gehalten wird, sind bei den anderen Schaltungen die Arbeitswicklungen parallel geschaltet. Der Vorteil der Parallelschaltung gegenüber der Reihenschaltung der Arbeitswicklungen liegt darin, dass bei dieser die in den Steuerwicklungen induzierten Spannungen bei entsprechender Zusammenschaltung sich gegenseitig aufheben.

Bei den stromsteuernden Transduktoren wird in den meisten Fällen nur eine einzige Steuerwicklung aufgebracht, da sie hauptsächlich als Endstufe eingesetzt werden. Die Aussteuerung erfolgt richtungstunabhängig entsprechend der Steuerkennlinie nach Bild 4.

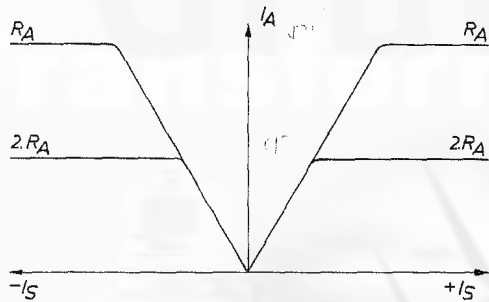


Bild 6.5.1. Steuerkennlinie von stromsteuernden Transduktoren

Eine weitere Schaltungsmöglichkeit ist die des stromsteuernden Transduktors in Sparschaltung nach Bild 6.5.2.

Bei der Sparschaltung entfällt die Steuerwicklung, da die Aussteuerung direkt über die Arbeitswicklung vorgenommen wird. Die Steuerströme bewegen sich demnach in der Größenordnung der Lastströme.

Der durch den Fortfall der Steuerwicklung freie Wickelraum wird durch eine stärkere Arbeitswicklung ersetzt, so dass in der Sparschaltung mit wesentlich größeren Durchgangsleistungen gerechnet werden kann. Dreiphasige Schaltungen sind ebenso möglich.

Die Arbeitsweise der stromsteuernden Transduktoren erlaubt sogar einen Kurzschluss, ohne dass der Strom nennenswert über den durch die Steuerung vorgegebenen Wert ansteigt. Ein zu großer Ausgangswiderstand bringt den Transduktor an die Grenze des Arbeitsbereiches, so dass bei einem bestimmten Strom die Ausgangsspannung nur bis zur Speisespannung abzüglich des Abfalles in den Drosseln ansteigt. Steigt der Widerstand noch mehr, dann sinkt jetzt auch der Strom ab.

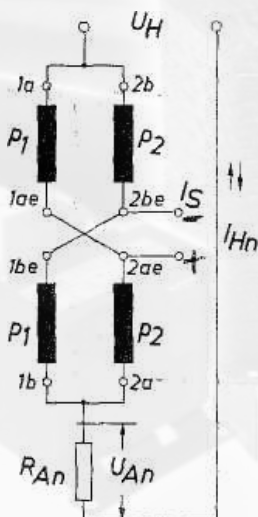


Bild 6.5.2. Stromsteuernder Transduktor einphasig in Sparschaltung

## 7 SINUSFILTER

### 7.1 Einleitung

Auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter sind in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt worden. Heute stehen Leistungstransistoren und abschaltbare Thyristoren zur Verfügung, die als schnelle elektronische Schalter ohne Kommutierungseinrichtung auskommen. Ihr Einsatz ist vorwiegend für Antriebe mit variabler Drehzahl verwendet. Die meist verwendete Variante transformiert zuerst die Wechselspannung in konstante Gleichspannung  $U_{dc}$  die wiederum durch Pulsbreite-modulation in einer Wechselspannung variabler Frequenz und Amplitude transformiert wird.

Die Frequenz der Pulsbreite-modulation (**PBM**) kann einige kHz betragen, gewöhnlich 2-20 kHz.

### 7.2 Die Probleme von Umrichtern mit PBM

Die rechteckigen Spannungsimpulse des Wechselrichters beanspruchen den Motor durch die Steilheit der Spannungsänderung  $dU/dt$ . Damit entstehen die folgenden Probleme:

- Die Isolation ist oft gefährdet und damit die Lebensdauer des Motor.
- Die Oberwellen erzeugen im Eisen HF-Verluste die eine Überhitzung des Motors verursachen. Weil die hochfrequenten Oberwellen die Motorspannung prägen, ist schwierig die Eingangsleistung des Motors zu messen und damit zu regulieren.
- Durch die Erdung des Netzes und des Motorgehäuses, treten überlagerte hochfrequente Stromkomponenten auf, welche die anderen Verbraucher im Netz stören.

Um diese Probleme besser zu erklären ist im Bild 7.2.1 das typische Schema eines Motorantriebes mit PBM.

Das dreiphasige Netz hat im Normalfall einen Nulleiter, der geerdet ist.  $Z_L$  ist die Impedanz der Erdung. Die vollgesteuerte Drehstrombrücke mit Tiefpassfilter erzeugt eine beinahe konstante Gleichspannung  $U_{dc}$

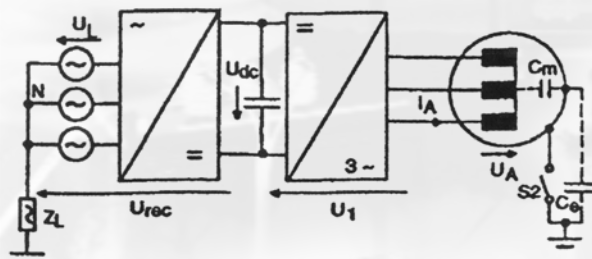


Bild 7.2.1. Schema des Motorantriebes mit PBM

Die Pulsbreite wird kontinuierlich in einem bestimmten Verhältnis so reguliert, dass die Spannung  $U_i$  beinahe einen sinusförmigen Verlauf erfährt. Die Amplitude dieser Spannung ist natürlich von der Form der Modulation abhängig. Sie ist begleitet auch von hochfrequenten Oberwellen:  $f_s + 2xf_i$ ,  $2xf_s \pm f_i, \dots$ . Der Sternpunkt der Motorwicklungen ist im Normalfall schwimmend. Damit werden alle Harmonischen 3-ter Ordnung dazu addiert.

