

Elektrotechnik Grundlagen

Kapitel 84

Wirkungen im magnetischen Feld

2003
Kurt Steudler

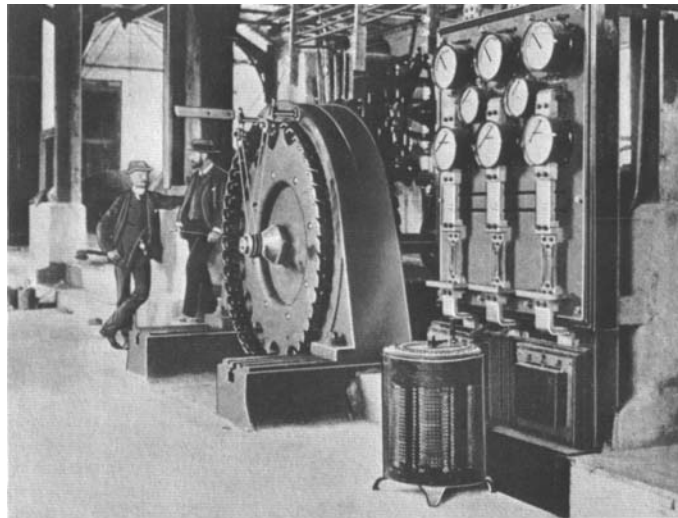
(/ET_84.doc)

Inhaltsverzeichnis

84	Wirkungen im magnetischen Feld.....	4
84.1	Induktionsgesetz und Kraftwirkung	4
	84.1.1 Das Induktionsgesetz.....	4
	84.1.2 Die Kraftwirkung auf einen Leiter im magnetischen Feld	6
	84.1.3 Lorentz – Kraft.....	7
	84.1.4 Hall - Effekt.....	8
84.2	Erzeugung elektrischer Energie.....	10
	84.2.1 Drehende Leiterschleufe im magnetischen Feld	10
	84.2.2 Dreiphasen – Generator.....	11
84.3	Die Selbstinduktionsspannung	13
	84.3.1 Induktivität L	13
	84.3.2 Betrachtung an einer Kreisringsspule.....	14
	84.3.3 Die Ankerrückwirkung beim Generator	14
84.4	Induktivität und magnetische Kopplung	15
	84.4.1 Lange gerade Spule.....	15
	84.4.2 Näherungsformel für gerade Spule.....	16
	84.4.3 Ferromagnetisches Material im Feldraum	16
	84.4.4 Die magnetische Kopplung	17
	84.4.5 Gegeninduktivität	18
	84.4.6 Nutz- oder Hauptflüsse und Streuflüsse	19
84.5	Transformatoren	20
	84.5.1 Der ideale Transformator	20
	84.5.2 Der reale Transformator.....	22
	84.5.3 Frequenzgang des realen Transformators.....	23
	84.5.4 Hysterese-, Kupfer- und Wirbelstromverluste	24
	84.5.5 Messung der Transformatorverluste	26
	84.5.6 Wirkungsgrad des realen Transformators.....	27
84.6	Energie und Kraft im magnetischen Feld.....	27
	84.6.1 Energiespeicher Induktivität.....	27
	84.6.2 Magnetische Feldenergie.....	28
	84.6.3 Innere Induktivität eines runden Drahtes	28
	84.6.4 Kraft im Luftspalt	29
	84.6.5 Kraftwirkung durch Wirbelströme.....	30
	84.6.6 Der Wirbelstrommotor	32
84.7	Elektrische Maschinen.....	33
84.8	Anhang	35
	84.8.1 Beispiele zum Induktionsgesetz.....	35
	84.8.2 Berechnen eines Transformators.....	37
	84.8.3 Tabellen	40
	84.8.4 Berechnung einer Drossel	52
84.9	Verzeichnisse	53

Literaturverzeichnis und Software

- L 84-1 Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, The Feynman Lectures on Physics, mainly electromagnetism and matter, Addison-Wesley Publishing Company, Reading (Massachusetts), Palo Alto, London.
- L 84-2 Frohne Heinrich, Fricke Hans, Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart – Leipzig, 1976, ISBN 3-519-26400-5.
- L 84-3 Gren Joachim und Krause Joachim, Metzler Physik, Verlag Schroedel, Hannover, 1998, ISBN 3-507-10700-7.
- L 84-4 Hanncke Werner, Kleintransformatoren und Eisendrosseln, Vogel – Verlag Würzburg.
- L 84-5 Küpfmüller Karl, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1973, ISBN 3-540-06021-9.
- L 84-6 Hagmann Gert, Grundlagen der Elektrotechnik, AULA Verlag Wiesbaden, Auflage 3, ISBN 3-89104-506-9.
- L 84-7 Lüscher Edgar, Experimentalphysik II, Hochschultaschenbücher BI 115/115a, Bibliographisches Institut, Mannheim.
- L 84-8 MATHCAD® 2000. Mathematiksoftware, die sich für numerische Rechnungen und Laborauswertungen eignet.
- L 84-9 Meinke H., Gundlach Friedrich Wilhelm, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Studienausgabe in 3 Bänden, Springer Verlag Berlin – Heidelberg – New York, 1986, 4. Auflage, ISBN 3-540-15394-2.
- L 84-10 Schilt Heinz, Elektrizitätslehre, Birkhäuser Verlag, Basel, 1959.
- L 84-11 Tabellenbuch Informations- und Telekommunikationstechnik, Verlag Dr. Max Gehlen, Bad Homburg vor der Höhe, 1998, ISBN 3-441-92102-x.



Kraftwerk in Lauffen 1891 mit der Schalttafel und dem Drehstrom-Generator der Maschinenfabrik Oerlikon

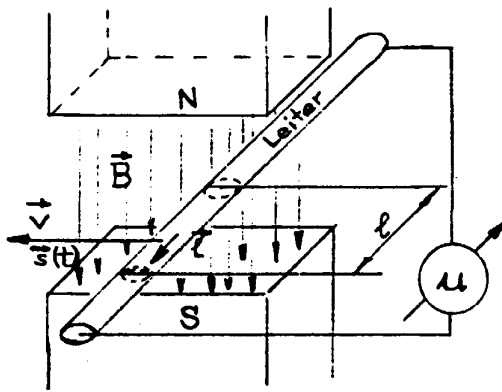
84 Wirkungen im magnetischen Feld

Dank der ferromagnetischen Eigenschaften vieler Stoffe (Eisen) lassen sich mit geringem Energieaufwand (Erregung) starke magnetische Felder erzeugen, die eine wirksame Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie und umgekehrt erlauben.

84.1 Induktionsgesetz und Kraftwirkung

84.1.1 Das Induktionsgesetz

Wir betrachten folgende Situation



In einem homogenen magnetischen Feld mit der magnetischen Flussdichte \vec{B} befinde sich ein Leiterstück \vec{l} .

Fig. 84-1 Leiter im magnetischen Feld

Wir beobachten die Spannung an den Enden des Leiterstückes und stellen fest, dass an den Enden des Leiterstückes eine Spannung entsteht, wenn der Fluss $\Phi = \Phi(t)$ eine zeitabhängige Grösse ist. Durch den zeitabhängigen Fluss wird im Leiterstück eine Spannung induziert und es gilt

$$u_{\text{induziert}} = u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad 1,2 \quad (84-1)$$

Wegen $\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A} (= \vec{B} \cdot \vec{A})$ können $B = B(t)$ oder $A = A(t)$ oder beide Grössen zeitabhängig sein.

Die gegebene Formel lässt sich für ein homogenes Feld³ umformen in

$$u_{\text{ind}}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \vec{A} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (84-2)$$

¹ Induktionsgesetz nach FARADAY

² Michael FARADAY, 22.9.1791-25.8.1867, brit. Physiker und Chemiker, entdeckt das Benzol, die Gesetze der elektromagn. Induktion, den Faraday'schen Käfig, die Elektrolyse, den Diamagnetismus und so weiter.

³ Zum Beispiel im Luftspalt δ eines magnetischen Kreises.

In einem Leiter wird eine Spannung erzeugt (induziert), wenn sich der Leiter in einem zeitlich ändernden magnetischen Feld befindet.

oder in

$$u_{\text{ind}}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (84-3)$$

In einem Leiter wird eine Spannung erzeugt (induziert), wenn sich der Leiter in einem statischen magnetischen Feld bewegt.

Im allgemeinen Fall mit $B = B(t)$ und $A = A(t)$ kommt die Kettenregel zur Anwendung

$$u_{\text{ind}}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \vec{A} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} + \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (84-4)$$

Mit $\vec{A}(t) = \vec{s}(t) \times \vec{\ell}$ und damit $\frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{v}(t) \times \vec{\ell}$ kann gefunden werden

$$u_{\text{induziert}} = \vec{B} \cdot (\vec{\ell} \times \vec{v}) \quad ^4 (84-5)$$

Hier kann die Polarität ⁵ der erzeugten Spannung $u_{\text{induziert}}$ mit der Rechten - Hand - Regel gefunden werden:

Treffen die magnetischen Feldlinien (vom Nordpol her) auf der rechten Handfläche auf, liegt der Leiter in der Richtung der ausgestreckten Finger und zeigt der abgewinkelte Daumen in der Richtung der Bewegung des Leiters, so befindet sich das positive Leiterende bei den Fingerspitzen.

⁴ Spezialfall mit zeitunabhängigem B – Feld.

