

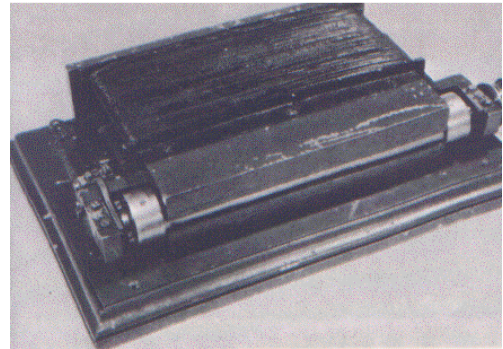
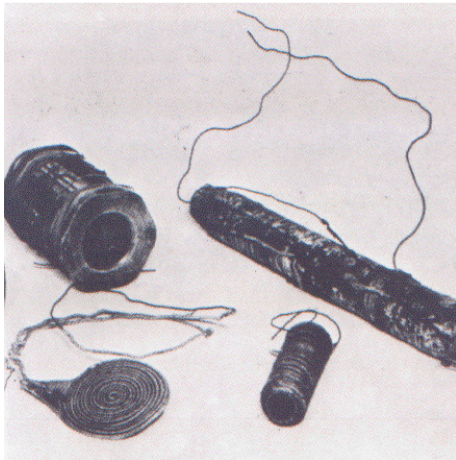
Kapitel 19

19 Transformatoren

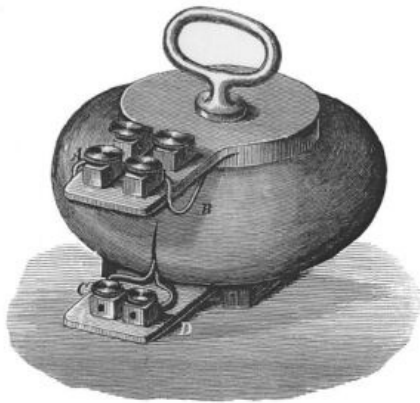
Verfasser:
Hans-Rudolf Niederberger
Elektroingenieur FH/HTL
Vordergut 1, 8772 Nidfurn
055 - 654 12 87

Ausgabe:
August 2008

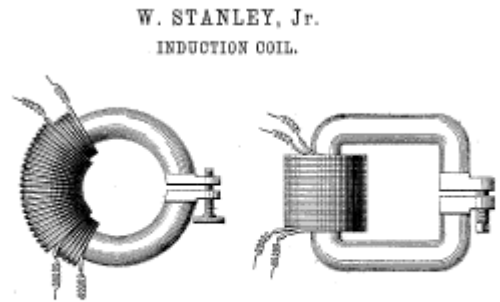




Die erste nach dem dynamo-elektrischen Prinzip konstruierte Dynamomaschine von Werner von Siemens befindet sich im Deutschen Museum in München.



Transformator von Zipernowsky, Déry und Bláthy



W. STANLEY, Jr.
INDUCTION COIL.

No. 349,611
Patented Sept. 21, 1886.

Patentzeichnung von William Stanley 1886

Inhaltsverzeichnis

19 TRANSFORMATOREN

19.1 Einphasentransformator

- 19.1.1 Der Einphasen-Transformator
- 19.1.2 Bestimmung der Induktionsrichtung
- 19.1.3 Idealer Trenntransformator
- 19.1.4 Der Spartransformator
- 19.1.5 Messwandler

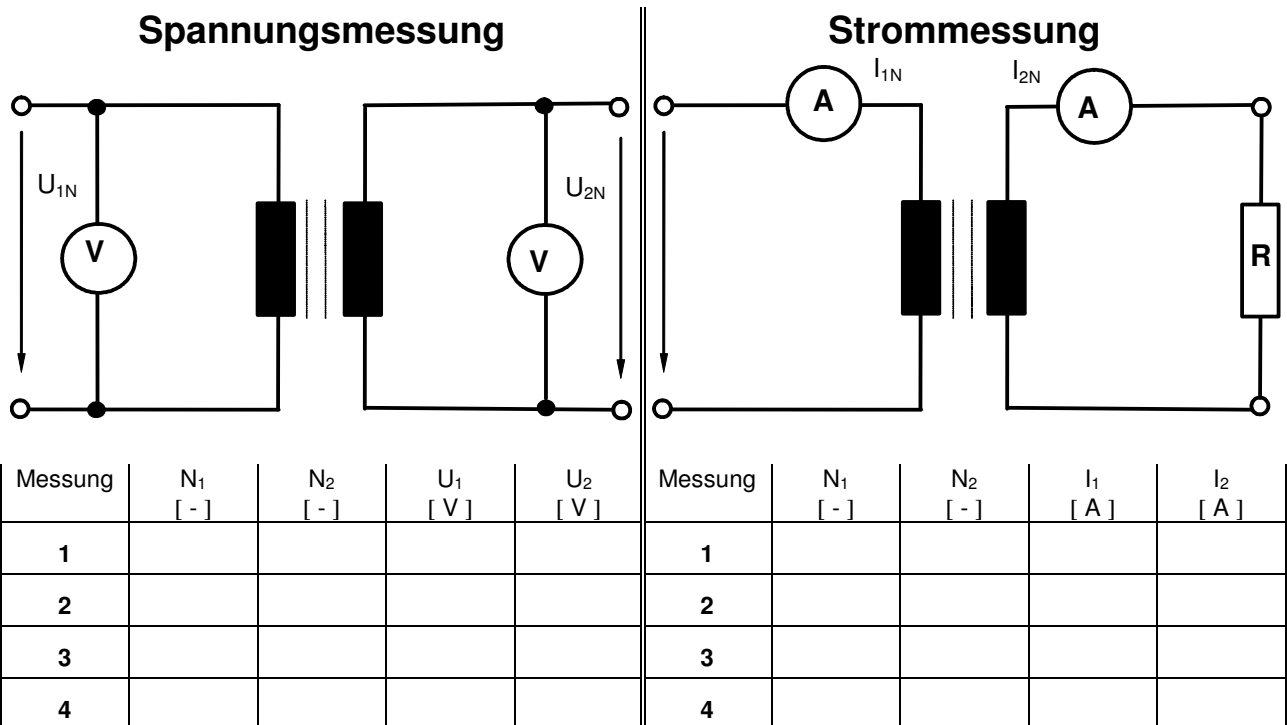
19.2 Transformator an Dreiphasen-Wechselstrom

- 19.2.1 Einleitung
- 19.2.2 Weg der elektrischen Energie vom Kraftwerk zum Verbraucher
- 19.2.3 Netzformen
- 19.2.4 Einsatz der Transformatoren
- 19.2.5 Schaltungsarten von Transformatoren
- 19.2.6 Drehstromtransformator
- 19.2.7 Trafokenndaten
- 19.2.8 Kurzschlussstrom
- 19.2.9 Kurzschlussstrom von Netztransformatoren
- 19.2.10 Parallelbetrieb von Transformatoren
- 19.2.11 Transformatorentypen
- 19.2.12 Kühlung der Transformatoren
- 19.2.13 Zubehör der Transformatoren
- 19.2.14 Giesharz-Transformator

19.1 Einphasentransformator

19.1.1 Versuch mit Einphasen-Transformator

Die praktische Anwendung des Prinzipes der Induktion der Ruhe ist der Transformator.



Beobachtung

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Die Spannungen verhalten sich wie das Verhältnis der Windungen.
(Proportional)

$$\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

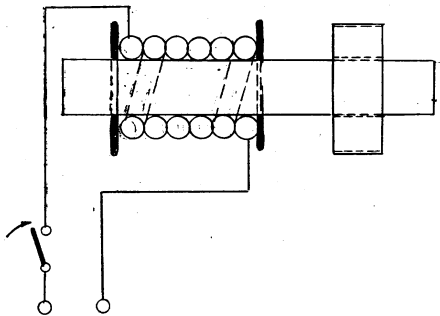
Die Ströme verhalten sich im umgekehrten Verhältnis wie die Widerstände.
(Umgekehrt Proportional)

ü: Übersetzungsverhältnis

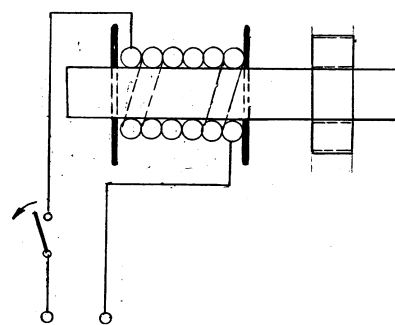
19.1.2 Bestimmung der Induktionsrichtung

Wir wählen dazu eine Versuchseinrichtung bei der die Sekundärwicklung reduziert wird und nur noch aus einer einzigen Windung (Ring) besteht. Durch die Bewegung, die die Sekundärwicklung ausführt, kann die in ihr fließende Stromrichtung bestimmt werden.