Die Kapazität zwischen den Motorwicklungen und Motorgehäuse  $C_m$  ist, bei den HF-Komponenten der Spannung, nicht zu vernachlässigen. Falls das Motorgehäuse nicht geerdet ist entsteht eine zusätzliche Kapazität:  $C_e$ . Die Brumspannung:  $U_{br} = U_{rec} + U_i - U_A$  erzeugt einen asymmetrischen schwankenden HF-Strom durch die Erdung.

Diese Probleme können weitgehend mittels eines passiven LC-Filters gelöst werden. **3. LC-Filter.**

Das **Bild 7.2.2** zeigt ein typisches Schema eines PBM-Wechselrichters mit einem LC-Filter. Dabei ergeben sich zwei Möglichkeiten, die mit dem Schalter  $S_i$  beschrieben sind. Der Sternpunkt des Filters kann mit dem Minus-Linie des Wechselrichter ( **$S_i$  geschlossen**) verbunden sein, oder schwebend ( **$S_i$  offen**). In beiden Fällen ist die Motorspannung gleich

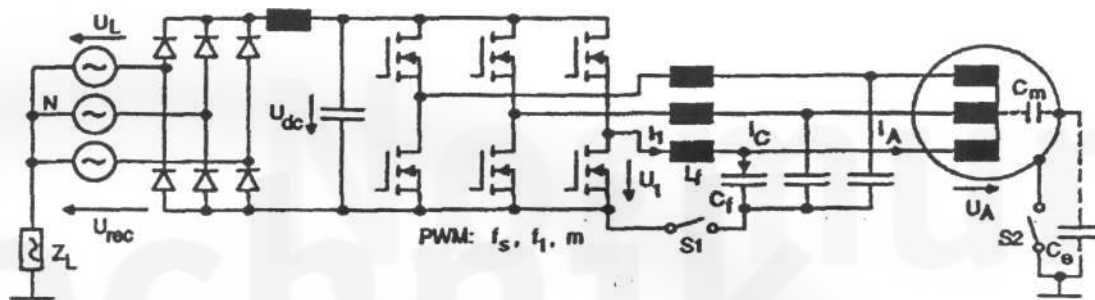


Bild 7.2.2. Vereinfachtes Schema des Motorantriebs mit PBM und Sinusfilter

Die Welligkeit der Motorspannung kann mit der Formel:

$$u_{A\sim} = \sqrt{\left[ \frac{\sum U_{A,i}^2 - U_{A,1}^2}{\sum U_{A,i}^2} \right]} \quad \text{und} \quad U_{A,1} = m \frac{U_{DC}}{2\sqrt{2}} \quad [1]$$

mit:  $\hat{U}_{A,i}$  - die i-ten Harmonischen (RMS) der Spannung  
 $m$  - Modulationsfaktor = 0 ... 1.15

Falls die Pulsfrequenz  $f_s$  viel größer ist als die maximale, vom Wechselrichter gelieferte Frequenz  $f_m$ , dann ist die Welligkeit nur von dem Modulationsfaktor und dem Verhältnis  $f_s / f_0$  abhängig, wobei  $f_0$  die Resonanzfrequenz des Filters ist und mit:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$$

definiert (siehe auch Bild 7.2.3).

Um eine Spannungswelligkeit kleiner als 1% zu erreichen, soll das Verhältnis:  $f_s / f_0 > 8$  sein.

Die Auslegung des LC-Filters erfolgt dann über die Begrenzung des Spannungsabfall über die Drossel auf  $A_{UL}$  bei maximaler Motorfrequenz.

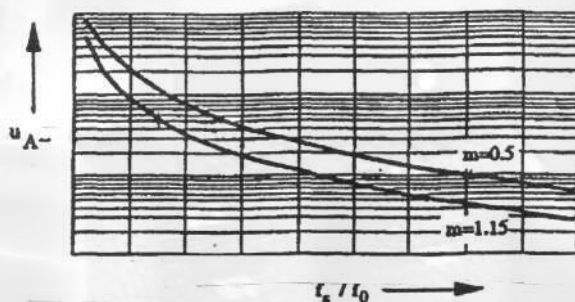


Bild 7.2.3. Resultierende Welligkeit der Spannung abhängig von  $f_s / f_0$

Der Strom besitzt drei Komponenten unterschiedlicher Frequenzen: die Nennfrequenz, die Pulsfrequenz und zusätzlich, vom LC-Filter erzeugter Frequenz 1-ter und 3-ter Ordnung.

Die Pulskomponente des Stromes ist dreieckförmig (Bild 7.2.4) und von Pulszyklus  $a$  der Pulsfrequenz abhängig:

$$\hat{I}_{p\sim} = k \frac{U_{DC}}{2 f_s L_f} a (1 - a)$$

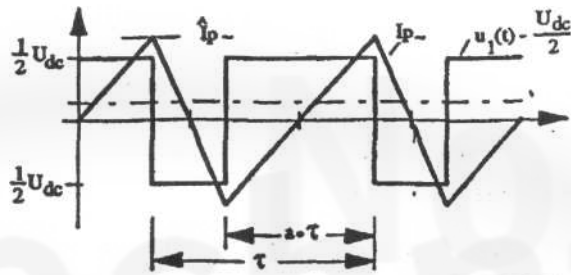
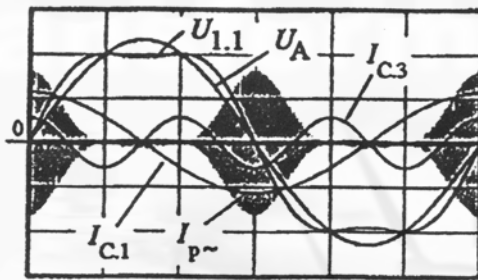


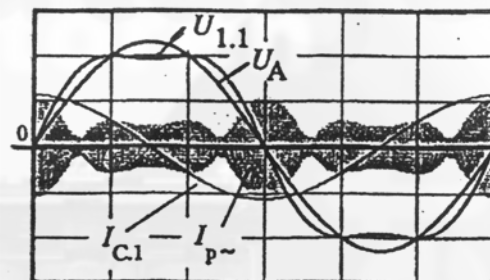
Bild 7.2.4. Der Pulskomponente des Stromes in Sinusfilters

Diese Komponente moduliert über dem Netzfrequenzstrom ergibt, je nach Stellung des Schalter 1 unterschiedliche Formen:

Bild 7.2.5. Der resultierende Strom im Sinusfilter



a. SI geschlossen



b. SI offen

Ein wichtiges Phänomen soll noch erwähnt werden. Die LC-Filter tendieren zu Schwankungen, falls die Eingangsspannung Frequenzteile in der Nähe der Resonanzfrequenz beinhaltet, welche in transiente Operationen auftreten können.