⁵ In der Literatur wird auch der Ausdruck $u_{\text{ind}} = e = -d\Phi/dt$ verwendet. Dabei wird unter $u_{\text{ind}} = e$ die elektromotorische Kraft, die sogenannte EMK, verstanden.

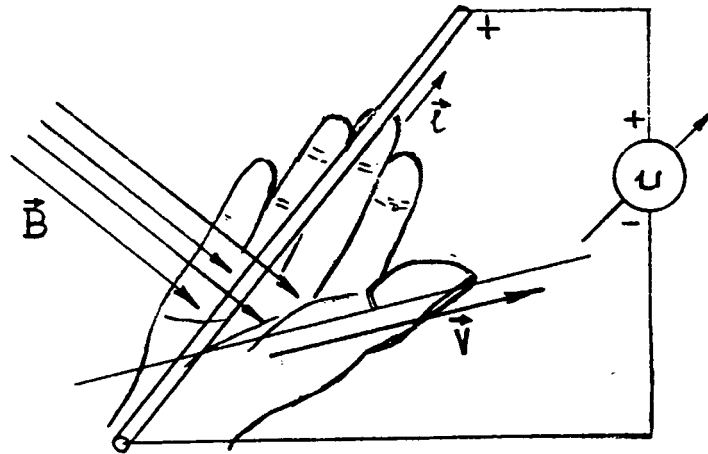


Fig. 84-2 Rechte Hand - Regel

Für maximale Spannung u_{ind} müssen \vec{B} , \vec{l} und \vec{v} je normal aufeinander stehen.

84.1.2 Die Kraftwirkung auf einen Leiter im magnetischen Feld

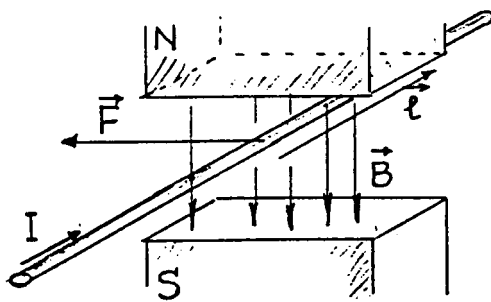


Fig. 84-3 Kraftwirkung auf Leiter

In einem magnetischen Feld mit der Flussdichte \vec{B} befindet sich ein Leiter mit der Länge \vec{l} , der vom Strom I durchflossen wird.

Auf den stromdurchflossenen Leiter im Feld wirkt eine Kraft:

$$\vec{F} = (\vec{l} \times \vec{B}) \cdot I \quad ^6 (84-6)$$

Für die Bestimmung der Richtung der Kraft dient die Linke - Hand - Regel. Treffen die Feldlinien des Flussdichtefeldes auf die linke Hand - Innenfläche und zeigen die Finger in die Richtung des Stromes, dann wirkt die Kraft in der Richtung des Daumens der linken Hand.

⁶ Der Strom I und die Flussdichte B können auch zeitabhängige Größen sein $i(t)$ und $B(t)$ sein.

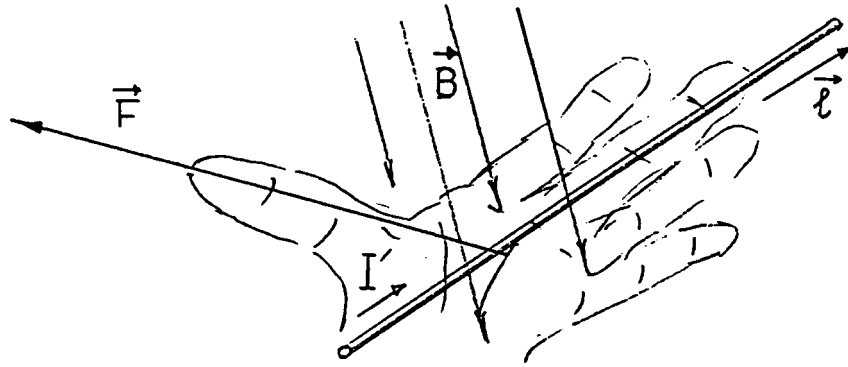


Fig. 84-4 Linke Hand - Regel

Wird das Leiterstück in Fig. 84-1 mit einem Widerstand belastet, verursacht die induzierte Spannung einen induzierten Strom. Dieser Strom bewirkt im Leiterstück nach Fig. 84-5 eine Kraft. Diese Kraft F ist der Bewegungsrichtung v des Leiterstückes entgegengesetzt.^{7, 8}

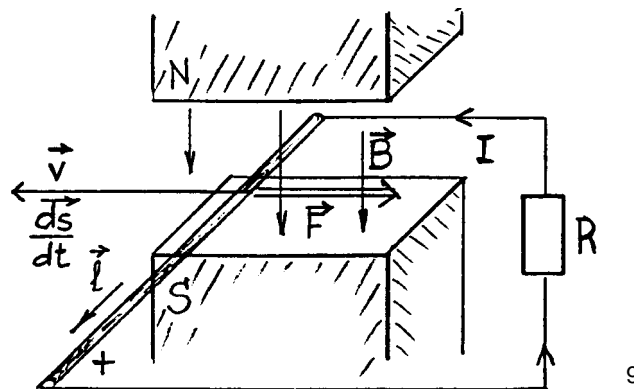


Fig. 84-5 LENZ' sche Regel

84.1.3 Lorentz – Kraft

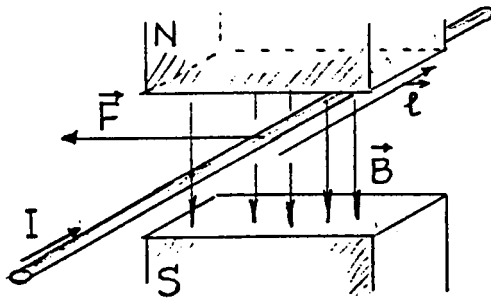
Die Kraft auf einen einzelnen bewegten Ladungsträger in einem magnetischen Feld nennt man Lorentz – Kraft F_L .¹⁰

⁷ Dieser Tatbestand wird auch LENZ' sche Regel genannt. Die Regel ist eine besondere Formulierung des Energiesatzes.

⁸ Heinrich Friedrich LENZ, 12.2.1804-10.2.1865, deutscher Physiker. Untersuchungen über elektrische Induktion (Lenz' sche Regel).

⁹ LENZ wiederholte viele Experimente von FARADAY und HENRY ohne dass er Kenntnis von deren Arbeiten hatte. Aus der LENZ' schen Regel erklären sich die Ankerrückwirkung am Generator und am Relais.

¹⁰ Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928), niederländischer Physiker. Lorentz wurde in Arnheim geboren und studierte an der Universität von Leiden, wo er 1878 Professor für mathematische Physik wurde. Er entwickelte die elektromagnetische Theorie des Lichtes und die Elektronentheorie der Materie und formulierte auch eine widerspruchsfreie Theorie von Elektrizität, Magnetismus und Licht.



Für die Bestimmung der Kraft auf ein einzelnes Elektron (eine Elementarladung) wird von der nebenstehenden Anordnung ausgegangen.

Betrachtet wird nur das dem Feld ausgesetzte Leiterstück l .

Auf das Leiterstück l wirkt die Kraft $\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$

Fig. 84-6 Kraftwirkung auf bewegte Ladungsträger

Mit $I = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t}$ wird $F = \frac{N \cdot e \cdot B \cdot l}{t}$. N ist die Anzahl freier Elektronen, die in der Zeit t durch das Leiterstück l fließt. Mit der Driftgeschwindigkeit $\vec{v} = \frac{l}{t}$ wird die Kraft auf ein einzelnes Elektron

$$F_L = e \cdot v \cdot B \quad \vec{F}_L = -e \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (84-7)$$

Auf einen Körper mit der Ladung Q , der sich mit der Geschwindigkeit v in einem Magnetfeld B bewegt, wirkt die Kraft

$$\vec{F}_L = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (84-8)$$

84.1.4 Hall - Effekt

Der Hall – Effekt beschreibt die Spannung, die entsteht, wenn einem elektrischen Strom ein magnetisches Feld überlagert wird. Der Effekt beruht auf der Ablenkung der elektrischen Ladungsträger auf Grund der Lorentzkraft¹¹

$$\vec{F} = -e \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Als Reaktion auf die Lorentzkraft entsteht in einer Kupferfolie ein elektrisches Feld E_H , das je senkrecht zur Stromrichtung und zur Feldrichtung gerichtet ist und sich in folgender Form darstellen lässt:

$$\vec{E}_H = R_H \cdot (\vec{j} \times \vec{B}) \quad (84-9)$$

Die Spannung $U_H = E_H \cdot d$ heisst Hallspannung und R_H ist die Hallkonstante.

¹¹ Hall, Edwin Herbert (1855 - 1938), amerikanischer Physiker. Edwin Herbert Hall wurde am 7. November 1855 in Great Falls (später North Gorham), Maine geboren. Mit 24 Jahren hat er (1879) im Laufe seiner Doktorarbeit, auf Anregung von Henry Augustus Rowland (1848-1901), den nach ihm benannten Halleffekt gefunden. Details zum Halleffekt wurden 1880 im „American Journal of Science“ und im „Philosophical Magazine“ veröffentlicht. Von 1881 bis 1921 forschte er in Harvard im Bereich der Thermoelektrizität. Er verstarb am 20. November 1938 in Cambridge.