Einschalten der Primärspule



Ausschalten der Primärspule



19.1.3 Idealer Trenntransformator

In eine Draht oder Spule wird eine Spannung induziert, wenn sich in dem Leiter oder in der Spule der magnetische Fluss ändert.

Liest man die obige Beschreibung sehr aufmerksam, so wird man auf eine weitere Möglichkeit der Spannungserzeugung durch Induktion stossen. Spannungserzeugung durch Flussänderung. Anstatt das Magnetfeld sichtbar zu bewegen, kann durch Magnetfeldänderung dasselbe erreicht werden.

Der Primärspule wird Energie zugeführt.

Sekundär wird Energie entnommen.

Die Stromrichtungen (1,2) sind entgegengesetzt.

Spulen sind magnetisch verbunden.

Magnetische Verkettungen nennt man auch galvanische Trennung.

Höhe der induzierten Spannung

$$u_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

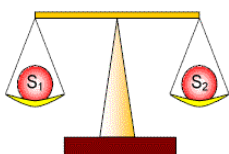
Das Minuszeichen im allgemeinen Induktionsgesetz gibt lediglich Auskunft über die Richtung der induzierten Spannung im Vergleich zur Flussänderung.

N	Windungszahl	-
$\Delta\Phi$	Flussänderung	[Vs]
Δt	Zeitdauer	[s]
u_i	Induktionsspannung	[V]

Wenn die Verluste vernachlässigt werden, besteht ein Leistungsgleichgewicht:

$$S_1 = S_2$$

Abgegebene und aufgenommene Leistung sind gleich gross.



Transformatorformel

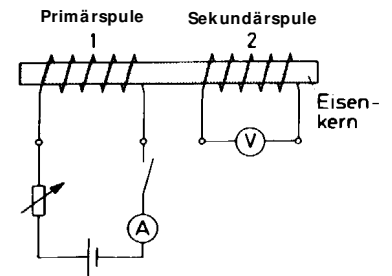
$$U = 4,44 \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B} \cdot f \cdot N$$

Der Eisenquerschnitt in m^2 , die Flussdichte B in T, die Frequenz f in Hz und die Windungszahl N bestimmen die induzierte Spannung.

Das gilt für jede Wicklung auf dem gemeinsamen Fe-Kern.

Der Transformator ist eine elektrische Maschine

Er überträgt Leistung nach dem Induktionsprinzip.

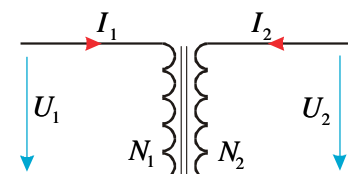


Der Transformator wird primärseitig gespeist. Die Primärwicklung erzeugt einen Wechselfluss, welcher in der Sekundärwicklung eine Spannung induziert (induktive Kopplung). Sekundärseitig wird belastet. Die Primärseite kompensiert die Sekundärleistung durch eine gleich grosse Leistungsaufnahme aus dem Speisernetz.

Die Spannungen verhalten sich wie das Verhältnis der Windungen. (Proportional)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Wirkung der Wicklungen



Primär

Sekundär

Durchflutung

$$\Theta_1 = \Theta_2$$

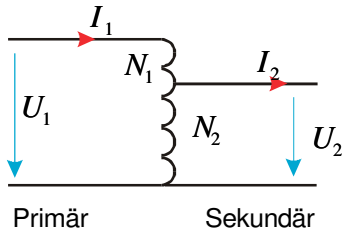
$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

Übersetzungen

Spannungen sind den Windungszahlen proportional, die Ströme hingegen umgekehrt proportional.

19.1.4 Der Spartransformator

Schaltbild eines Spartransformators



Je näher die Werte von Ein- und Ausgangsspannung beieinander liegen, desto mehr Masse und Material lässt sich durch Einsatz eines Spartransformators einsparen, da nur ein Teil des Stromes und der Spannung transformiert werden muss.

ü: Spannungsübersetzung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}$$

Scheinleistung

$$S_B = S_D \cdot \left(1 - \frac{1}{\ddot{u}}\right)$$

gilt für $U_1 > U_2$

$$S_B = S_D \cdot (1 - \ddot{u})$$

gilt für $U_1 < U_2$

ü: Stromübersetzung

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}$$

Anwendungen:

- Netzadapter (Reiseadapter)
- Sparstelltransformatoren
- Kleinspannungstrafo FELV

Vorteil:

- Sinusform bleibt erhalten gegenüber Thyristorstellern oder Diac-Dimmern
- Keine Netzstörungen durch Phasenanschnitt
- Alle Lastformen mit – induktivem, kapazitivem oder nichtlinearem Verhalten können betrieben werden
- Mehrere Anzapfungen möglich

Nachteil:

- Keine galvanische Trennung

S_B	Bauleistung	[VA]
S_D	Durchgangsleistung	[VA]
N_1	Primärwindungen	[-]
N_2	Sekundärwindungen	[-]
I_1	Primärstrom	[A]
I_2	Sekundärstrom	[A]
U_1	Primärspannung	[V]
U_2	Sekundärspannung	[V]
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis	[-]

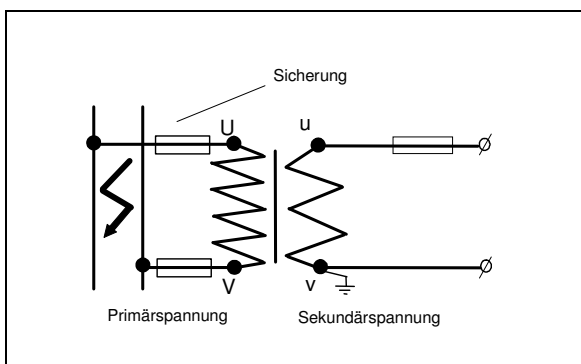


19.1.5 Messwandler

Dies sind speziell gebaute Trafo's. Sie werden eingesetzt, sobald Direktmessung infolge hoher Ströme oder Spannungen nicht mehr oder nur noch unter grossen Schwierigkeiten möglich wäre.

19.1.5.1 Der Spannungswandler

Dies sind Präzisionstransformatoren mit Leistungen von wenigen 100 VA, erhältlich in den Güteklassen 0,1-0,2-0,5-1,0-1,5-2,5 und 5,0 %. Sie dürfen nicht überlastet werden durch den Anschluss zu vieler Messinstrumente (Zähler), ansonsten der Klassenfehler überschritten wird. Spannungswandler transformieren die zu messende Spannung auf meist 100 V. Solche Wandler sind in Wechselstromanlagen üblich, wenn die zu messende Spannung 600 V übersteigt. Bei diesen „Messtransformatoren“ ist der sekundäre Messkreis von der zu messenden Spannung galvanisch getrennt. Damit ein Durchschlag von der Primär- zur Sekundärwicklung keinen Personen- oder Sachschaden verursachen kann, wird die eine Sekundärklemme geerdet.



Spannungswandlerschema

Sekundärseitig muss der nicht geerdete Leiter abgesichert werden.

Die Messgeräte (Spannungsmessung), welche an die Wandler angeschlossen werden sind entsprechend dem Übersetzungsverhältnis angeschrieben, so dass ohne Umrechnung direkt die Primärspannung abgelesen werden kann. Auf der Instrumentenskala ist das Übersetzungsverhältnis aufgedruckt, z.B. 20'000/100 V.