Dieser unangenehme Vorgang kann mittels eines parallelen LCR-Filter sehr gut beseitigt werden. Eine zuverlässige Dämpfung wird garantiert, wenn die Resonanzfrequenz des LCR-Filters der Resonanzfrequenz des Tiefpaßfilters gleicht:

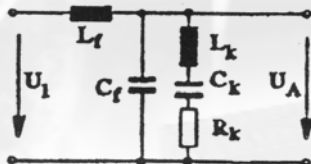


Bild 7.2.7. Sinusfilter mit Dämpfungsfliiter

Die Transferfunktion des gesamten Filter ist:

$$Z_k(\omega, k, r) = \left[ \frac{1}{r\sqrt{(L_f / C_f)} + j\omega L_k k + k / (j\omega C_k)} + j\omega C_f \right]^{-1}$$

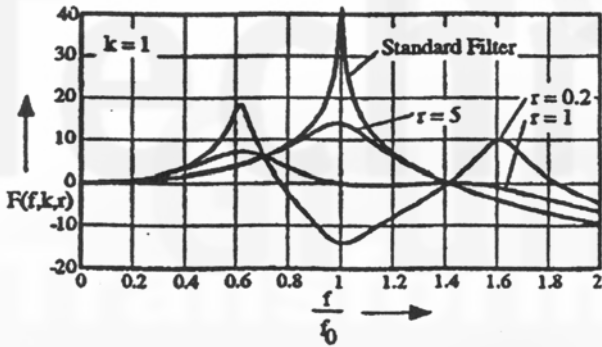
$$Z_f(\omega) = j\omega L_f$$

$$F(\omega, k, r) = 20 \log \left| \frac{Z_k(\omega, k, r)}{Z_f(\omega) + Z_k(\omega, k, r)} \right|$$

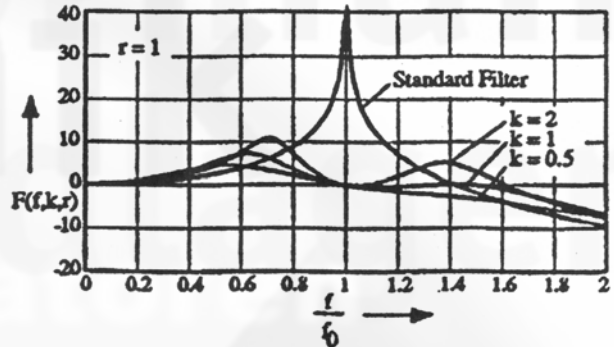
mit  $r = R_k Z_0$  als Dämpfungswiderstand und  $Z_0 = \sqrt{L_f / C_f}$

Die Bilder **Bild 7.2.8a** und **Bild 7.2.8b** zeigen den Verlauf der Transferfunktion für verschiedene Parameter. Es ist zu sehen daß die Dämpfung desto besser ist je kleiner die Amplitude der Transferfunktion ist. Es ist auch zu sehen daß die Dämpfungskennlinie sinkt mit steigendem Wert des Faktors  $k$

Bild 7.2.8. Verlauf der Transferfunktion



a.  $k=1=kt.$  und  $r$  variabel

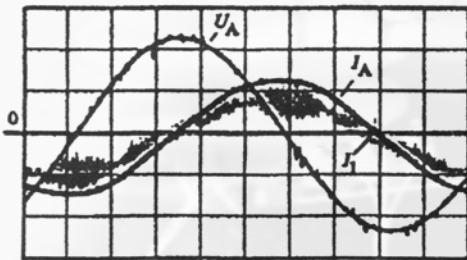


b.  $r=1=kt.$  und  $k$  variabel

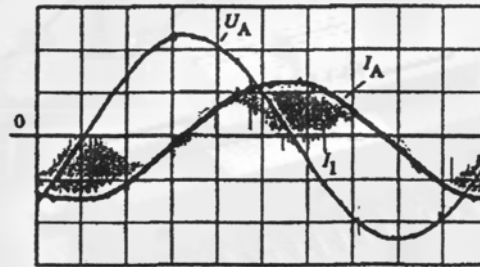
### 7.3 Wirkung

Die Wirkung eines LC-Filters kann man in Bild 7.3.1 und Bild 7.3.2 beobachten.

Bild 7.3.1. Messungen an einem Wechselrichters mit PBM und Sinusfilter

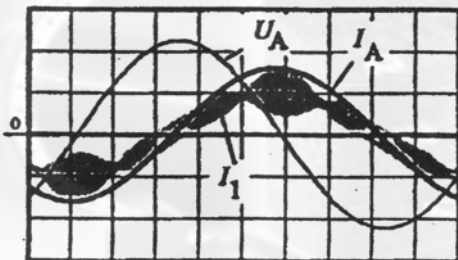


a. mit S1 offen

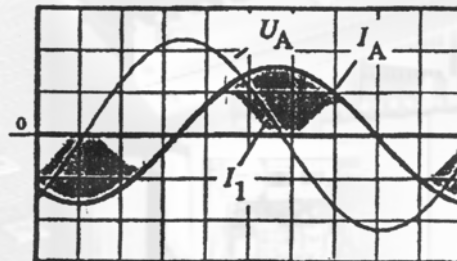


b. mit S1 geschlossen

Bild 7.3.1. Messungen an einem Wechselrichters mit PBM und Sinusfilter



a. mit S1 offen



b. mit S1 geschlossen

## 8 Definition der Schutzarten

**Die Kennzeichnung der IP-Schutzart erfolgt durch 2 Kennziffern.**

Beispiel für die Angabe einer Schutzart:



	Kennziffern	<b>Schutzgrade für Berührungs- und Fremdkörperschutz (Erste Kennziffer)</b>	
		Benennung	Erklärung
	0	Kein Schutz	Kein besonderer Schutz von Personen gegen direktes Berühren aktiver oder bewegter Teile. Kein Schutz des Betriebsmittels gegen Eindringen von festen Fremdkörpern.
	1	Schutz gegen große Fremdkörper	Schutz gegen zufälliges großflächiges Berühren aktiver innerer bewegter Teile, z.B. mit der Hand aber kein Schutz gegen absichtlichen Zugang zu diesen Teilen. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 12 mm.
	2	Schutz gegen mittelgroße Fremdkörper	Schutz gegen Berühren mit den Fingern aktiver oder innerer bewegter Teile. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 12 mm.
	3	Schutz gegen kleine Fremdkörper	Schutz gegen Berühren aktiver oder innerer bewegter Teile mit Werkzeugen, Drähten oder ähnlichem von einer Dicke größer als 2,5 mm. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 2,5 mm.
	4	Schutz gegen kornförmige Fremdkörper	Schutz gegen Berühren aktiver oder innerer bewegter Teile mit Werkzeugen, Drähten oder ähnlichem von einer Dicke größer als 1 mm.
	5	Schutz gegen Staubablagerung	Vollständiger Schutz gegen Berühren unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile. Schutz gegen schädliche Staubablagerungen. Das Eindringen von Staub ist nicht vollkommen verhindert, aber der Staub darf nicht in solchen Mengen eindringen, dass die Arbeitsweise beeinträchtigt wird.
	6	Schutz gegen Staubeintritt	Vollständiger Schutz gegen Berühren unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile. Schutz gegen Eindringen von Staub.
<b>Schutzgrade für Wasserschutz (Zweite Kennziffer)</b>			
	0	Kein Schutz	Kein besonderer Schutz.
	1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser	Wassertropfen, die senkrecht fallen, dürfen keine schädliche Wirkung haben.
	2	Schutz gegen schräg fallendes Tropfwasser	Wassertropfen, die in einem beliebigen Winkel bis 60° zur Senkrechten fallen, dürfen keine schädliche Wirkung haben.
	3	Schutz gegen Sprühwasser	Wasser, das in einem beliebigen Winkel bis 60° zur Senkrechten fällt, darf keine schädliche Wirkung haben.
	4	Schutz gegen Spritzwasser	Wasser, das aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel spritzt, darf keine schädliche Wirkung haben.
	5	Schutz bei Strahlwasser	Ein Wasserstrahl aus einer Düse, der aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel gerichtet wird darf keine schädliche Wirkung haben.
	6	Schutz gegen Überflutung	Wasser darf bei vorübergehender Überflutung, z.B. durch schwere Seen, nicht in schädlicher Menge in das Betriebsmittel eindringen.
	7	Schutz beim Eintauchen	Wasser darf nicht in schädlicher Menge eindringen, wenn das Betriebsmittel unter den festgelegten Druck- und Zeitbedingungen ins Wasser eingetaucht wird.
	8	Schutz beim Untertauchen	Wasser darf nicht in schädlicher Menge eindringen, wenn das Betriebsmittel unter Wasser getaucht wird.

## 9 Normung

### 9.1 Gültigkeitsbereiche:

#### 9.1.1 International

Durch die weltweite Zusammenarbeit der nationalen Normengesellschaften in der International Electrotechnical Commission, IEC, wurden für zahlreiche Produktgruppen Internationale Normen, IEC-Standards, geschaffen, die zunehmend an Bedeutung gewinnen. Zwar sind IEC-Standards in den einzelnen Ländern nicht verbindlich, sie bilden jedoch immer mehr die Grundlage neuer nationaler oder regionaler übernationaler Standards.

#### 9.1.2 Europäisch (EN-Normen)

Im europäischen Rahmen befasst sich CENELEC, das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung, mit der Vereinheitlichung der Normen. Auf der Grundlage der IEC-Standards wurden für die Mitgliedsländer gemeinsame Normen, EN-Normen (= Europäische Normen), vereinbart.

Durch entsprechende Gesetze haben die einzelnen Mitgliedsstaaten diese EN-Normen in nationales Recht übernommen; frühere nationale Normen wurden von den neuen EN-Normen abgelöst. Jedoch bedeuten die EN-Normen noch nicht identische Standards in allen Mitgliedsländern. Für einzelne Länder sehen auch die gemeinsamen EN-Normen in Zukunft gewisse Besonderheiten vor. Eine noch weitergehende Vereinheitlichung scheitert immer noch an historisch bedingten technischen Unterschieden der Einzelstaaten. Beseitigen ließen sich diese Unterschiede nur mit immensen Umstellungskosten. Ein Beispiel hierfür sind die unterschiedlichen Netzsteckersysteme innerhalb der Europäischen Gemeinschaft.

#### 9.1.3 National

Grundsätzlich gilt, dass zum Zeitpunkt des Erscheinens die Gültigkeit der DIN-Normen beginnt. Bei DIN-Normen mit sicherheitstechnischen Festlegungen, also DIN-Normen, die auch in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen wurden (DIN-Normen mit VDE-Klassifikation) darf die Gültigkeit bis zu sechs Monate (bei Europäischen Normen bis zu sieben Jahren) nach dem Erscheinen (Ausgabedatum) festgelegt werden.

Grundsätzlich sind DIN-Normen unverbindlich. Ihre Anwendung ist freiwillig, d.h., sie müssen nicht befolgt werden. Wie zuvor beschrieben, gibt es aber Verknüpfungen zwischen Rechtsnormen und DIN-Normen, die eine Anwendung der DIN-Normen zu Folge haben – also verbindlich vorschreiben. Auch durch Verträge, in denen DIN-Normen herangezogen werden, kann die Anwendung von DIN-Normen verbindlich vorgeschrieben werden.

Das Anwenden von DIN-Normen alleine reicht aber oft nicht aus, um bestimmte Rechtspflichten einzuhalten. DIN-Normen sind für den Regelfall ausgelegt und sind nicht die einzige Erkenntnisquelle für technisch ordnungsgemäßes Verhalten.

## 9.2 Normungsorganisationen

Im Folgenden werden exemplarisch einige wichtige Normungsorganisationen vorgestellt:

### 9.2.1 ISO, IEC – Internationale Organisation für Normung

Die ISO stammt in ihrer heutigen Form aus dem Jahr 1946, hatte jedoch einen Vorläufer in der internationalen Föderation der nationalen Normenvereinigungen (ISA, gegründet im Jahre 1928). Die ISO ist die weltweite Normungsorganisation für die nicht-elektrotechnische Normung mit Sitz in Genf.