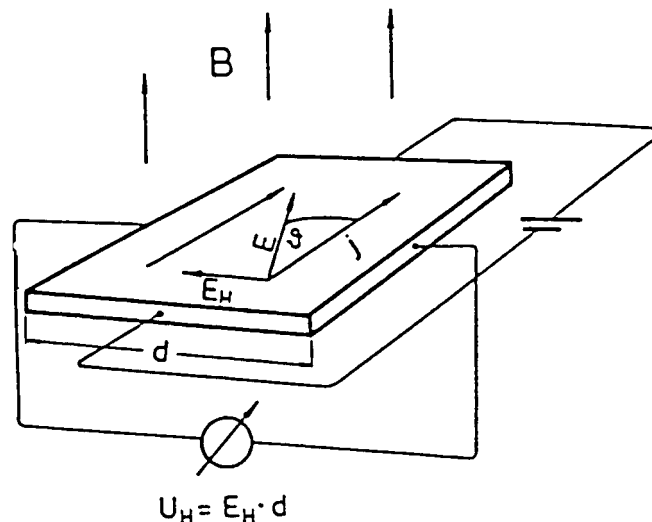


Fig. 84-7 Hall – Spannung in stromdurchflossener Kupferfolie

Der Winkel ϑ zwischen dem elektrischen Feld E und der Stromrichtung j in der Kupferfolie heisst Hallwinkel.

Wegen $F_L = F_{el}$ wird $e \cdot v \cdot B = \frac{e \cdot U_H}{d}$ und daraus $U_H = v \cdot B \cdot d$.

Mit einer Teilchendichte n und dem Volumen V der Kupferfolie wird mit der Foliendicke δ und der Foliengänge ℓ

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{n \cdot V \cdot e}{\Delta t} = \frac{n \cdot \ell \cdot d \cdot \delta \cdot e}{\Delta t} = n \cdot d \cdot \delta \cdot e \cdot v \quad \text{und daraus} \quad v = \frac{I}{n \cdot d \cdot \delta \cdot e}$$

Damit werden die Hallspannung und die Hallkonstante

$$U_H = \frac{1}{n \cdot e} \cdot \frac{I \cdot B}{\delta} \quad R_H = \frac{1}{n \cdot e} \quad (84-10)$$

Die Hallkonstante R_H gibt Auskunft über das Vorzeichen und die Dichte der Ladungsträger. $1/R_H = n \cdot e$ ist die räumliche Ladungsdichte.

Material	R_H in m^3/C	u in m^2/Vs
Kupfer	$- 5,3 \cdot 10^{-11}$	$+ 3,1 \cdot 10^{-3}$
Silber	$- 8,9 \cdot 10^{-11}$	$+ 5,6 \cdot 10^{-3}$
Bismut	$- 5,0 \cdot 10^{-7}$	$+ 4,0 \cdot 10^{-1}$
Indium-Arsenid	$- 1,0 \cdot 10^{-4}$	$+ 2,7$
Cadmium	$+ 6,0 \cdot 10^{-11}$	$- 0,8 \cdot 10^{-3}$
Zink	$+ 1,0 \cdot 10^{-10}$	$- 1,7 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 84-1 Hallkonstante

In der Tabelle beschreibt u die Beweglichkeit der Ladungsträger mit $u = v/E$

Anwendungen:

Die Hall – Spannung U_H ist proportional zur magnetischen Flussdichte B . Daher lässt sich B mit einer Hallsonde messen. Bekannt sind auch berührungslose Abstandsensoren und kontaktlose Schalter.

84.2 Erzeugung elektrischer Energie

84.2.1 Drehende Leiterschleife im magnetischen Feld

In einem homogenen magnetischen Feld befinde sich eine rechteckförmige Leiterschleife, die längs ihrer Mittelachse im Feld gedreht werden kann (Winkel α).

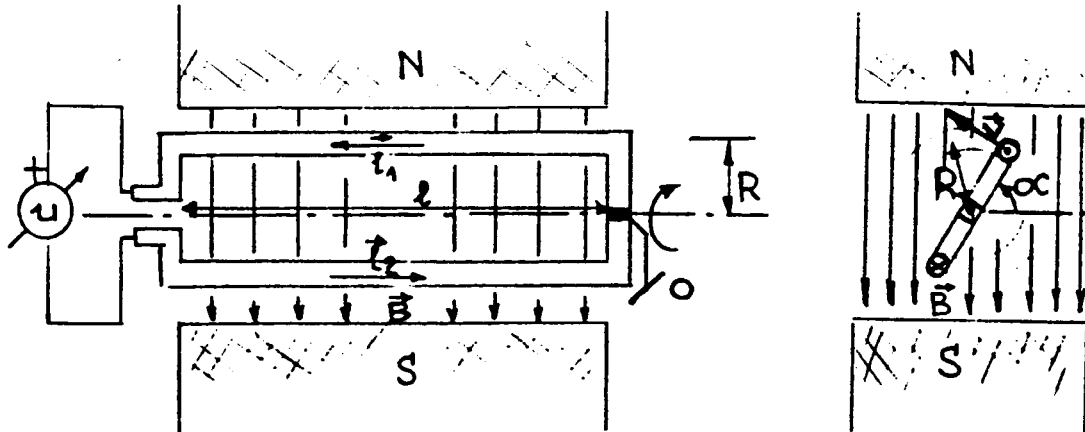


Fig. 84-8 Erzeugung elektrischer Energie

Im \vec{B} -Feld befinden sich die beiden Leiterstücke \vec{l}_1 und \vec{l}_2 in denen durch die Drehung der Leiterschleife je eine Spannung u_1 und u_2 induziert werden. Die beiden Teilspannungen addieren sich zur Gesamtspannung $u = u_1 + u_2$.

Betrachten wir die induzierte Spannung u_1 am Leiterstück \vec{l}_1 , wird

$$u_1 = \vec{B} \cdot (\vec{l}_1 \times \vec{v}) = \vec{B} \cdot \left(\vec{l}_1 \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right), \text{ worin } \vec{r}(t) = R \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} \quad 12$$

$$u_1 = B \cdot l_1 \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

und daraus

$$u = u(t) = B \cdot l \cdot 2R \cdot \omega \cdot \sin \omega t = B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t \quad 13 \quad (84-11)$$

¹² Die Leiterschleife drehe sich gleichmässig. Für eine gleichförmige Bewegung ist $\alpha(t) = \omega t$.

¹³ A ist die von der Leiterschleife gebildete Fläche. Die Fläche A ist mit dem Fluss Φ verketet.

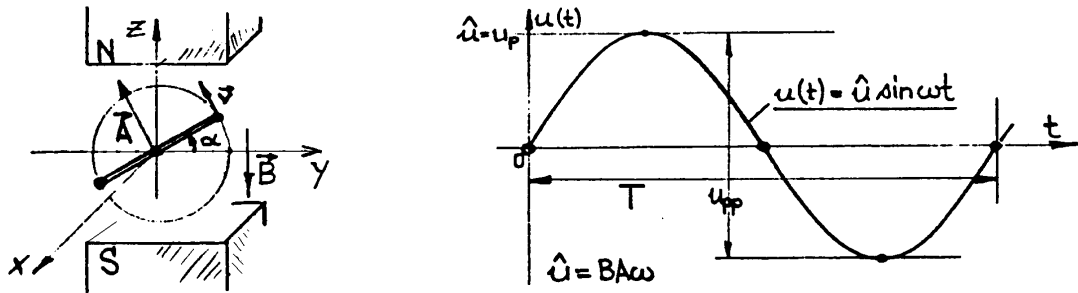


Fig. 84-9 Sinusförmiger Spannungsverlauf

Die induzierte Spannung $u = u(t)$ ergibt sich aus der zeitlichen Änderung des mit der Windung verketteten Flusses Φ . Vom Feld durchdrungen ist die Fläche $A(t) = A \cdot \cos \omega t$. Damit wird $\Phi(t) = -B \cdot A \cdot \cos \omega t$.

84.2.2 Dreiphasen – Generator

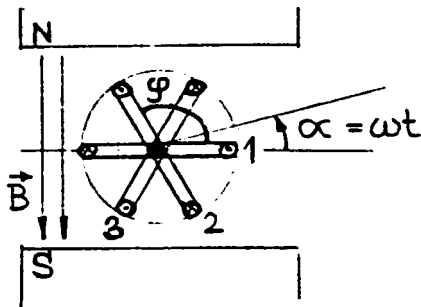


Fig. 84-10 Dreiphasen - Generator

Drei Leiterschleifen werden je um den Winkel $\varphi = \frac{2\pi}{3}$ zueinander versetzt und in einem homogenen magnetischen Feld gedreht. Damit lassen sich drei zueinander phasenverschobene induzierte Spannungen u_{ind1} , u_{ind2} und u_{ind3} erzeugen.

Werden die Enden der drei Leiterschleifen separat geführt (sechs Leitungen), sprechen wir von einem unverketteten Dreiphasensystem.¹⁴

Von praktischer Bedeutung ist das verkettete Dreiphasensystem, das Drehstromsystem.

¹⁴ Das unverkettete Dreiphasensystem wird in der Praxis kaum verwendet. Dagegen gelangt das unverkettete Zweiphasensystem mit $\varphi = \pi$ zum Einsatz.