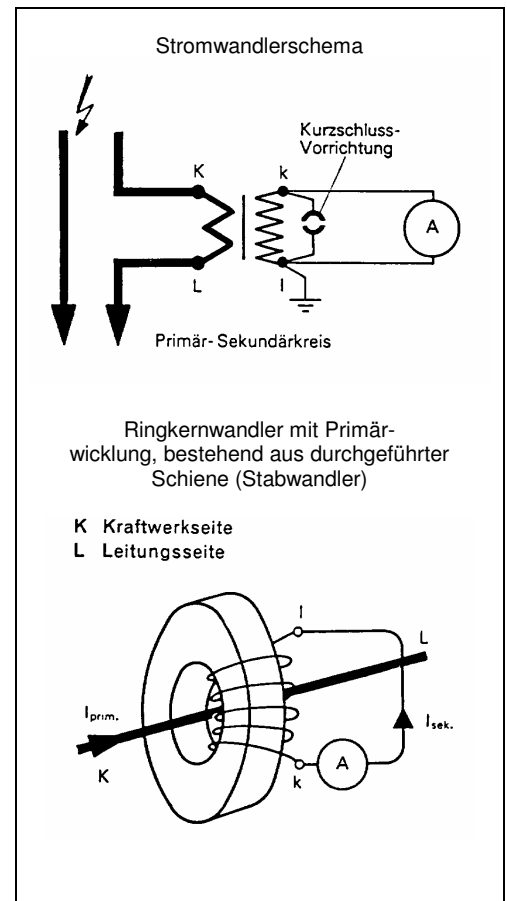
19.1.5.2 Der Stromwandler

Zur Messung grosser Ströme dienen Stromwandler. Bei Messungen in solchen Anlagen wird der Messkreis durch den Wandler Anlage galvanisch getrennt. Es sind spezielle Transformatoren, deren Primärwicklung im „Zuge der Leitung“ liegt, wie ein Amperemeter. An der Sekundärwicklung sind in Serieschaltung die Stromspulen der Amperemeter, Wattmeter, Zähler und Relais angeschlossen. Auch bei diesen Wandlern muss die Isolation zwischen Primär- und Sekundärwicklung für die volle Betriebsspannung dimensioniert werden. Beim Nennstrom beträgt der Sekundärstrom 5 A oder 1 A.

Der Sekundärkreis von Stromwandlern darf im Betrieb nicht geöffnet werden:

Der Grund ist, die zwischen den Klemmen K und L liegende Spannung wird herauftransformiert, was hohe Spannungen ergibt. Entsprechend dem Spannungsanstieg nimmt der magnetische Fluss im Eisenkern zu, was in der Folge zu unzulässiger Erhitzung des Eisenkerns führt. Auch bei ganz kurzzeitigen Unterbrüchen wird der Eisenkern vormagnetisiert, was zu Messfehlern führt. Werden die Instrumente ausgebaut, muss der Stromwandler vorgängig mit einer Kurzschlussvorrichtung sekundär überbrückt werden.

Beim Anschliessen von Kontrollinstrumenten muss, auch beim Stromwandler, mit der Wandlerübersetzung multipliziert werden. Bei fest angeschlossenen Instrumenten ist die Skala der Übersetzung entsprechend beziffert, so dass der Primärstrom direkt ablesbar ist (Bezeichnung z.B. 120/5 A).



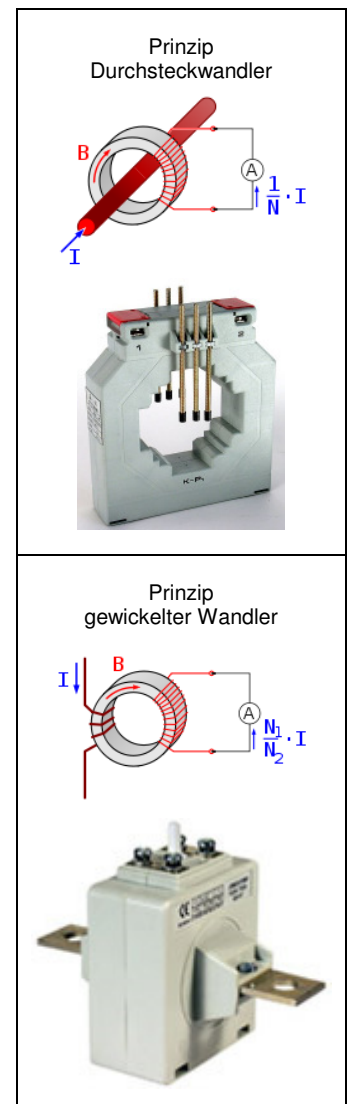
Stromwandler haben nur eine oder wenige Primärwindungen, die vom zu messenden Strom durchflossen werden, sowie eine größere Anzahl von Sekundärwindungen. Oft besteht die Primärwicklung aus einer durch den Ringkern des Wandlers geführten Stromschiene, was einer einzigen Primärwindung entspricht.

Der Sekundärstrom ist gegenüber dem zu messenden Primärstrom verringert – und zwar umgekehrt proportional zum Verhältnis der Anzahlen der Primär- und Sekundärwindungen. Die Sekundärwicklung wird vor dem Einschalten des Primärstromes

zur Sicherheit bei höherer Spannung einseitig geerdet und an die vorge-sehene äußere Beschaltung, z. B. an einen Strommesser, angeschlossen.

Die Primäranschlüsse werden mit P1 (oder K) und P2 (oder L) gekennzeichnet, die Sekundäranschlüsse mit S1 (oder k) und S2 (oder l).

Stromwandler können für Frequenzen von 16 Hz bis in den MHz-Bereich gebaut werden. Die untere Grenzfrequenz wird durch die Sekundärinduktivität und die Summe aus Wicklungswiderstand und äußerem Abschlusswiderstand (Bürde) bestimmt. Daher ist man bestrebt, Kernmaterial mit möglichst hoher Permeabilitätszahl zu verwenden.



19.1.6 Aufschriften auf Transformatoren

Was bedeuten die verschiedenen Beschriftungen auf den Transformatoren?

- | | | |
|----|---|---|
| 1 |  | Kurzschlussicherer Transformator

_____ |
| 2 |  | Trafo nicht kurzschlussicher

_____ |
| 3 |  | Trafo mit zwei Wicklungen

_____ |
| 4 |  | Spartrafo

_____ |
| 5 |  | Trenntrafo

_____ |
| 6 |  | Sicherheitstrafo

_____ |
| 7 |  | Spielzeugtrafo

_____ |
| 8 |  | Klingeltrafo

_____ |
| 9 |  | Auftauprafo

_____ |
| 10 |  | Handleichtentrafo

_____ |

19.2 Drehstromtransformatoren

19.2.1 Einleitung

Transformation bedeutet Umwandlung

Transformatoren wandeln elektrische Energie bestimmter

Spannung mit Hilfe von Wechselfeldern in elektrische

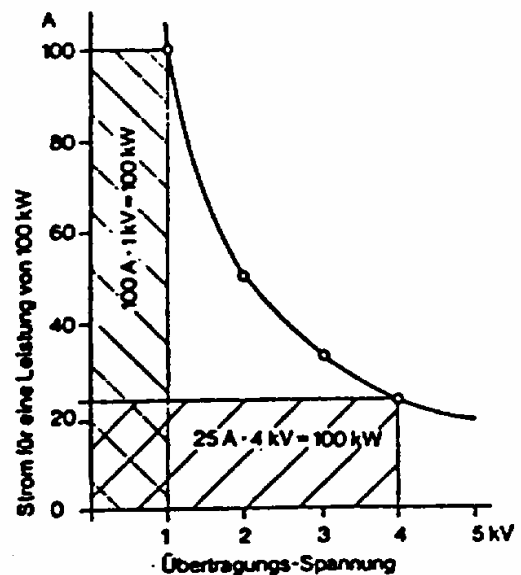
Energie anderer Spannung um

Die Eingangsseite bezeichnet man als Primärseite,

die Ausgangsseite als Sekundärseite

Um grosse Energien auf grosse Distanzen zu übertragen, sind hohe Spannungen notwendig. Um die Verluste in langen Uebertragungsleitungen klein zu halten, werden hohe Spannungen gewählt. Mit zunehmender Spannung verringert sich der Strom bei gleicher zu übertragender Leistung.

Auf dem Uebertragungsweg von der Produktionsstelle zum Verbraucher erfährt die elektrische Energie beinahe einige Spannungsumwandlungen über Transformatoren (siehe Bild nächste Seite). Eine der letzten Stufen bilden die Ortsstationen. Hier erfolgt die Umformung von Mittelspannung (2), welche je nach Energieversorgungsunternehmen im Bereich von 6 kV bis 24 kV liegen, in die vom Verbraucher beanspruchte Netzspannung von in der Regel 3x400/230 V.