Die ISO, in dem das DIN die deutschen Interessen wahrnimmt, erarbeitet weltweite Standards. Die ISO verfügt über Regeln für die Normungsarbeit, die mit der IEC gemeinsam vereinbart wurden. Die ISO arbeitet nach den selben Grundsätzen und Verfahren wie die IEC.

Zur besseren Koordinierung in Grenzfällen ist ein gemeinsamer **Fachplanungs-Ausschuss** von ISO und IEC zur Entscheidung in strittigen Fällen eingerichtet, der erfolgreich arbeitet. Die Regeln werden vereinheitlicht, und das erste gemeinsame Technische Komitee (ISO/IEC/JTC 1 Information Technology) hat seine Arbeit im Jahre 1987 aufgenommen. Die Zweckmäßigkeit der Einsetzung weiterer gemeinsamer Technischer Komitees wird geprüft. Die Eigenständigkeit der beiden Organisationen soll jedoch vorläufig nicht angetastet werden.

Mit den 1991 unterzeichneten Vereinbarungen über die technische Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN (Wiener Vereinbarung) wurde ein intensives Zusammenwirken der beiden Normungsorganisationen beschlossen. Ziel der Vereinbarungen ist eine Verbesserung des Informationsaustausches und der praktischen Zusammenarbeit.

## 9.2.2 VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.



Der VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. wurde 1893 gegründet und ist ein technisch-wissenschaftlicher Verein. Er verfolgt ausschließlich und unmittelbar gemeinnützige Zwecke.

Dem Namen des Verbands sind die Buchstaben VDE vorangestellt. Sie sind Bestandteil des Namens und waren ursprünglich die Kurzbezeichnung des Verbands. Mittlerweile sind die Buchstaben als Verbandszeichen markenrechtlich geschützt (Kollektivmarke).

Diese Buchstaben kennzeichnen die DIN-Normen im Bereich der Elektrotechnik, in denen Sicherheitsfestlegungen enthalten sind. (VDE-Bestimmungen, VDE-Leitlinien und VDE-Vornormen). Diese Buchstaben sind ebenfalls im VDE-Zeichen enthalten. Das VDE-Zeichen (s.o.) dargestellt, zeigt die Sicherheit für elektrotechnische Erzeugnisse an. Es hat weltweite Bedeutung.

Aufgabe des VDE ist es, die auf dem Gebiet der Elektrotechnik oder verwandter Berufszweige tätigen Menschen und Organisationen zusammenzuschließen.

Die Aufgaben des VDE werden in Deutschland von zur Zeit 34 Bezirksvereinen mit 55 angegliederten Zweigstellen in größeren Städten wahrgenommen. Die Bezirksvereine betreuen ihre ordentlichen Mitglieder, Jungmitglieder und korporativen Mitglieder und nehmen fachliche und auch allgemeine, am Ingenieurberuf orientierte Aufgaben wahr. Sie planen und organisieren Veranstaltungen und schaffen den Rahmen für das Anknüpfen von persönlichen Kontakten und den Erfahrungsaustausch zwischen Fachkollegen. Hierbei wird auch besonderer Wert auf den interdisziplinären Erfahrungsaustausch mit dem Umfeld der Elektrotechnik gelegt. Die Bezirksvereine stimmen in der Regel ihre Aktivitäten mit den Fachgesellschaften des VDE ab.

## 9.2.3 CEN

Die nicht-elektrotechnische Normung in Westeuropa ist die Aufgabe des CEN, in dem die nationalen Normungsinstitute der EG- und der EFTA-Länder vertreten sind.

CEN, in dem das DIN die deutschen Interessen wahrnimmt, erarbeitet Europäische Normen. Als gemeinnütziger technisch-wissenschaftlicher Verein mit Sitz in Brüssel verfügt CEN seit 1986 über Regeln für die Normungsarbeit, die mit CENELEC gemeinsam vereinbart wurden.

CEN arbeitet nach den selben Grundsätzen und Verfahren wie CENELEC. Sofern Normungsthemen bearbeitet werden, die CEN und CENELEC betreffen, wird auf Lenkungebenen über die Zuständigkeit bzw. Federführung entschieden.

Alle Mitgliedsländer von CENELEC sind auch Mitgliedsländer von CEN.

## 9.2.4 DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.

Das DIN Deutsche Institut für Normung e.V. ist die zuständige Normungsorganisation für Deutschland. Die Grundlage für diese Zuständigkeit bildet der zwischen dem DIN und der Bundesregierung am 05. Juni 1975 geschlossene Vertrag – der sogenannte „Normenvertrag“ – sowie die am 04. Juli 1990 mit der ehemaligen DDR und dem DIN geschlossene Vereinbarung über die Schaffung einer Normenunion. Entsprechend diesen Grundlagen hat das DIN nach Maßgabe der Grundsätze der Normungsarbeit (siehe DIN 820-1) zu arbeiten.

Das DIN ist ein technisch-wissenschaftlicher Verein mit Sitz in Berlin.

Als die „nationale Normungsorganisation“ vertritt das DIN die deutschen Interessen in den europäischen und internationalen Normungsorganisationen.

Das DIN verfolgt ausschließlich und unmittelbar gemeinnützige Zwecke, indem es durch Gemeinschaftsarbeit der interessierten Kreise Deutsche Normen oder andere Arbeitsergebnisse, zum Nutzen der Allgemeinheit, aufstellt, sie veröffentlicht und ihre Anwendung fördert. Diese Normen und Arbeitsergebnisse dienen im Wesentlichen der Rationalisierung, der Qualitätssicherung, der Sicherheit, dem Umweltschutz und der Verständigung in Wirtschaft, Technik, Wissenschaft, Verwaltung und Öffentlichkeit.

Das DIN bietet die Plattform für jedermann, der ein Interesse an der Normung hat. Dies sind zum Beispiel Hersteller, Handel, Verbraucher, Handwerk, Dienstleistungsunternehmen, Wissenschaft, technische Überwachung und Staat. Ziel ist es, den Stand der Technik zu ermitteln und unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse in **DIN-Normen** niederzuschreiben und damit ins Deutsche Normenwerk aufzunehmen.