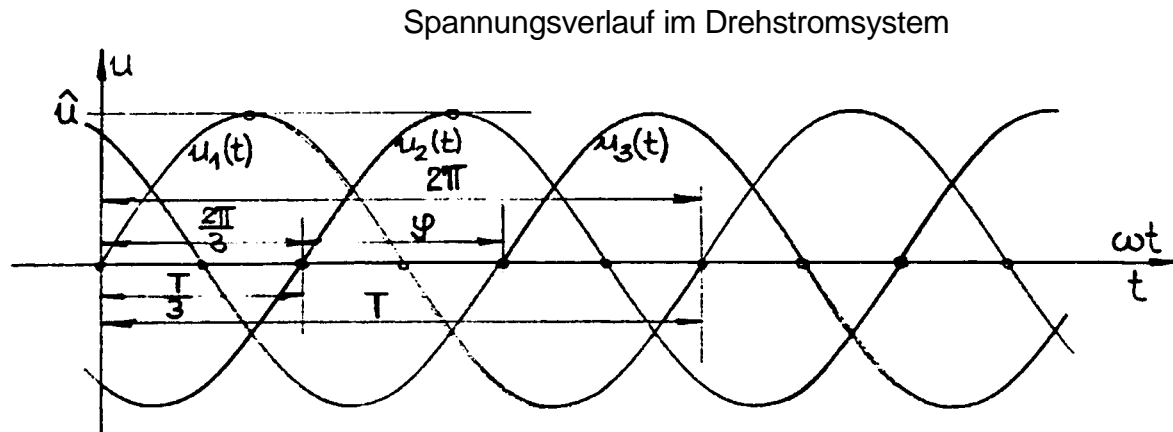


Fig. 84-11 Spannungsverlauf im Drehstromsystem

Die Verkettung bietet den Vorteil, dass bei gleichmässiger Verteilung der Last kein oder nur ein dünner Mittenleiter (Verbindungsstelle der Leiterschlaufenenden) geführt werden muss. Für den Transport der Energie sind nur die drei Aussenleiter nötig.¹⁵

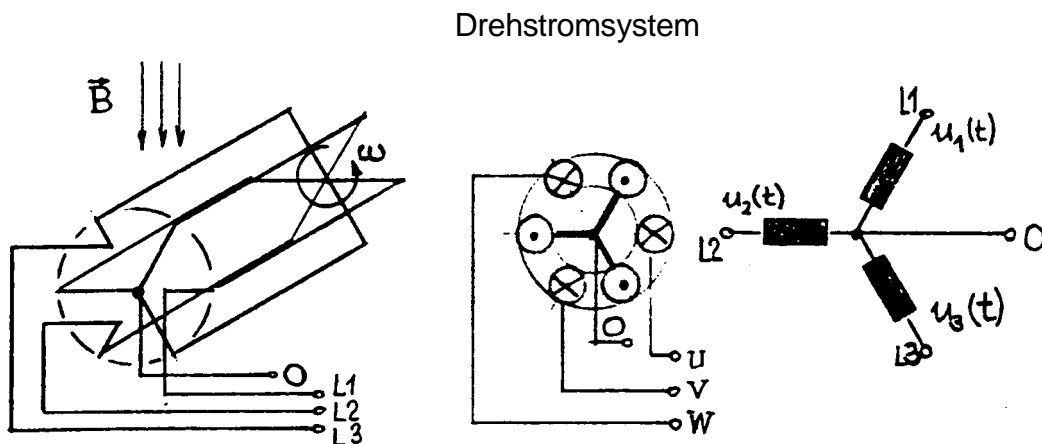


Fig. 84-12 Drehstromsystem

Drehstromsysteme können in der Sternschaltung oder in der Dreieckschaltung betrieben werden.¹⁶

Zwischen den Aussenleitern herrscht die Aussenleiterspannung. Die Spannung zwischen einem Aussenleiter und dem Mittelpunkt heisst Strangspannung, Aussenleiter-Mittelpunktspannung (Phasenspannung, Live).

Im Drehstromnetz gilt:

$$\text{Aussenleiterspannung} = \sqrt{3} \cdot \text{Strangspannung} \quad ^{17} (84-12)$$

¹⁵ Der gemeinsame Mittenleiter heisst Neutralleiter N (hellblau). Die drei Aussenleiter sind mit L1, L2 und L3, bzw. U, V und W bezeichnet (DIN 42 400). Zudem wird ein Schutzleiter geführt (PE, gelbgrün).

¹⁶ Im Gegensatz zur Stern-Anordnung ist es in der Dreieckschaltung nicht möglich, den Neutralleiter N zu führen.

¹⁷ Die Strangspannung beträgt 230 V und die Aussenleiterspannung 400 V je effektiv, was zu Spitzenspannungen von 325 V beziehungsweise 566 V führt; dies bei einer Frequenz von 50 Hz.

Spannung und daraus Energie erzeugende Maschinen nennen wir **Generatoren**. Sobald die einzelnen Leiterschleifen (Wicklungen) eines Generators belastet werden, wirkt wegen einer Kraft auf die treibende Achse. Damit in einem Verbraucher Energie umgesetzt werden kann, muss beim Generator Energie aufgewendet werden (Energieträger: Wasser, Atom, Kohle, Erdöl, Sonne).¹⁸

84.3 Die Selbstinduktionsspannung

84.3.1 Induktivität L

Nach dem Gesetz von BIOT - SAVART^{19, 20} wird ein Strom I oder $i(t)$ von einem magnetischen Feld begleitet. Der Strom verursacht ein magnetisches Feld. Verändert sich der Strom in der Zeit mit $i = i(t)$, verändert sich auch das magnetische Feld in der Zeit $H = H(t)$, $B = B(t)$.

Ein sich zeitlich veränderndes magnetisches Feld erzeugt nach dem Induktionsgesetz $u = \frac{d\Phi}{dt}$ eine Spannung u im feldverursachenden, stromführenden Leiter.

Diese Spannung u wird **Selbstinduktionsspannung** genannt.

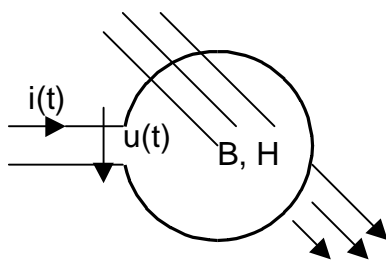


Fig. 84-13 Selbstinduktionsspannung

Mit dem feldverursachenden Strom $i = i(t)$ aus einer idealen Stromquelle wird u proportional zur Ableitung des Stromes, das meint $u = \frac{d\Phi}{dt} \propto \frac{di(t)}{dt}$.

Allgemein gilt daher:

$$u = u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (84-13)$$

Der Proportionalitätsfaktor **L** wird als Selbstinduktion, Selbstinduktionskoeffizient oder **Induktivität** bezeichnet und in HENRY, abgekürzt H gemessen.^{21, 22}

¹⁸ Der Wirkungsgrad einer energieerzeugenden Anlage ist vom Energieträger abhängig.

¹⁹ Jean-Baptiste BIOT, 21.4.1774-3.2.1862, französischer Physiker. Arbeiten in Optik (Lichtbrechung und Polarisation) und Elektromagnetismus.

²⁰ Félix SAVART, 30.6.1791-16.3.1841, französischer Physiker. Arbeiten auf dem Gebiet des Elektromagnetismus.

²¹ Joseph HENRY, 17.12.1797-13.5.1878, amerikanischer Physiker. Entscheidender Beitrag zur Morse-Telegraphie, entdeckt die Selbstinduktion (1830).

²² $[L] = \text{HENRY} = \text{H} = \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} = \Omega \cdot \text{s}$.

84.3.2 Betrachtung an einer Kreisringspule

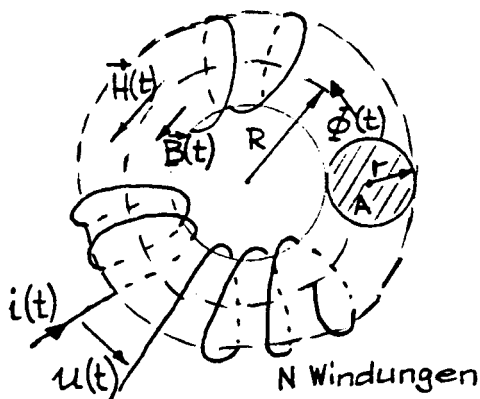


Fig. 84-14 Selbstinduktionskoeffizient einer Kreisringspule

Der Fluss $\Phi = \Phi(t)$ ergibt sich zu

$$\Phi(t) = B(t) \cdot A = \frac{\mu \cdot A}{\ell} \cdot N \cdot i(t) = \Lambda \cdot N \cdot i(t)$$

Es wird angenommen, dass in der Spule ein homogenes B - Feld herrscht.

Daraus wird die pro Windung induzierte Spannung u_W zu

$$u_W(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \Lambda \cdot N \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Die an den Wicklungsenden hervorgerufene Spannung wird $u = N \cdot u_W$ und damit

$$u(t) = N \cdot u_W(t) = \Lambda \cdot N^2 \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (84-14)$$

$$L = \Lambda \cdot N^2 = \frac{\mu \cdot A}{\ell} \cdot N^2 \quad \text{und} \quad L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad (84-15)$$

84.3.3 Die Ankerrückwirkung beim Generator

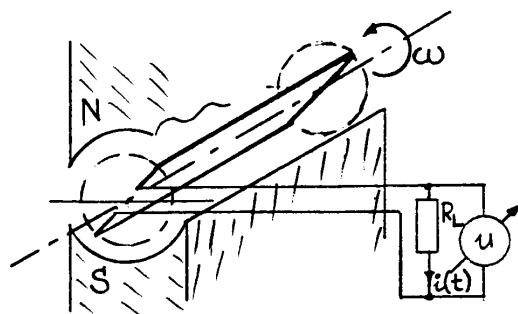


Fig. 84-15 Ankerrückwirkung

Werden die Anschlüsse eines Generators belastet, fließt durch die spannungserzeugenden Windungen ein Strom $i(t)$, der wiederum ein magnetisches Feld erzeugt.