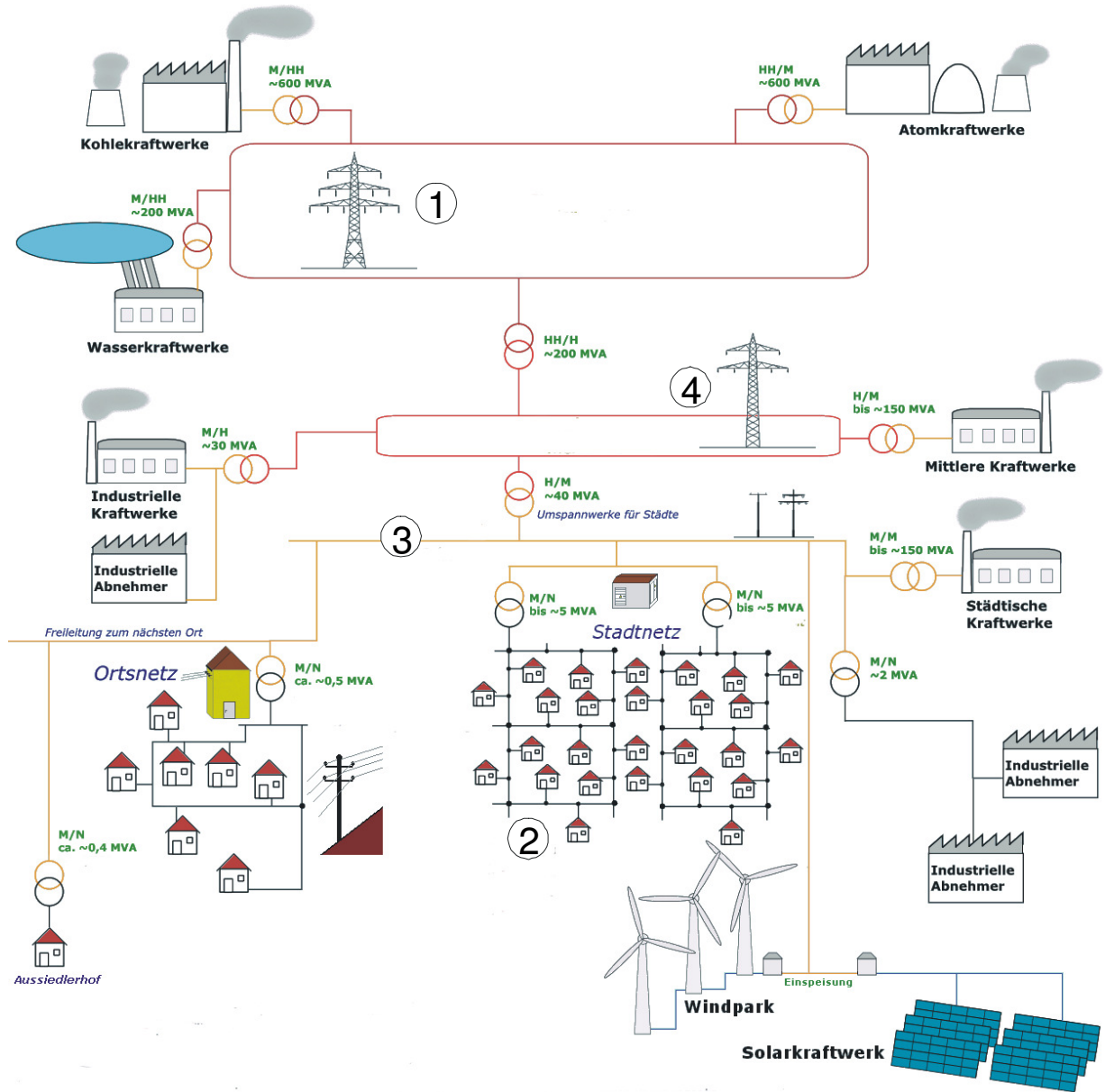


Der entsprechende Verteiltransformator speist als Einzelelement ein Quartier mit einer Bevölkerungszahl von ca. 50 - 600 Einwohner. Von seiner zuverlässigen Funktion ist die zugehörige Bevölkerung mit Industrie und Gewerbe direkt abhängig.

Transformatoren sind elektrische Maschinen ohne mechanisch bewegte Teile. Sie dienen der Umformung von Wechselspannungen und Wechselströmen. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass in einem Leiter, der einem wechselnden Magnetfeld ausgesetzt ist, eine Spannung induziert wird.

Gleichströme können demzufolge nicht transformiert werden

19.2.2 Weg der elektrischen Energie vom Kraftwerk zum Verbraucher



①

②

③

④

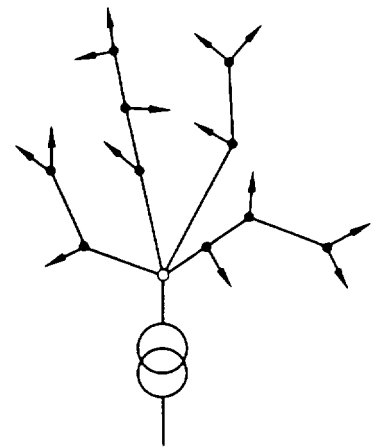
19.2.3 Netzformen

19.2.3.1 Strahlennetz und Ringnetz

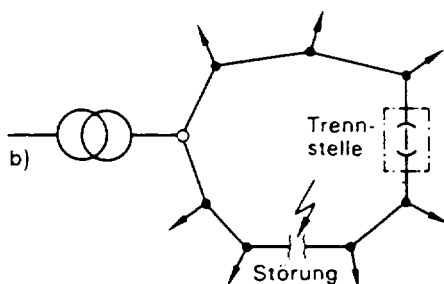
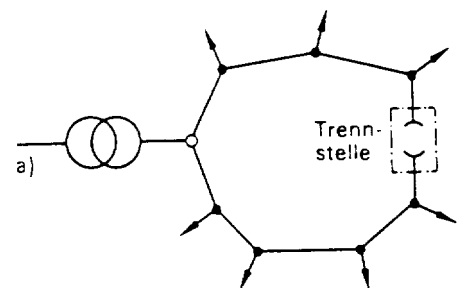
Bei den Hoch- und Niederspannungsnetzen unterscheidet man:

- Strahlennetz
- Ringnetz
- Maschennetz

Strahlennetze nach haben 1 Speisepunkt. Die Verbraucher speist man über Stichleitungen direkt aus der Transformatorstation oder einer Verteilkabine. Das Strahlennetz ist das einfachste Netz. Die Belastung der Leitungen ist begrenzt, weil gegen deren Ende der Spannungsabfall zunimmt. Fällt die Speisestelle aus, so fehlt auch die Versorgung des Abnehmers. Je nachdem, ob die grossen Verbraucher am Anfang oder am Ende der Leitung liegen, sind auch Spannungsschwankungen möglich.



Ringnetze zeichnen sich durch eine hohe Versorgungssicherheit und kleine Spannungsabfälle auch bei ungünstig gelegenen Verbrauchern aus. Sie sind durch ihren ringförmigen Leitungszug gekennzeichnet.



Im Normalbetrieb werden

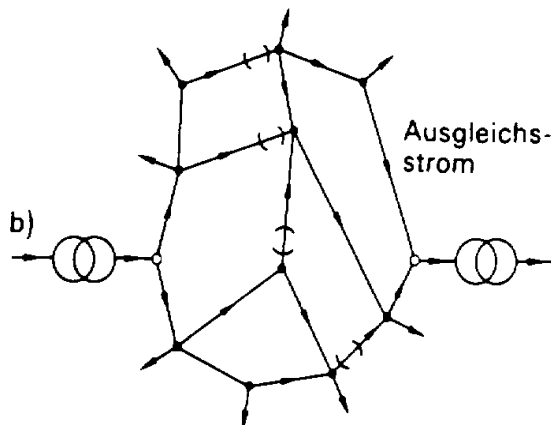
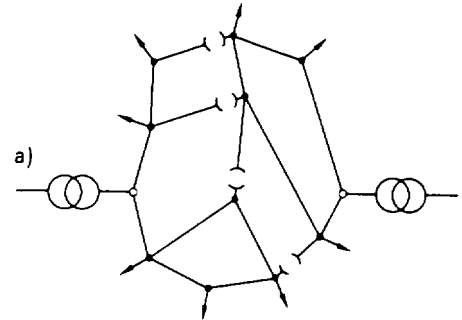
Ringnetze meist in der Mitte geöffnet und als Strahlennetz betrieben. Im Störfall wird die Trennstelle geschlossen, und die Versorgung der Abnehmer ist gewährleistet. Ringnetze sind teurer als Strahlennetze, weil der Aufwand für die Schaltanlagen grösser ist.

19.2.3.2 Maschennetz

Maschennetze ergeben sich, wenn die einzelnen Leitungen zu einem Netz verbunden sind. Oft wird ein solches Netz durch mehrere Einspeisepunkte beliefert. Die Versorgungssicherheit sowie die Spannungshaltung sind im Maschennetz sehr gut, die Netzverluste sind gering.

Solche Netzbauformen verwendet man im Hochspannungsnetz durchwegs und auch im Niederspannungsnetz, vor allem in dicht bebauten Gebieten, findet das Maschennetz Anwendung. Wegen der Vermaschung ist allerdings ein grosser Aufwand an Schaltgeräten und Schutzeinrichtungen notwendig.

Die Kurzschlussleistungen solcher Netze sind relativ hoch, da jede Einspeisestelle ihren Anteil an den Kurzschlussstrom liefert. Dies kann schliesslich zu Problemen bei der Schaltleistung der Schalter führen.