**Normung** wird somit als eine Aufgabe verstanden, die in **Selbstverwaltung** der interessierten Kreise unter Einschluss des Staates (als interessierten Kreis) wahrgenommen wird.

Dieser Anspruch hat jedoch seinen Preis. Er muss von den an der Normung interessierten Kreisen durch aktive Beteiligung an der Normungsarbeit (Facharbeit) und durch die Bereitstellung der erforderlichen Geldmittel „erkauff“ werden.

Die Selbstverwaltung wird erreicht, da alle, die aus der Normung einen Nutzen ziehen, sich auch an deren Finanzierung beteiligen. Die Alternative hierzu wäre eine Durchführung der Normungsarbeit durch den Staat mit dem Ergebnis, anstelle von Normen gesetzliche Regelungen zu erhalten.

### 9.2.5 CENELEC



Die elektrotechnische Normung in Westeuropa ist die Aufgabe des CENELEC, in der die nationalen Normungsinstitute der EG- und EFTA-Länder vertreten sind.

CENELEC, in dem Deutschland durch die Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE(DKE) vertreten ist, erarbeitet die Europäischen Normen auf dem Gebiet der Elektrotechnik. CENELEC wurde 1972 gegründet. Seine Vorgänger waren CENEL und CENELCOM. Mit der Gründung von CENELEC wurde die Vereinigung der elektrotechnischen Normung der EG- und EFTA-Länder erreicht. Als gemeinnütziger technisch-wissenschaftlicher Verein mit Sitz in Brüssel, verfügt CENELEC seit 1986 über Regeln für die Normungsarbeit, die mit CEN gemeinsam vereinbart wurden.

CENELEC hat 19 Mitglieder.

Neben den 19 Mitgliedern sind mehrere Normungsinstitute anderer europäischer Länder „angegliedert“ (**affiliates**). Die Einbeziehung von Instituten anderer europäischer Länder soll die nationalen Normungsinstitute der neuen Demokratien in Mittel- und Osteuropa unterstützen und sie enger mit dem europäischen Wirtschaftsraum verbinden. Die angegliederten Normungsinstitute haben kein Stimmrecht, sie haben Beobachterstatus.

### 9.2.6 IEC – Internationale Elektrotechnische Kommission

Die IEC ist eine weltweite Normungsorganisation mit Sitz in Genf. Sie wurde im Jahre 1906 gegründet. Die IEC hat 50 Mitglieder.

Die Mitgliedsländer können im Wesentlichen drei Gruppen zugeordnet werden:

- Gruppe der großen Industrienationen:  
Diese Gruppe von Mitgliedsländern zeichnet sich durch ein gut ausgebautes und umfangreiches Normenwesen aus. Sie besteht aus weniger als zehn Ländern, deren nationale Normenwerke ein solches Ansehen besitzen, dass Industrie und Gewerbe sie nicht nur bei ihren nationalen, sondern auch bei ihren internationalen Geschäften anwenden. Diese Länder arbeiten in fast allen technischen Komitees der IEC mit und leisten damit neben dem größten fachlichen Beitrag auch den größten finanziellen Beitrag.
- Gruppe der kleinen, aber hochindustrialisierten Nationen:  
Diese Gruppe von etwa 25 Mitgliedsländern zeichnet sich dadurch aus, dass ihre nationalen Normen außerhalb ihrer Grenzen nur in geringem Maße angewendet werden. Im Außenhandel kann daher nur in Ausnahmefällen auf solche nationalen Normen verwiesen werden. Diese Länder arbeiten nur an Themen mit, für die sie hochqualifiziert und spezialisiert sind. Sie leisten ihre Beiträge zur internationalen Normungsarbeit gezielt in ausgewählten Bereichen und sind Beobachter in den übrigen.
- Gruppe der noch nicht industriell genügend entwickelten Länder:  
Diese Gruppe ist die größte Gruppe. Sie nutzen die internationale Normung, um das erforderliche Wissen und die notwendigen Erfahrungen zu sammeln, damit sie sich industriell weiter entwickeln können.

Neben den 50 Mitgliedern sind mehrere Normungsinstitute anderer Länder „angegliedert“ (**affiliates**). Die Einbeziehung von Instituten anderer Länder soll die nationalen Normungsinstitute an das „Weltniveau“ heranführen. Die angegliederten Normungsinstitute haben kein Stimmrecht, sie haben Beobachterstatus.

### 9.2.7 CSA – Canadian Standards Association



In Kanada verlangen die Gesetze des Bundes und der einzelnen Provinzen, daß alle in Verkehr gebrachten elektrischen Erzeugnisse die Vorschriften des Canadian Electrical Code erfüllen.

Der SCC (Standards Council of Canada) ist eine öffentlich-rechtliche, regierungsunabhängige Institution zur Koordinierung des kanadischen Normenwesens auf den Gebieten Produktsicherheit, Arbeits- und Verbraucherschutz.

SCC vertritt die kanadischen Interessen bei internationalen Normungsvorhaben, bei ISO (International Organization for Standardization) und IEC (International Electrotechnical Commission).

Alle Organisationen, die sich in Kanada mit der Entwicklung und Anwendung von Normen befassen, benötigen eine Zulassung (Akkreditierung) durch SCC.

SCC führt unterschiedliche Akkreditierungen durch für:

- a) Organisationen, die Standards entwickeln,
- b) Produkt-Zertifizierungs-Institute (CO = Certification Organisation)
- c) Prüf- und Kalibrierungs-Laboratorien (TO = Testing Organisation),
- d) Qualitätssicherungsorganisationen.

## 9.2.8 UL – Underwriters Laboratories, Inc.

UL sind die in den USA auf dem Gebiet elektrische Sicherheit führende Organisation. Über 600 verschiedene Produktstandards decken praktisch das gesamte Spektrum elektrischer und elektronischer Erzeugnisse und Anwendungen ab. UL ist maßgeblich in allen Gremien des National Electrical Code sowie bei der Entwicklung und Harmonisierung internationaler Standards in der IEC beteiligt. Wesentliche Teile von IEC-Standards, insbesondere im Hinblick auf die Brandbeständigkeit von Kunststoffen, gehen auf den Einfluß von UL in den entsprechenden Normenausschüssen zurück.