Dieses Feld $B(t)$ seinerseits induziert in den Windungen des Generators eine Spannung, die der ursprünglichen Spannung entgegengesetzt ist.

An den Klemmen des belasteten Generators steht daher eine kleinere Spannung zur Verfügung als an den Klemmen des unbelasteten Generators. Dieser Effekt wird Ankerrückwirkung genannt.

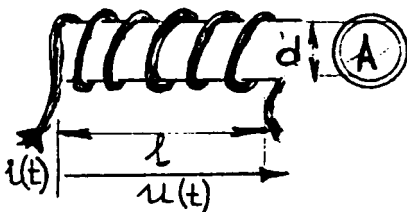
84.4 Induktivität und magnetische Kopplung

84.4.1 Lange gerade Spule

Der Selbstinduktionskoeffizient L wird meist **Induktivität L** genannt. Die Induktivität L ergibt sich aus dem Induktionsgesetz beziehungsweise aus dem Gesetz für die Selbstinduktionsspannung.

$$u = u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (84-16)$$

Die Induktivität L wurde von HENRY an der geraden Spule mit N Windungen gefunden.



In der geraden, eng bewickelten Spule mit $l \gg d$ sind praktisch alle N Windungen mit dem gleichen Fluss Φ verkettenet.

Der Fluss Φ in der Spule werde erzeugt vom Strom $i(t)$. Nach dem Induktionsgesetz erzeugt der zeitabhängige Fluss $\Phi(t)$ in jeder Windung eine Spannung u_W .

Fig. 84-16 Lange, gerade Spule

Mit $\Phi(t) = B(t) \cdot A = \mu \cdot H(t) \cdot A = \mu \cdot \frac{N \cdot i(t)}{l} \cdot A$ ²³
 wird $u_W = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{\mu \cdot A}{l} \cdot N \cdot \frac{di(t)}{dt} = \Lambda \cdot N \cdot \frac{di(t)}{dt}$

Die Spannung u_W wird in jeder Windung induziert; die N Windungen liegen in Serie, so dass die gesamte induzierte Spannung an den Spulenenden zu $u_{\text{ind}} = u = N \cdot u_W$ wird:

$$u(t) = N \cdot u_W(t) = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \Lambda \cdot N^2 \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$L = \Lambda \cdot N^2 = \frac{\mu \cdot A}{l} \cdot N^2 \quad \text{und} \quad L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad (\text{vgl. 84.3})$$

Die Selbstinduktionsspannung u und damit die Induktivität L ergeben sich aus der Anwendung des Induktionsgesetzes.

Die Induktivität L ist aus den geometrischen Abmessungen der Spule und den Materialeigenschaften des Feldraumes bestimmt.

Die Induktivität ist nur dann konstant, wenn der magnetische Leitwert Λ ²⁴ der gegebenen Anordnung konstant ist.

²³ Gilt nur für Zylinderspulen mit $l \gg d$, in denen das H-Feld einigermaßen homogen ist.

²⁴ Der magnetische Leitwert Λ hat die Dimension $\text{Tm}^2\text{A}^{-1} = \text{VsA}^{-1} = \Omega\text{s} = [\text{L}]$

84.4.2 Näherungsformel für gerade Spule

Für die Berechnung der Induktivität L gelten **näherungsweise** folgende „Faustformeln“ mit

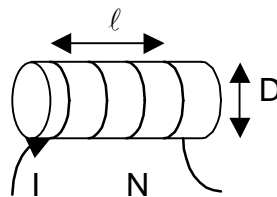
$$L = \frac{D^2}{457 \cdot D + 1016 \cdot \ell} \cdot N^2 ; \quad \frac{D}{\ell} < 2,5$$

$$\begin{aligned} [D] &= \text{mm} \\ [\ell] &= \text{mm} \\ [L] &= \mu\text{H} \end{aligned} \quad \text{I}$$

und

$$L = \frac{(D \cdot \pi)^2}{\ell \cdot \left(1 + 0,45 \cdot \frac{D}{\ell} - 0,003 \cdot \frac{D^2}{\ell^2} \right)} \cdot N^2 ; \quad 0 < \frac{D}{\ell} < 30$$

$$\begin{aligned} [D] &= \text{cm} \\ [\ell] &= \text{cm} \\ [L] &= \text{nH} \end{aligned} \quad \text{II}$$



84.4.3 Ferromagnetisches Material im Feldraum

In ferromagnetischem Material ist μ_r nicht konstant, sondern abhängig von der magnetischen Feldstärke H , die ihrerseits vom erzeugenden Strom I oder $i(t)$ abhängt. Die relative Permeabilität μ_r als Verhältnis von B zu $\mu_0 H$ wird damit ihrerseits zeitabhängig. Mit $\mu_r = \mu_r[i(t)]$ wird allgemein

$$L = \mu_0 \cdot \left[\frac{d\mu_r(i)}{di} \cdot i + \mu_r(i) \right] \cdot \frac{A}{\ell} \cdot N^2 \quad (84-17)$$

Für praktische Anwendungen ist die Formel kaum zu gebrauchen.²⁵

Für praktische Anwendungen eher geeignet ist folgende Betrachtung:

Ausgehend von $u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}$ und $H = \frac{N \cdot i}{\ell}$ wird

$$L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} = N \cdot A \cdot \frac{dB}{di} = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dH} \cdot \frac{dH}{di} = N^2 \cdot \frac{A}{\ell} \cdot \frac{dB}{dH} = \frac{\mu_d \cdot A}{\ell} \cdot N^2 \quad (84-18)$$

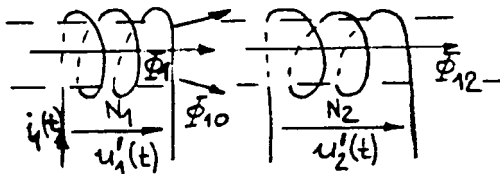
Der Ausdruck $\mu_d = \frac{dB}{dH}$ gibt die Steigung der Magnetisierungskennlinie, der Kommutierungskurve an. Die Grösse μ_d wird daher **differenzielle Permeabilität** genannt. Die differenzielle Permeabilität ist abhängig von der magnetischen Feldstärke H und damit vom erzeugenden Strom I oder $i(t)$.

²⁵ Die Funktion $\mu_r = \mu_r[i(t)]$ ist materialabhängig und durch Ablesen vieler Werte aus der Magnetisierungskennlinie oder aus Messungen zu erfahren, was unmittelbar keine mathematisch geschlossenen Formen ergibt.

$$\mu_d = \mu_d[i(t)] \quad \text{und damit} \quad L = L[i(t)] = \frac{\mu_d[i(t)] \cdot A}{\ell} \cdot N^2 \quad (84-19)$$

Einerseits lässt sich mit ferromagnetischem Material die Induktivität L stark vergrößern. Andererseits bleibt zu beachten, dass sich die Induktivität L mit Eisenkern in ihrem Wert verändert; dies wegen des nichtlinearen $B - H$ - Zusammenhanges.

84.4.4 Die magnetische Kopplung



Sind zwei Spulen so nahe beieinander angeordnet, dass der in einer Spule durch $i_1(t)$ erzeugte Fluss $\Phi_1(t)$ auch die andere Spule teilweise durchdringt, sind die beiden Spulen magnetisch gekoppelt.

In diesem Fall erzeugt der aus $\Phi_1(t)$ in der zweiten Spule bewirkte Teilfluss $\Phi_{12}(t)$ eine induzierte Spannung u_2 .

Fig. 84-17 Magnetische Kopplung

Diese Spannung u_2 wird als Spannung der Gegeninduktion bezeichnet. Als Gegeninduktion gilt jeweils die Wirkung in der gegenüberliegenden Spule.

Eine formale Betrachtung zeigt folgendes. Der Strom $i_1(t)$ durch die Spule 1 induziert an der Spule 1 die Spannung u_1

$$u_1'(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1(t)}{dt} = \Lambda_1 \cdot N_1^2 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \quad (84-20)$$

Je nach der Anordnung durchdringt ein mehr oder weniger grosser Teil des Flusses Φ_1 die Spule 2. Diesen Teil nennen wir Φ_{12} ; er ist geringer oder höchstens gleich gross, wie der Fluss Φ_1 , was wir mit dem Kopplungsfaktor k ausdrücken:²⁶

$$\Phi_{12}(t) = k_{12} \cdot \Phi_1(t) \quad , \quad \text{worin } k_{12} \leq 1$$

Die Spannung u_2 der Gegeninduktion, das heisst die an der Spule 2 induzierte Spannung

$$u_2'(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_{12}(t)}{dt} = N_2 \cdot k_{12} \cdot \frac{d\Phi_1(t)}{dt} = N_2 \cdot k_{12} \cdot N_1 \cdot \Lambda_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = N_2 \cdot k_{12} \cdot \frac{u_1'(t)}{N_1} \quad (84-21)$$

Das Verhältnis der beiden vorangehenden Formeln ergibt

²⁶ Jener Teil des Flusses Φ_1 , der nicht in der Spule 2 wirksam wird, hat für die magnetische Kopplung keine Bedeutung. Wir nennen ihn **Streufloss** Φ_{10} mit $\Phi_{10} = (1 - k_{12}) \cdot \Phi_1$.

$$\frac{u_2'}{u_1'} = k_{12} \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (84-22)$$

Dieser Zusammenhang gilt, solange in der Spule 2 kein Strom $i_2(t)$ fließt. Die Spule 2 ist unbelastet.