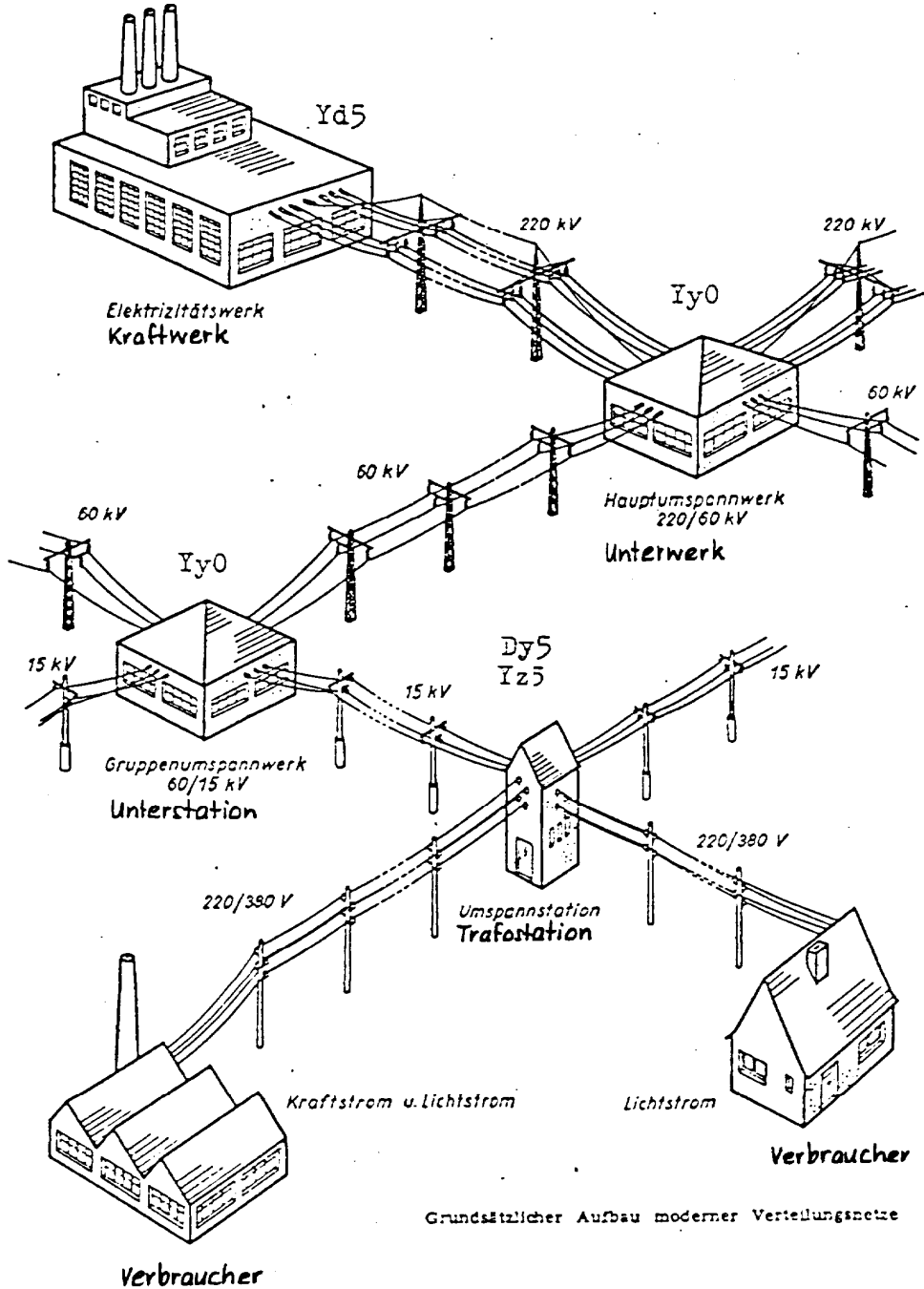


Bei vermaschten Netzen müssen die Spannungen der verschiedenen Einspeisepunkte genau überwacht werden. Es bestehen die gleichen Probleme wie bei parallelgeschalteten Batterien, bei Spannungsdifferenzen entstehen Ausgleichsströme. Diejenige Speisestelle mit der kleinsten Spannung wird zum «Verbraucher» und trägt nichts mehr zur Speisung bei.

Im vermaschten Niederspannungsnetz werden deshalb im Normalfall die

Netzteile nicht miteinander verbunden.

19.2.4 Einsatz der Transformatoren



19.2.5 Schaltungsarten von Transformatoren

Schaltgruppe	Spannungsübersetzung	Beschreibung	Anwendung
YNyn0	$\dot{u} = \frac{N_1}{N_2}$	Ober- und unterspannungsseitige Sternschaltung mit nach außen geführten Sternpunkten	Große Kuppeltransformatoren im Verbundnetz und Parallelbetrieb, z.B. zwischen 380 kV und 220 kV-Ebene.
Yd5	$\dot{u} = \frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$	Oberspannige Stern- und unterspannige Dreieckschaltung	Maschinentransformator
Yd11	$\dot{u} = \frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$	Oberspannige Stern- und unterspannige Dreieckschaltung	Maschinentransformator
Dy5	$\dot{u} = \frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	oberspannigseitige Dreieck- und unterspannige Sternschaltung	Verteilungstransformatoren kleiner bis großer Leistung
Yz5	$\dot{u} = \frac{2 \cdot N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	oberspannungsseitige Stern- und unterspannungsseitige Zick-Zack-Schaltung	Kleiner Verteilungstransformator, bei stark unsymmetrischer Belastung.

Die Schaltgruppe eines Drehstromtransformators enthält folgende Angaben:

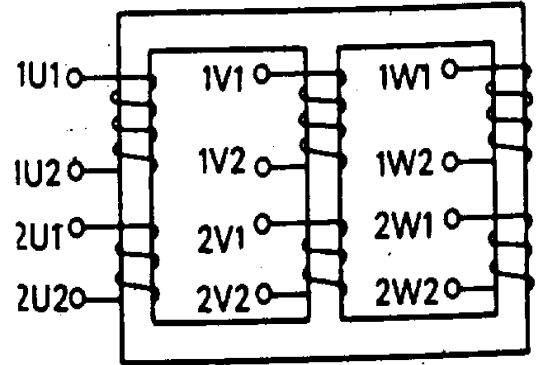
Die Schaltung der beiden Wicklungen (Dreieck-, Stern- oder Zickzackschaltung) die Phasenlage der Unterspannung bezogen auf die Oberspannung. Die Schaltung der Oberspannungsseite wird durch einen Großbuchstaben gekennzeichnet. Die Schaltung der Unterspannungsseite wird durch einen Kleinbuchstaben gekennzeichnet. Bei herausgeführtem Sternpunkt wird dem Schaltungsbuchstaben ein "n" angehängt. In der Schaltgruppenbezeichnung folgt eine Kennziffer, die mit 30 multipliziert die Phasenverschiebung in Grad angibt. Die bevorzugten Schaltgruppen für Drehstromtransformatoren sind nebenstehend aufgeführt.

Die Phasenverschiebung zwischen Ober- und Unterspannungsseite bezogen auf die Außenleiter und als Vielfachheit von 30° angegeben. Mögliche Werte sind 0, 5, 6 und 11, was Phasenverschiebungen von 0°, 150°, 180° und 330° entspricht.

Schaltung	Symbol	Schaltbild		Übersetzung $n = U_1 : U_2$
		Primär	Sekundär	
Stern-Stern Schaltgruppe				$n = \frac{N_1}{N_2}$
Dreieck-Stern				$n = \frac{N_1}{1,73 N_2}$
Stern-Dreieck				$n = \frac{1,73 N_1}{N_2}$
Stern-Zickzack				$n = \frac{2 N_1}{1,73 N_2}$ N_2 Windungen je Schenkel

19.2.6 Funktion Drehstromtransformator

Üblicherweise bringt man 3 Primär- und 3 Sekundärwicklungen auf je einen Schenkel eines gemeinsamen Eisenkerns. Das Ganze bezeichnet man als Drehstromtransformator. Wie bei den Einzeltransformatoren können die Ein- und Ausgänge unter sich in Dreieck oder Stern zusammengeschaltet werden. Der Transformator wirkt dann eingangsseitig wie ein Drehstromverbraucher und ausgangsseitig wie ein Drehstromerzeuger.



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Die 3 Eingangsströme sind in jedem Augenblick gleich Null:

Dasselbe gilt auch für die magnetischen Flüsse:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

Die jeweiligen Wicklungsspannungen der Primär- und Sekundärseite sind um 180° phasenverschoben. Je nach Schaltungen der Wicklungen (Stern oder Dreieck) ergeben sich aber andere Phasenlagen.