## 9.2.9 Weitere wichtige Prüfzeichen

	<b>Dänemark</b>		<b>Deutschland Nautical</b>
	<b>Österreich</b>		<b>Italien Nautical</b>
	<b>Norwegen</b>		<b>Norwegen Nautical</b>
	<b>Schweden</b>		<b>VDE-Gutachten</b>
	<b>Finnland</b>		<b>Geprüfte Sicherheit</b>
	<b>Schweiz</b>		<b>USA</b> geprüfte Komponente
	<b>Europa</b>		<b>USA/CAN</b> geprüfte Komponente

## 9.3 Zulassungsverfahren:

### 9.3.1 CCA-Verfahren (CENELEC Certification Agreement)

Mit dem CCA-Verfahren wird vereinbart, dass Prüfergebnisse nach einer harmonisierten Norm von anderen Unterzeichner-Zertifizierungsstellen anerkannt werden. Dies geschieht mit Hilfe einer „Mitteilung von Prüfergebnissen“, die besagt, dass ein bestimmtes dort näher beschriebenes Erzeugnis geprüft und als in Übereinstimmung mit einer harmonisierten Norm befunden worden ist. Weiterhin sagt sie aus, dass diese Mitteilung von einer Stelle ausgestellt worden ist, die am CCA teilnimmt und die diese Prüfergebnisse als Grundlage für die Erteilung eines nationalen Prüfzeichens oder einer nationalen Zulassung verwendet. Das CCA-Verfahren ist im CENELEC zwischen den Mitgliedern geregelt.

Dabei bedeuten: EN: European Norms  
 EC: Electrical Certification  
 10: Identifikations-Nr. der Zertifizierungsstelle



### 9.3.2 Anmerkungen zum CB-Verfahren (Certification Board)

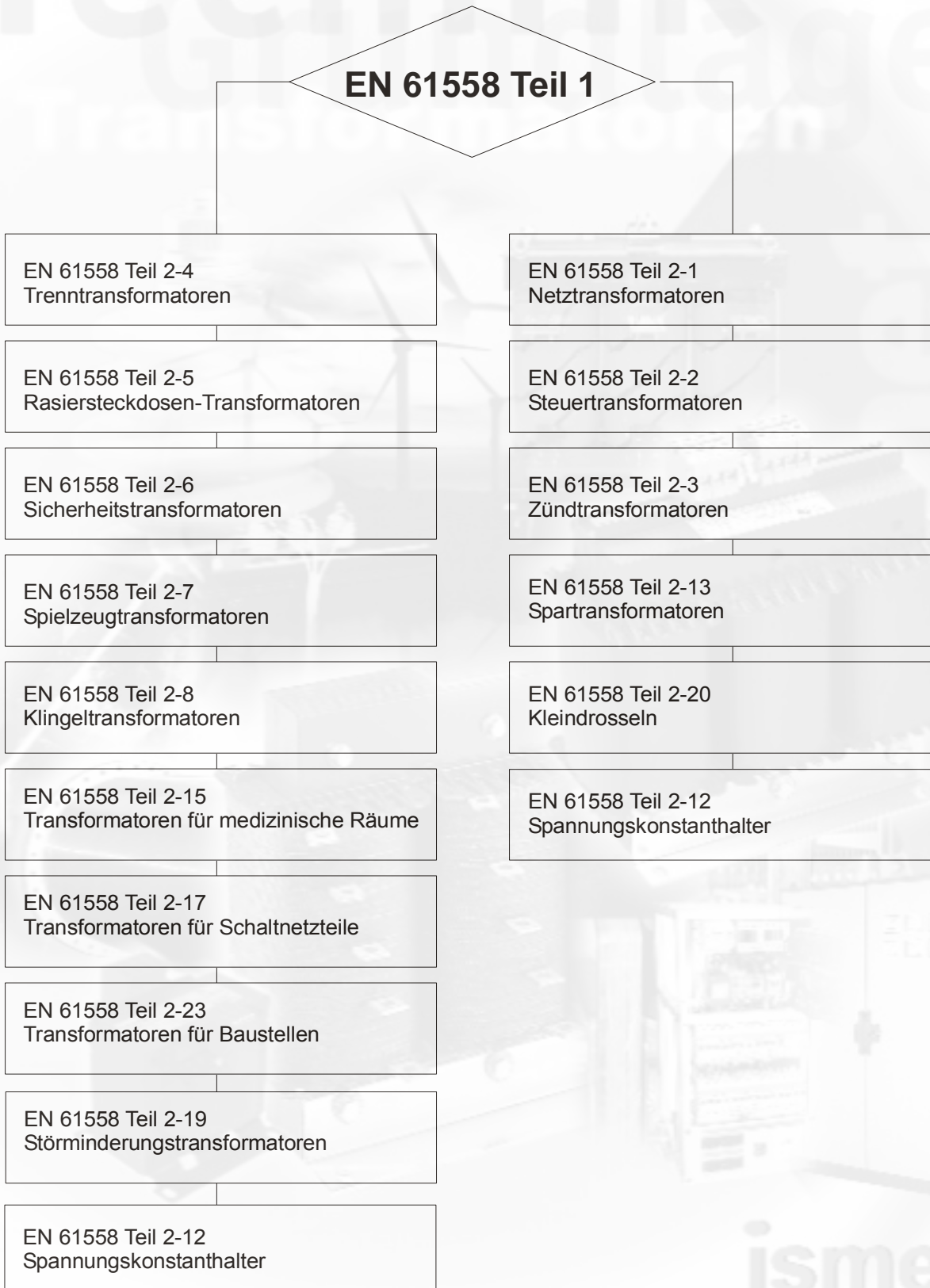
Die praktische Arbeit der Zertifizierung im Rahmen des „IEC-Systems für Konformitätsprüfungen nach Sicherheitsnormen für elektrotechnische Erzeugnisse“ (IECEE) vollzieht sich im sogenannten CB-Verfahren von den anderen CB-Zertifizierungsstellen anerkannt. Grundlage hierfür ist das CB-Prüfzertifikat zusammen mit einem Prüfbericht. Sie dienen als Basis für die Erteilung eines nationalen Prüfzeichens oder einer nationalen Zulassung.