Lassen wir diese Voraussetzung fallen und durch die Spule 2 den Strom $i_2(t)$ fließen.²⁷ Der Strom $i_2(t)$ bewirkt formal dasselbe, wie der Strom $i_1(t)$. Der Strom $i_2(t)$ erzeugt an der Spule 2 die Selbstinduktionsspannung u_2'' und an der Spule 1 die Gegeninduktionsspannung u_1'' über den Kopplungsfaktor $k_{21} \leq 1$.

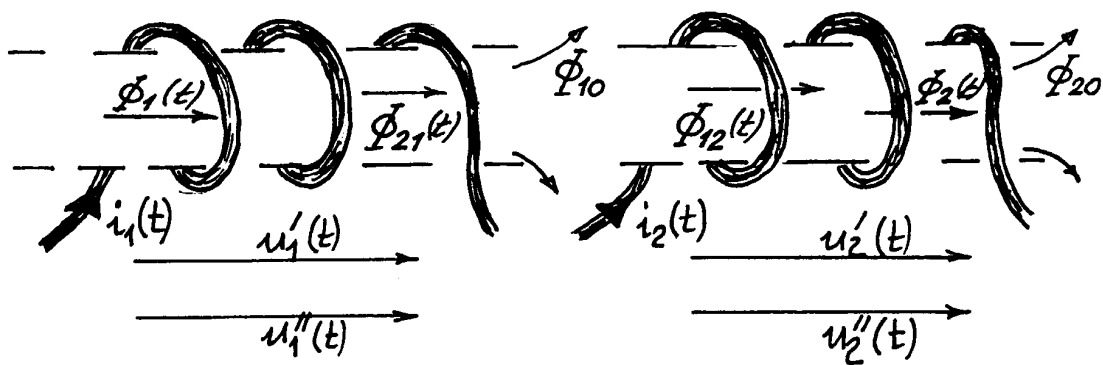


Fig. 84-18 Kopplung gerader Spulen

Formal erhalten wir

$$u_2''(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2(t)}{dt} = \Lambda_2 \cdot N_2^2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \quad (84-23)$$

$$u_1''(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_{21}(t)}{dt} = N_1 \cdot k_{21} \cdot \frac{d\Phi_2(t)}{dt} = \quad (84-24)$$

$$N_1 \cdot k_{21} \cdot N_2 \cdot \Lambda_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = N_1 \cdot k_{21} \cdot \frac{u_2''(t)}{N_2}$$

Setzen wir die beiden Formeln für u_2'' und u_1'' zueinander ins Verhältnis, wird

$$\frac{u_1''}{u_2''} = k_{21} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (84-25)$$

84.4.5 Gegeninduktivität

Für die praktische Anwendung interessieren uns die Spannungen u_1' , u_1'' , u_2' und u_2'' kaum. Sie sind nicht messbar.

Von praktischer Bedeutung sind die Spannungen $u_1(t)$ an der Spule 1 und $u_2(t)$ an der Spule 2, die gemessen werden können.

²⁷ Jede Belastung der Spule 2 hat einen Strom $i_2(t)$ zur Folge.

Für $u_1(t)$ und $u_2(t)$ gelten

$$u_1(t) = u_1' + u_1'' \quad \text{und} \quad u_2(t) = u_2' + u_2''$$

Weiter bedeuten

$$\Lambda_1 \cdot N_1^2 = L_1 \quad \text{und} \quad \Lambda_2 \cdot N_2^2 = L_2 \quad (84-26)$$

In einer gegebenen Anordnung und lineare Verhältnisse vorausgesetzt²⁸, dürfen wir davon ausgehen, dass $k_{12} \cdot \Lambda_1 = k_{21} \cdot \Lambda_2 = k \cdot \Lambda$.

Damit wird $L_{21} = L_{12} = \mathbf{M}$. Die Gegeninduktivität \mathbf{M} hat die gleiche Dimension wie die Induktivität L .²⁹

Sinngemäß ordnen wir daher zu

$$N_1 \cdot k_{21} \cdot N_2 \cdot \Lambda_2 = L_{21} = \mathbf{M} \quad \text{und} \quad N_2 \cdot k_{12} \cdot N_1 \cdot \Lambda_1 = L_{12} = \mathbf{M} \quad (84-27)$$

Setzen wir diese Zuordnungen in die oben gegebenen Spannungsbeziehungen ein, werden

$$\begin{aligned} u_1(t) &= L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \mathbf{M} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \\ u_2(t) &= \mathbf{M} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \end{aligned} \quad (84-28)$$

Nehmen wir vereinfachend an, es seien $k_{21} = k_{12} = \mathbf{k}$, wird

$$k^2 = \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2} \quad \text{beziehungsweise} \quad M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (84-29)$$

84.4.6 Nutz- oder Hauptflüsse und Streuflüsse

Als Nutzflüsse oder Hauptflüsse werden der Fluss Φ_{12} und der Fluss Φ_{21} bezeichnet. Diese Flüsse sind jeweils mit beiden Spulen verkettet.

Mit je nur einer Spule verkettet sind die Streuflüsse Φ_{10} und Φ_{20} .

²⁸ Insbesondere sei μ , nicht vom Strom $i(t)$ abhängig.

²⁹ $[M] = [L] = \text{Henry} = H = \text{VsA}^{-1} = \Omega\text{s}$. M steht für „mutual“, engl.: gegenseitig, wechselseitig.

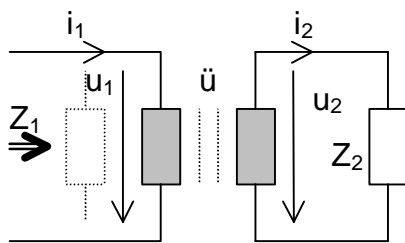
84.5 Transformatoren

84.5.1 Der ideale Transformator

Die vorangehenden Formeln zeigen, dass mit magnetischer Kopplung Spannungen übersetzt, transformiert werden können. Als idealen Transformator bezeichnen wir eine magnetische Kopplung, bei der keine Streuflüsse auftreten und damit $k = 1$ beträgt.³⁰ Es gilt dann

$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2(t)}{i_1(t)} \quad (84-30)$$

Am idealen Transformator übersetzen sich Impedanzen im Verhältnis zum Quadrat der Windungszahlen.



Die Impedanz Z_2 auf der rechten, der Sekundärseite wird von links, der Primärseite her gesehen als $Z_1 = \ddot{u}^2 \cdot Z_2$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (84-31)$$

Fig. 84-19 Idealer Transformator

Für allgemeine Betrachtungen am idealen³² Transformator kann die nachfolgende Figur dienen.

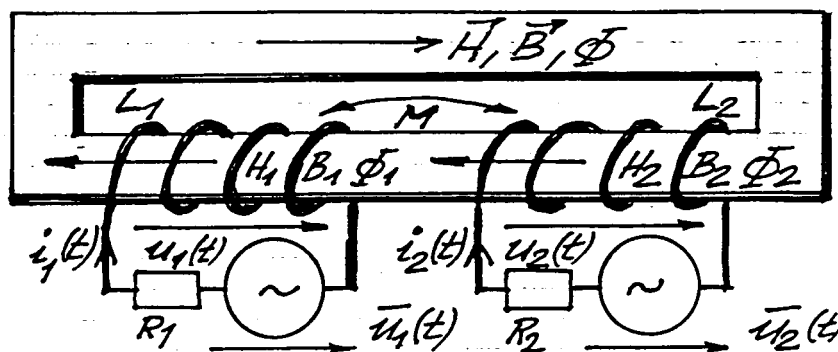


Fig. 84-20 Betrachtung am idealen Transformator

Es gelten die Maschengleichungen

³⁰ Bei kleinem Kopplungsfaktor (k gegen 0) sprechen wir von einer losen Kopplung im Gegensatz zu einer engen oder harten Kopplung, wo k gegen 1 geht.

³¹ Das Stromverhältnis ergibt sich unter der Voraussetzung konstanter Permeabilität μ_r .