Das Übersetzungsverhältnis ist im Prinzip das gleiche wie bei den Einphasentransformatoren, beachte aber:

Bei Drehstromtransformatoren gibt man das Übersetzungsverhältnis mit den verketteten Spannungen an. Bei Leistungen über 16 kVA bezeichnet man die Leerlaufspannung als Nennspannung.

19.2.7 Trafokenndaten

19.2.7.1 Kurzschlussspannung

Schliesst man bei einem Transformator die Sekundärseite kurz und legt an die Primärwicklung eine Wechselfspannung an, fliesst schon bei einer kleinen Spannung ein grosser Strom.

Die Kurzschlussspannung:

Die Spannung, die nötig ist um in der kurzgeschlossenen Sekundärwicklung einen Strom in der Grösse des Nennstromes zu erzeugen, nennt man Kurzschlussspannung.

Diese Kurzschlussspannung ist ein Kriterium, das bei der Berechnung der Kurzschluss-Leistung, der Hauptzweigdaten sowie beim Parallelschalten von Transformatoren berücksichtigt werden muss.

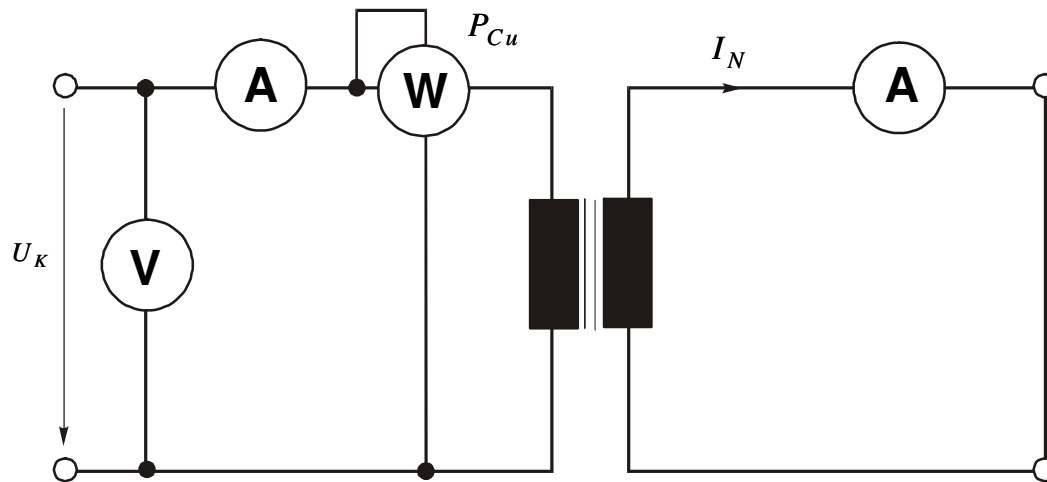
Kurzschlussspannungen bei Netztransformatoren sind normiert und betragen je nach grösse des Transformators zwischen 4 und 5 % der Nennspannung. Das gebräuchliche Symbol heisst u_K .

Die Kurzschlussspannung U_K ist ein Mass für die Spannungsänderung bei Belastung des Transformators. Man gibt deshalb die relative Kurzschlussspannung u_K in % an.

$$u_K = \frac{100\% \cdot U_K}{U_{1N}}$$

U_K	Kurzschlussspannung	[V]
U_N	Nennspannung	[V]
u_K	Relative Kurzschlussspannung	[%]

Kurzschlussversuch



19.2.7.2 Leerlaufspannung

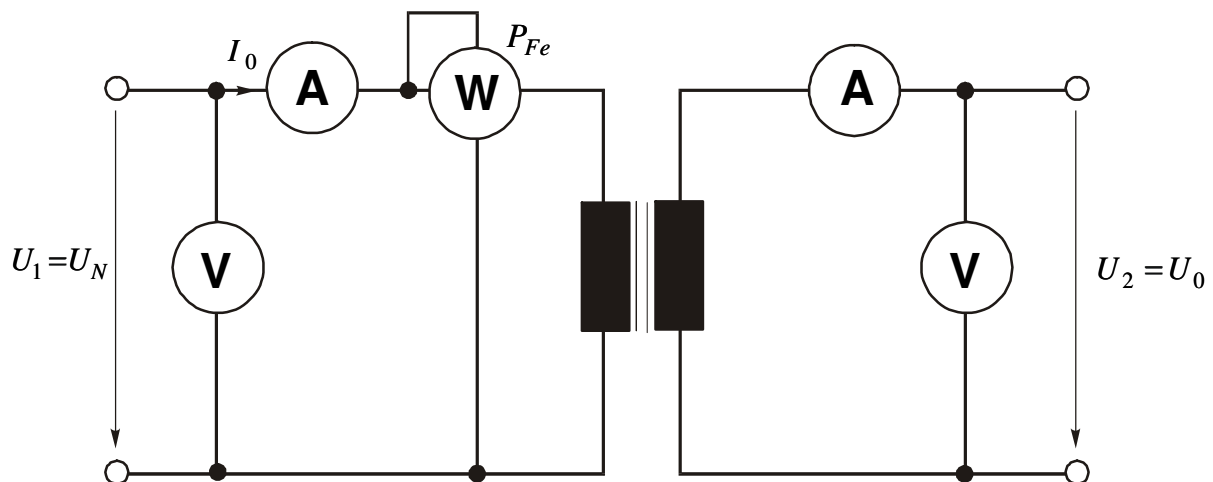
Wird ein Transformator unbelastet betrieben, so kann an diesem bei Nennspannung auf der Sekundärseite seine Leerlaufspannung gemessen werden.

Leerlaufverluste

Beim Aufbau des magnetischen Wechselfeldes im Eisenkern eines jeden Transformators entstehen Ummagnetisierungsverluste und Wirbelstromverluste. Beide Erscheinungen sind ungewollte Nebenwirkungen und können nicht ganz unterdrückt werden. Ummagnetisierungsverluste können klein gehalten werden indem man magnetisch weiches Eisen verwendet. Wirbelstromverluste werden minimiert indem man den Eisenkern lammelliert.

Die Leerlaufverluste - auch Eisenverluste genannt - führen zu einer Erwärmung des Eisenkerns und sind praktisch über den ganzen Lastbereich konstant. Die Leerlaufverluste oder Eisenverluste sind unabhängig von der Last immer wirksam. Die Leerlauf- oder Eisenverluste betragen bei Netztransformatoren ca. 0,15 - 0,4 %.

Leerlaufversuch



19.2.7.3 Kupferverluste

Wird ein Transformator belastet, entsteht in dessen Wicklungen als Folge des ohmschen Widerstandes Wärme. Diese Verluste wachsen mit dem Quadrat der Ströme

$$P_{CU} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2$$

Die Kupferverluste auch Lastverluste genannt sind vom Belastungsgrad des Transformators abhängig.

Die Lastverluste von Netztransformatoren betragen:

im Leerlauf	ca. 0%
bei Halblast	ca. 0,1 - 0,5%
bei Vollast	ca. 0,5 - 2,0%

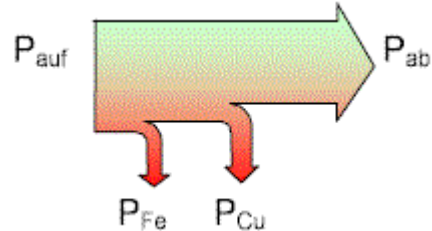
Bei kleineren Transformatoren sind die Verluste im Allgemeinen etwas höher.

19.2.7.4 Wirkungsgrad

Allgemein ist der Wirkungsgrad von Maschinen (auch beim Transformator) so definiert:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} \quad P_{ab} = P_{auf} - P_V$$

$$P_V = P_{Fe} + P_{Cu}$$



Die Verluste bestehen aus zwei Komponenten:

Eisenverluste P_{Fe} sind bereits im Leerlauf vorhanden und erwärmen das Eisen (Hystereseverluste+Wirbelstromverluste)

Kupferverluste P_{Cu} treten beim Belasten in den Wicklungen auf. Die Cu-Verluste werden im Kurzschlussversuch ermittelt.