## 9.4 EN 61558 / VDE 0570

### 9.4.1 Gliederung der Vorschriften entsprechend dem Isolationsaufbau

Transformatoren mit  
doppelter oder verstärkter Isolierung

Transformatoren mit  
Basisisolierung



ismet

## 9.4.2 Wichtige Normen für unser Leistungsspektrum

<b>DIN VDE 0100</b>	Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannung bis 1000V
<b>DIN VDE 0100 Teil 410</b>	Schutzmaßnahmen und Schutz gegen elektrischen Schlag
<b>DIN VDE 0100 Teil 706</b>	Begrenzte leitfähige Räume
<b>DIN VDE 0100 Teil 738</b>	Springbrunnen
<b>DIN VDE 0100 Teil 710</b>	Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art, Medizinisch genutzte Bereiche
<b>DIN VDE 0100 Teil 724</b>	Elektrische Anlagen in Möbeln und ähnlichen Einrichtungsgegenständen
<b>DIN VDE 0100 Teil 721</b>	Caravans, Boote und Yachten sowie Ihre Stromversorgung auf Camping und Liegeplätze
<b>DIN VDE 0110</b>	Isolationskoordinaten für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen
<b>EN 60310, DIN VDE 0115 Teil 420</b>	Bahnanwendung, Transformatoren und Drosselspulen auf Bahnfahrzeugen
<b>EN 60204-1; DIN VDE 0113</b>	Elektrische Ausrüstung von Maschinen
<b>EN 60310; DIN VDE 0115 Teil 420</b>	Bahnanwendung, Transformatoren und Drosselspulen auf Bahnfahrzeugen
<b>EN 61558-1</b>	siehe gesondertes Blatt
<b>EN60601-1, VDE 0750 Teil 1</b>	Medizinische elektrische Geräte
<b>EN 60076-1, DIN VDE 0532 Teil 101</b>	Leistungstransformatoren
<b>EN 60726, VDE 0532 Teil 726</b>	Trockentransformatoren
<b>VDE 0532 Teil 21</b>	Transformatoren und Drosselspulen, Anlasstransformatoren und Anlassdrosselspulen
<b>DIN 42402</b>	Anschlussbezeichnungen für Transformatoren und Drosselspulen
<b>EN 60529, DIN VDE 0470</b>	Schutzarten durch Gehäuse
<b>DIN EN 50081-1</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit; Fachgrundnorm Störaussendung, Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe
<b>DIN EN 50081-2</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit; Fachgrundnorm Störaussendung; Teil 2: Industriebereich
<b>DIN EN 50082-1</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit; Fachgrundnorm Störfestigkeit - Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe
<b>DIN EN 50082-2</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit; Fachgrundnorm Störfestigkeit - Industriebereich
<b>EN 60289, VDE 0532 Teil 289</b>	Drosselspulen
<b>EN 60076-5, DIN VDE 0532 Teil 5</b>	Leistungstransformatoren, Kurzschlussfestigkeit
<b>EN 60076-10, DIN VDE 0532 T 76-10</b>	Bestimmung der Geräuschpegel
<b>UL506</b>	Specialty Transformers
<b>UL508</b>	Standard for Industrial Control Equipment
<b>GL; DNV; Lloyd's</b>	Vorschriften aus dem Schiffsbau

### 9.4.3 Zeichen

	Netztransformatoren		Drosseln
	Steuertransformatoren		Schutzklasse II
	Zündtransformatoren		Schutzklasse III
	Trenntransformatoren		Umgebungstemperatur
	Rasiersteckdosen-Transformatoren		MM-Zeichen
	Sicherheitstransformatoren		Schutzleiter
	Transformatoren für Spielzeug		Schutzleiter nach UL
	Spartransformatoren		Funkentstörzeichen
	Transformatoren für medizinische Räume		

# 10 Absicherung

## 10.1 Absicherungstabelle für Typ CSTN

Transformatoren dürfen nach Kurzschlüssen und Überlastungen, die im bestimmungsgemäßen Gebrauch auftreten können, nicht gefährlich werden. Die Überlastschutzeinrichtung muss ansprechen, bevor bestimmte, in der VDE 0570 festgelegte Übertemperaturwerte erreicht werden.

Ist Primärseitig nur Leitungsschutz möglich, so ist der Überlastschutz durch Sekundärseitige Absicherung entsprechend der Leistungsschildangaben vorzunehmen.

Die nachfolgend aufgeführten Werte stellen eine Empfehlung für die Baureihe CSTN dar um Überlastschutz und Kurzschlusschutz auf der Primärseite zu realisieren. Als Schutzelement sind Leistungsschalter nach IEC 60947 einzusetzen (unverzögerte Überstromauslöser typisch 20x I<sub>n</sub>)

Spannung	230 V		400 V		500 V	
	Einstellbereich	Einstellwert	Einstellbereich	Einstellwert	Einstellbereich	Einstellwert
Leistung						
100	0,45 - 0,63	0,58	0,28 - 0,40	0,34	0,18 - 0,25	0,27
130	0,55 - 0,80	0,76	0,35 - 0,50	0,44	0,28 - 0,40	0,35
160	0,70 - 1,00	0,93	0,45 - 0,63	0,53	0,28 - 0,40	0,43
250	1,10 - 1,60	1,43	0,55 - 0,80	0,83	0,45 - 0,63	0,66
320	1,40 - 2,00	1,79	0,70 - 1,00	1,03	0,55 - 0,80	0,82
400	1,40 - 2,00	2,14	0,90 - 1,25	1,23	0,70 - 1,00	0,99
500	1,80 - 2,50	2,68	1,10 - 1,60	1,54	1,10 - 1,60	1,23
630	2,20 - 3,20	3,34	1,40 - 2,00	1,92	1,10 - 1,60	1,54
800	2,80 - 4,00	4,25	1,80 - 2,50	2,44	1,40 - 2,00	1,95
1000	4,50 - 6,30	5,26	2,20 - 3,20	3,03	1,80 - 2,50	2,42
1300	5,50 - 8,00	6,84	2,80 - 4,00	3,93	2,20 - 3,20	3,15
1600	7,00 - 10,00	8,42	3,50 - 5,00	4,84	3,50 - 5,00	3,87
2000	7,00 - 10,00	10,33	4,50 - 6,30	5,94	3,50 - 5,00	4,75
2500	9,00 - 12,50	12,91	5,50 - 8,00	7,43	4,50 - 6,30	5,94
3000	14,00 - 20,00	15,50	9,00 - 12,50	9,91	7,00 - 10,00	7,71