³² Der ideale Transformator weist keine Verluste auf und μ_r ist konstant. Die Kopplung ist hart mit $k=1$; wir sprechen von transformatorischer Kopplung.

$$\begin{aligned} R_1 \cdot i_1(t) + L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + M \cdot \frac{di_2(t)}{dt} &= \bar{u}_1 \\ R_2 \cdot i_2(t) + M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} &= \bar{u}_2 \end{aligned} \quad (84-32)$$

Für **sinusförmiges** Signal ergeben sich daraus die beiden Beziehungen

$$\begin{aligned} (R_1 + j \cdot \omega L_1) \cdot i_1 + j \cdot \omega M \cdot i_2 &= \bar{u}_1 \\ j \cdot \omega M \cdot i_1 + (R_2 + j \cdot \omega L_2) \cdot i_2 &= \bar{u}_2 \end{aligned} \quad (84-33)$$

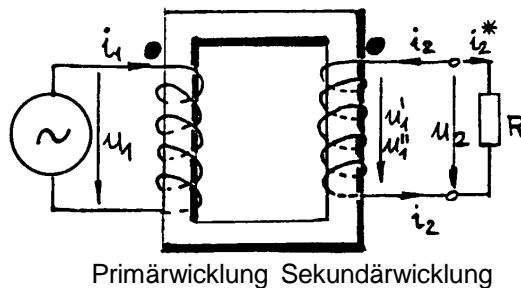
Für die Energieübertragung können die ideale Quelle \bar{u}_2 und der Widerstand R_1 als Kurzschlüsse aufgefasst werden. Es gelten dann

$$\begin{aligned} j \cdot \omega L_1 \cdot i_1 + j \cdot \omega M \cdot i_2 &= \bar{u}_1 = u_1 \\ j \cdot \omega M \cdot i_1 + (R_2 + j \cdot \omega L_2) \cdot i_2 &= 0 \end{aligned}$$

beziehungsweise

$$\begin{aligned} j \cdot \omega L_1 \cdot i_1 + j \cdot \omega M \cdot i_2 &= u_1 \\ j \cdot \omega M \cdot i_1 + j \cdot \omega L_2 \cdot i_2 &= -i_2 \cdot R_2 = u_2 \end{aligned} \quad (84-34)$$

Wird die vorangehende Fig. 84-20 umgezeichnet, zeigt sich



Primärwicklung Sekundärwicklung

Primär- und Sekundärspannung sind gleichphasig. Primär- und Sekundärstrom sind zueinander um den Winkel π verschoben.

Der Transformator wirkt nach links als Verbraucher und nach rechts zu R hin als Erzeuger (Erzeuger - Zählpfeilsystem).

Der Punkt gibt den Wicklungssinn an. Vom Punkt aus wird der gemeinsame Kern im gleichen Sinn umkreist. Die Ströme i_1 und i_2 erzeugen je einen Fluss in der gleichen Richtung.

Fig. 84-21 Transformator

Gemäss unserer Konvention wird auf der Sekundärseite der Strom i_2^* gemessen.³³

Im Fall des Leerlaufes wird $i_2 = 0$ und daraus

$$\frac{u_{20}}{u_{10}} = \frac{M}{L_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (84-35)$$

³³ Der Zählpfeil für i_2^* läuft als Verbraucherstrom-Zählpfeil dem Erzeugerstrom-Zählpfeil entgegen. Allgemein verwenden wir das Verbraucherzählpfeilsystem VZS (DIN 5489).

Im Fall des Kurzschlusses wird $u_2 = 0$ und damit

$$i_{2k} = -i_1(t) \cdot \frac{M}{L_2} = -i_1(t) \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = -i_1(t) \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (84-36)$$

Für sinusförmiges Signal kann die Windungszahl, hergeleitet aus dem Induktionsgesetz, angegeben werden mit

$$N = \frac{U_{\text{eff}}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot A_{\text{Fe}} \cdot B_{\text{Max}}} = \frac{U_{\text{eff}}}{4,44 \cdot f \cdot A_{\text{Fe}} \cdot B_{\text{Max}}} \quad (84-37)$$

84.5.2 Der reale Transformator

Im Gegensatz zum idealen Transformator weist der reale Transformator Verluste auf. Zudem treten Streuflüsse auf, so dass der Kopplungsfaktor kleiner als Eins ist.

Einen guten Überblick zu den Verlusten bietet das Ersatzschaltbild des realen Transformators.

Ersatzschaltbild des realen Transformators

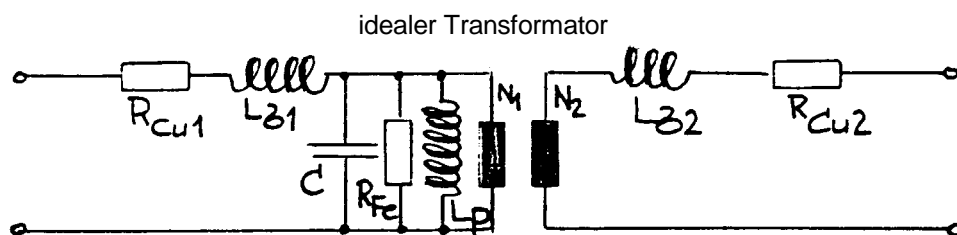


Fig. 84-22 Ersatzschaltbild zum Transformator

Darin bedeuten

$L_{\sigma 1}$	:	primäre Streuinduktivität	)	Streu-	
$L_{\sigma 2}$	:	sekundäre Streuinduktivität	)	verluste	Längs-
R_{Cu1}	:	Kupferwiderstand der Primärwicklung	)	Kupfer-	verluste
R_{Cu2}	:	Kupferwiderstand der Sekundärw.	)	verluste	
R_{Fe}	:	Eisenverluste (Hysterese- und Wirbelstromverluste)	)	Eisen-	Quer-
C	:	Wicklungskapazität	)	verluste	verluste
L_P	:	Hauptinduktivität, Querinduktivität			

Für viele Anwendungen ist das folgende Ersatzschaltbild geeignet:

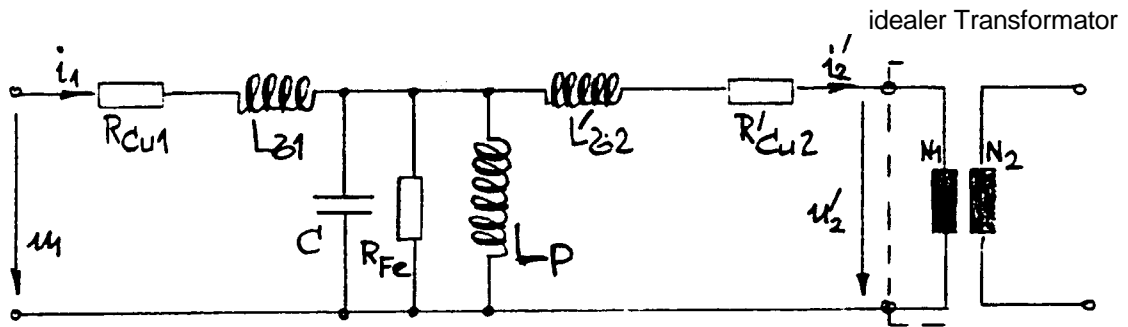


Fig. 84-23 Ersatzschaltbild des realen Transformators

Die Längsverluste der Sekundärseite sind transformiert :

$$L'_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \text{und} \quad R'_{Cu2} = R_{Cu2} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

84.5.3 Frequenzgang des realen Transformators

Aus dem Ersatzschaltbild ist ersichtlich, dass das Verhältnis der Sekundärspannung zur Primärspannung, das Spannungsverhältnis u_2/u_1 frequenzabhängig wird.

Wir unterscheiden die drei Bereiche tiefe (A), mittlere (D) und hohe (B und C) Frequenzen.

Tiefe Frequenzen werden durch $R_{Cu} - L_P$ und hohe Frequenzen durch $R_{Cu} - C, L_{\sigma} - R_{Fe}$ gedämpft. Eine Besonderheit stellt der Bereich C dar, wo $L_{\sigma} - C$ -Resonanzen auftreten.

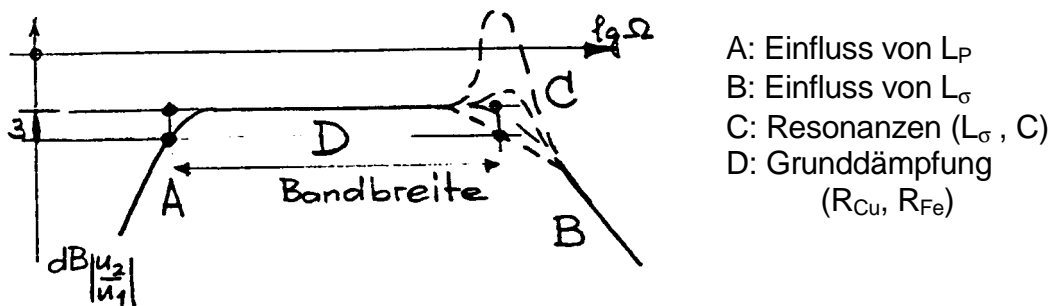


Fig. 84-24 Amplitudengang eines realen Transformators

Netztransformator (Energieübertragung)

Bei fester und eher tiefer Frequenz lässt sich die Kapazität und die Streuinduktivität im allgemeinen vernachlässigen. Dagegen wird darauf zu achten sein, dass die Grenzfrequenz aus der Wirkung $R_{Cu} - L_P$ wesentlich tiefer liegt als die gewählte feste Frequenz.

Zu achten ist auf die Kupferverluste, da diese quadratisch zur Leistung ansteigen.

Tonfrequenzübertrager

Bei Übertragern im Tonfrequenzbereich bis etwa 30 kHz achtet man weniger auf die Verluste und mehr auf einen breiten Amplitudengang. Zur Übertragung hoher Frequenzen und zur Vermeidung von Serieresonanzen mit C, den Wicklungskapazitäten, müssen die Streuverluste L_{σ} möglichst klein gehalten werden.³⁴

84.5.4 Hysterese-, Kupfer- und Wirbelstromverluste.

Hystereseverluste ergeben sich aus der Ummagnetisierung des verwendeten ferromagnetischen Kerns in der Zeit. Aufgrund früherer Ausführungen werden für den Bau von Transformatoren und Übertragern mit Vorteil magnetisch weiche Stoffe verwendet um die Hystereseverluste klein zu halten.