S_D Durchgangsleistung oder P_{ab} .
Was der Trafo überträgt.

$$S_D = U_2 \cdot I_2$$

S_B Bauleistung (Typenleistung),
die Hersteller verwenden Normbaureihen

$$S_B = \frac{U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2}{2}$$

19.2.7.5 Kurzschlussimpedanz von Netztransformatoren

In der Praxis werden die meisten elektrotechnischen Probleme vereinfacht. Da meistens die Anfangskurzschlusswechsellleistung S_K bei Netztransformatoren nicht bekannt sind wird der Kurzschlussstrom am Ausgang des Transformators wie folgt berechnet.

$$I_K'' = \frac{U_{US}}{\sqrt{3} \cdot Z_K}$$

Wobei die Kurzschlussimpedanz aus der Scheinleistung abgeleitet wird.

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{SN}} = \frac{u_K \% \cdot U_N}{100\% \cdot I_{SN} \cdot \sqrt{3}}$$

Wobei der sekundäre Nennstrom ersetzt wird durch

$$I_{SN} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N}$$

Daraus folgt für die Kurzschlussimpedanz bezogen auf die Sekundärseite

$$Z_K = \frac{u_K \% \cdot U_N^2}{100\% \cdot S_N}$$

Vereinfacht

$$Z_K = \frac{k}{S_N} [\Omega] \quad \text{wobei} \quad k = \frac{u_K \% \cdot U_N^2}{100\% \cdot 10^3}$$

Setzt man für die üblichen Netztransformatoren die Werte ein so kann die folgende Tabelle abgeleitet werden:

S_N [kVA]	1000	630	400	250	160	100	63
u_K [%]	5	4,6	4,4	4,2	4,1	4	4
k							
Z_K [Ω]							

$$S_N = S_B$$

19.2.8 Kurzschlussstrom

19.2.8.1 Der Anfangskurzschluss-Wechselstrom

Der Anfangskurzschlusswechselstrom bildet die Grundlage jeder Kurzschlussberechnung.

$I_K'' = \frac{S_K''}{\sqrt{3} \cdot U_N}$	I_K'' Anfangskurzschlusswechselstrom [A] U_N Netzennspannung [V] S_K'' Kurzschlussleistung [VA]
--	---

Die Anfangsspannung U_q'' wird von der Grösse und Phasenlage des Betriebsstromes unmittelbar vor Kurzschlusseinsatz bestimmt.

$$U_q'' = U_{Ph} + I_B \cdot (R_L \cdot \cos \varphi + X_L \cdot \sin \varphi)$$

$$U_q'' = U_{Ph} + \Delta U_L$$

Im Normalfall wird für $U_q'' = 1,1 U_{Ph}$ eingesetzt. Dies entspricht einem maximalen Spannungsabfall von 10%.

Ist die Kurzschlussleistung im Netz bekannt, so kann die Netzersatzimpedanz bestimmt werden.

$Z_q'' = \frac{U_q''}{I_K''}$	I_K'' Anfangskurzschlusswechselstrom [A] U_q'' Anfangsspannung bei Kurzschluss [V] Z_q'' Netzersatzimpedanz [Ω]
-------------------------------	--

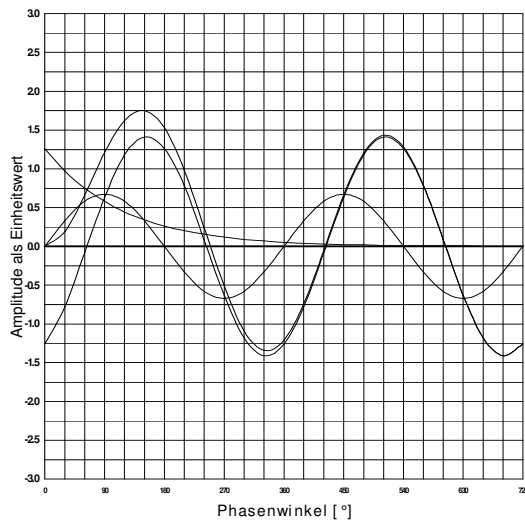
19.2.8.2 Stosskurzschlussstrom

Grosse Kurzschlussströme können zur Zerstörung von Schaltern, Leitungen und anderen Betriebsmitteln führen. Der Dauerkurzschlussstrom I_{KD} erwärmt den Transformator stark.

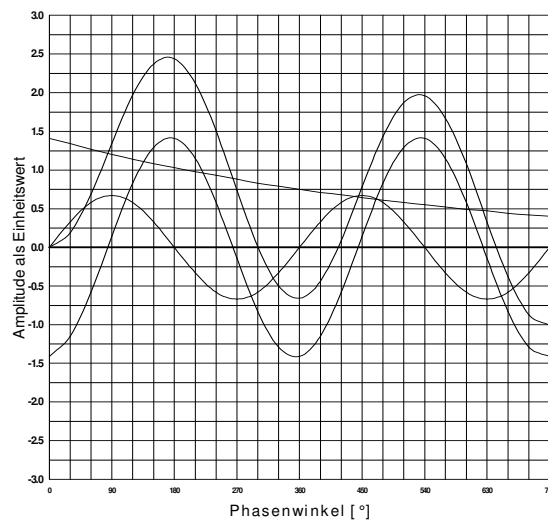
Der Stosskurzschlussstrom I_{KS} zu Beginn des Kurzschlusses kann wesentlich über dem Dauerkurzschlussstrom I_{KD} liegen. Der Maximalwert von I_{KS} hängt von I_{KD} ab sowie vom Einschaltzeitpunkt des Kurzschlusses. Der Stosskurzschlussstrom kann zu mechanischen Schäden führen.

Besonders ungünstig ist es, wenn der Kurzschluss beim Spannungsnulldurchgang auftritt. In diesem Augenblick hat der magnetische Fluss seinen Maximalwert erreicht. Da beim Dauerkurzschlussstrom kein Magnetfeld mehr vorhanden ist, überlagert sich anfänglich ein Gleichstromanteil dem Kurzschlussstrom. Dieser entspricht dem Energieinhalt des zusammenbrechenden Magnetfeldes. Schliesst man die Klemmen im Spannungsmaximum kurz, beim Nulldurchgang des Flusses, so tritt kein Stosskurzschlussstrom auf, es wird sofort der Dauerwert I_{KD} erreicht

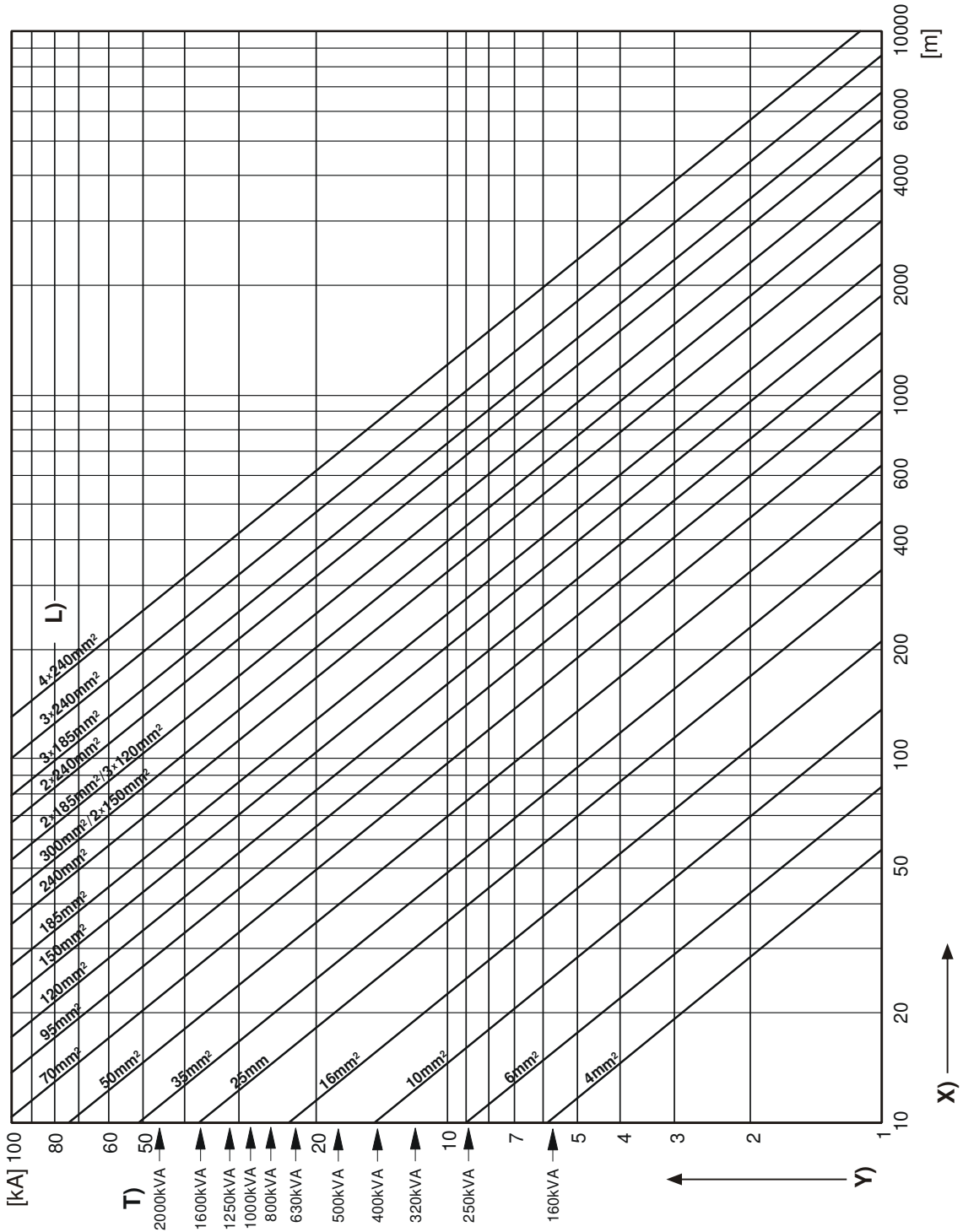
Kurzschlussströme an einem Transformator
 $R_k/X_k=1/2$



Kurzschlussströme an einem Transformator
 $R_k/X_k=1/10$



19.2.9 Kurzschlussstrom von Netztransformatoren



19.2.10 Parallelbetrieb von Transformatoren

Ein Parallelbetrieb von Transformatoren kann notwendig werden bei der Erweiterung einer Trafostation eines Ortsnetzes oder eines Grossverbrauchers.

Voraussetzungen für den Parallelbetrieb:

- Die Schaltgruppen müssen zueinander passen
- Die Übersetzungen müssen innerhalb der zulässigen Toleranzen gleich sein
- Die Kurzschlussspannungen müssen innerhalb der zulässigen Toleranzen gleich sein
- Das Verhältnis der Nennleistungen soll nicht grösser als 3:1 sein

Die beiden ersten Bedingungen sind selbstverständlich, denn nach Betrag oder Phasenwinkel ungleiche sekundäre Leerlaufspannungen paralleler Transformatoren hätten Ausgleichsströme zur Folge, welche der Differenz der beiden Spannungen proportional sind.

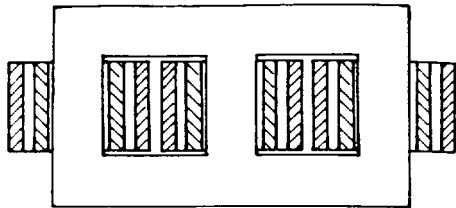
Dieser Kreisstrom wird nur durch die ohmischen Widerstände und die Streureaktanzen begrenzt.

19.2.11 Transformatorentypen

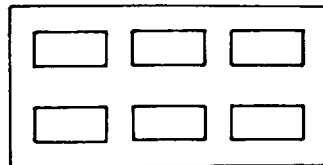
Die Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie erfolgt, abgesehen von der Bahnversorgung, mit Hilfe des Drehstromsystems. Auch für die Verbraucher, z.B. Drehstrommotoren, wird ein sehr grosser Teil der erzeugten Energie in Form von Drehstromenergie benötigt. Daher werden Leistungstransformatoren in Europa hauptsächlich als Drehstromtransformatoren hergestellt. Bei sehr grossen Leistungen von 1000 MVA und mehr hat man auch schon, wie es in den USA gemacht wird, drei Einphasen-Transformatoren zu einer sogenannten „Drehstrombank“ zusammengeschaltet.

Wie beim Einphasen-Transformator kennt man auch beim Drehstromtransformator die Kern- und die Manteltype. Als dritte Art kommt der Fünfschenkeltransformator hinzu. Der häufigste Transformator ist der Kerntransformator.

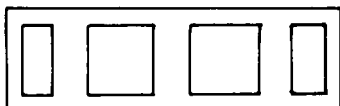
Drehstromkerntransformator



Kern eines Drehstrommanteltransformators



Kern eines Fünfschenkeltransformators



19.2.12 Kühlung der Transformatoren

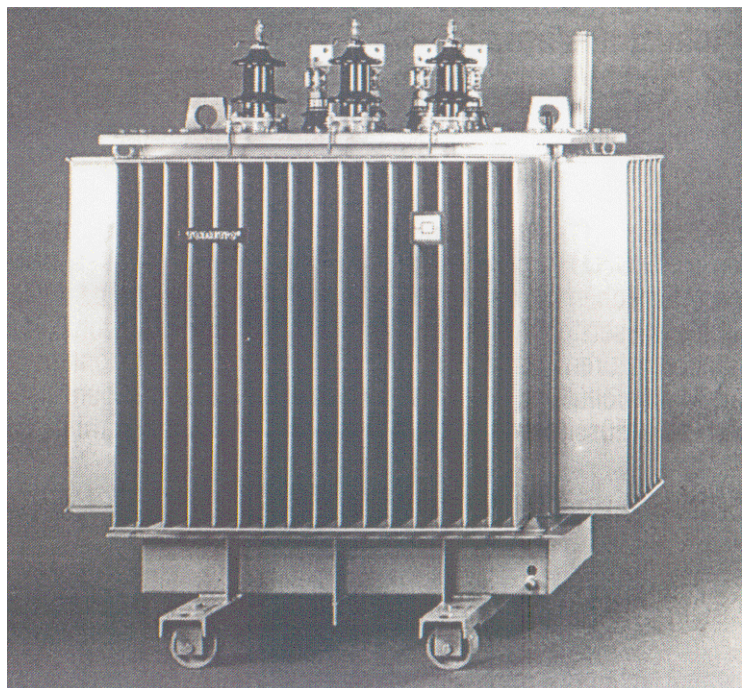
Der Aufwand der Kühlung hängt von der Nennleistung ab. Mit zunehmender Leistung wächst die Verlustleistung stärker als die Oberfläche, die zur Wärmeabgabe notwendig ist, damit die zulässige Wicklungstemperatur nicht überschritten wird. Je grösser die Leistung, desto grösser wird der Aufwand für die Kühlung.

Normalerweise werden Transformatoren als Öltransformatoren ausgeführt. Trockentransformatoren mit normaler Wickelisololation kommen nur bei kleinerer Leistung (ca. 100 kVA) in Frage, bei Einbettung der Wicklungen in Giessharz sind hingegen auch Leistungen von mehreren 1000 kVA möglich. Die natürliche Luftbewegung genügt hier in vielen Fällen, um die Verlustwärme abzuführen. Beim Öltransformator wird der Eisenkern mit den Wicklungen in einen mit Öl gefüllten Kessel eingebaut. Als Öl verwendet man Mineralöl, in Sonderfällen, z.B. in Kaufhäusern, Askarel (Marke „Clophen“), eine synthetische nicht entflammare Flüssigkeit.

Das Öl dient als Zwischenkühlmittel und erhöht die elektrische Festigkeit, so dass hohe Spannungen verwendet werden können, während beim Trockentransformator maximal 10 kV in Frage kommen.

Es kommt ein natürlicher Ölumlaufl zustande. Das durch die Verluste erwärmte Öl steigt nach oben und gibt seine Wärme bei der Abwärtsbewegung über die Kesselwände an die umgebende Luft ab.

Ölgekühlter Drehstromtransformator, 1000 kVA, 20/0,4 kV, Dyn 5, Wellblechkessel



19.2.13 Zubehör der Transformatoren

19.2.13.1 Eisenkern

Der magnetische Kreis des Wechselfeldes muss mit Rücksicht auf die Wirbelstromverluste aus Blech geschichtet sein, wobei heute durchwegs kornorientierte Bleche verwendet werden. Die gegenseitige Isolation wird mit einer dünnen Keramiksicht erstellt, die bereits während des Auswalzens der Bleche aufgebracht wird.

19.2.13.2 Wicklungen

Nach der grundsätzlichen Ausführung lassen sich bei Trafos 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.

19.2.13.3 Isolation

Zur Leiterisolation wird meist und vor allem bei Betrieb des Trafos in einem Oelkessel eine Papierumbandalung gewählt. Zwischenisolationen, Abstützung und die Distanzierung erfolgt durch Pressspan, Hartpapier und Holz. Die Beherrschung der teilweise hohen Betriebsspannungen auf möglichst engem Raum stellt hohe konstruktive Anforderungen an die Gestaltung der Trafoisolation. Als Folge von Gewittern oder Schalthandlungen im Netz können überdies stossartige Überspannungen auftreten, die zusätzlich ausgehalten werden müssen und besondere Isolationstechnische Massnahmen erfordert.

19.2.14 Giesharz-Transformator (400kVA, 20kV)