Die Hystereseverluste P_H lassen sich mathematisch geschlossen kaum erfassen. Nach STEINMETZ³⁵ wird für sinusförmige Ströme

$$P_{\text{Hysterese}} = P_H = \eta \cdot \frac{(10^4 \cdot \hat{B})^{1,6}}{10^4} \cdot f \cdot V \quad (84-38)$$

Darin bedeuten

- η eine Materialkonstante:
für unlegierte Dynamobleche: $\eta = 10^{-3}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$
für legierte Dynamobleche: $\eta = 7 \cdot 10^{-4}$ bis 10^{-3}
- \hat{B} die grösste auftretende magnetische Flussdichte in Tesla. Die Formel eignet sich für B - Werte bis 0,7 T.
Für höhere Werte ist es besser $(10^4 \cdot \hat{B})^2$ bis $2,2$ zu setzen.
- f die Frequenz in Hertz
- V das Eisenvolumen in dm^3 (in Liter)

Die Hystereseverluste sind ein Teil der Eisenverluste. Dazu kommen die **Wirbelstromverluste**. Im Transformatorkern treten Wirbelströme auf, die zu Wirbelstromverlusten $P_{\text{Wirbelstrom}} = P_W$ führen.

Jede zeitliche Änderung des magnetischen Flusses Φ führt in einem von diesem durchsetzten Leiter zu einer induzierten Spannung (Induktionsgesetz).

Der Eisenkern des Transformators (Übertragers) stellt einen solchen in sich kurz-

³⁴ Der Streufluss ist von μ , weitgehend unabhängig, da er grossenteils durch die Luft geht. Durch verschachteln und unterteilen der Wicklungen kann der Streufluss vermindert werden.

³⁵ Charles Proteus (Karl August Rudolf) STEINMETZ, 1865 – 1923, 1901: Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena 3 Bde, Hauptbegründer der Wechselstromtheorie. Bei General Electric ebnet er zusammen mit George Westinghouse (1846 – 1914) den Weg für die Verbreitung der Wechselstromtechnik in den USA.

geschlossenen, ausgedehnten Leiter dar; die induzierte Spannung verursacht im ferromagnetischen Material Ströme, die sehr hohe Werte erreichen können und den Transformatorkern erwärmen.

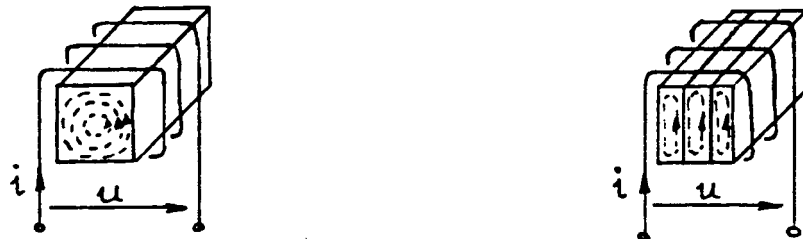


Fig. 84-25 Wirbelstromverluste

Um diese Wirbelstromverluste möglichst gering zu halten, muss der Querschnittswiderstand R_{Fe} des Kernes erhöht werden; die Kerne werden daher aus **isolierten**, legierten Blechen zusammengestellt.³⁶

Wirbelstrom- und Hystereseverluste ergeben zusammen die gesamten Eisenverluste (P_{Fe}).

$$P_{Fe} = P_H + P_W = R_{Fe} \cdot i_\mu^2 \quad (84-39)^{37}$$

Die Wirbelstromverluste können rechnerisch erfasst werden nach der Faustformel

$$P_{\text{Wirbelstrom}} = P_W = 1,64 \cdot \frac{(\hat{B} \cdot \Delta \cdot f)^2}{10^3 \cdot \rho_{Fe}} \cdot V \quad (84-40)$$

Darin bedeuten:

- \hat{B} die maximal auftretende magnetische Induktion in Tesla
- Δ die Blechdicke in mm (oft 0,3 oder 0,5 mm)
- f die Frequenz in Hertz (Hz)
- V das gesamte Eisenvolumen in dm^3 (in Liter)
- ρ_{Fe} spezifische Widerstand des Eisens in $\Omega \cdot \text{m}$
 $\rho_{Fe} = (99 + 120 \cdot p) \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$; p: Siliziumgehalt in % (0 bis 4 %)

³⁶ Die Legierung erhöht den spezifischen Widerstand der Bleche (ρ_{Fe}). Isolation: Papierschicht, Schicht aus Kunstharzlack, Klebelack auf Epoxyd- oder Polyesterbasis oder Oberflächenphosphatierung im Tauchverfahren. Die Bleche werden einseitig isoliert.

³⁷ i_μ bezeichnet den sogenannten Magnetisierungsstrom.

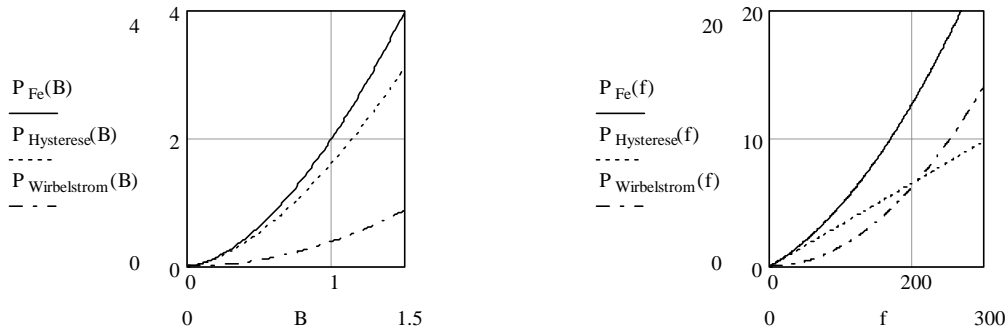


Fig. 84-26 Eisenverluste in Watt pro kg

Die **Kupferverluste** P_{Cu} entstehen an den realen Primär- und Sekundärwicklungen als Wärme.

$$P_{Kupfer} = P_{Cu} = i_1^2 \cdot R_{Cu1} + i_2^2 \cdot R_{Cu2} \quad (84-41)$$

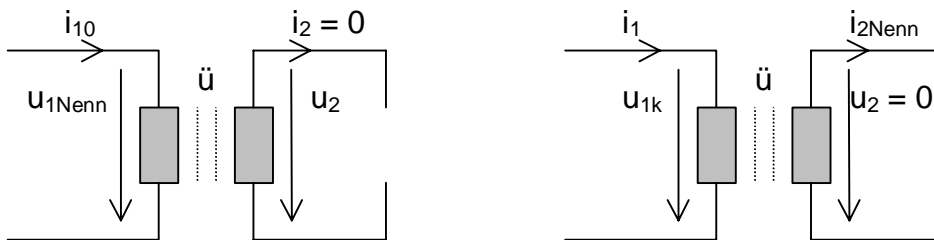


Fig. 84-27 Verlustbehafteter Transformator im Leerlauf und Kurzschluss

84.5.5 Messung der Transformatorverluste

Die gesamten Eisenverluste lassen sich im Leerlaufversuch mit $i_2 = 0$ ermitteln. Die Primärseite wird mit der Nennspannung versorgt. Der so fließende Strom i_{10} darf dem Magnetisierungsstrom i_μ näherungsweise gleichgesetzt werden, da in dieser Anordnung nur geringe Kupferverluste anfallen.

Wird die Sekundärseite des Transformators kurzgeschlossen und die Primärspannung u_1 solange erhöht bis i_2 den Nennwert i_{2Nenn} erreicht, fällt die Kurzschlussleistung P_{1k} an; die dazu erforderliche Spannung u_{1k} wird Kurzschlussleistung genannt. Im Kurzschlussfall können die vorher beschriebenen Eisenverluste vernachlässigt werden.

Aus den beiden Messungen lassen sich die gesamten Verluste P_V ermitteln ³⁸

³⁸ Die angegebene Messmethode eignet sich für Transformatoren > 50VA. Bei kleineren Transformatoren sind in der Leerlaufmessung die Kupferverluste und in der Kurzschlussmessung die Eisenverluste

$$P_{\text{Verluste}} = P_V = P_{\text{Leerlaufversuch}} + P_{\text{Kurzschlussversuch}}$$

84.5.6 Wirkungsgrad des realen Transformators

Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus dem Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Leistung. Wir bezeichnen mit P_V die Gesamtheit der Verlustleistungen. Es gilt dann

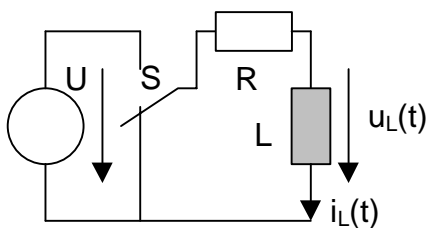
$$\eta = \frac{P_1 - P_V}{P_1} = 1 - \frac{P_V}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_V} = 1 - \frac{P_V}{P_2 + P_V} \quad (84-42)$$

84.6 Energie und Kraft im magnetischen Feld

84.6.1 Energiespeicher Induktivität

Die Induktivität L (Spule, Selbstinduktion) ist ein Energiespeicher. Die gespeicherte Energie ergibt sich aus

$$W(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (84-43)$$



Wird zur Zeit $t_0 = 0$ der Schalter S geschlossen, gelten

$$u_L(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{L}{R} \quad \text{und}$$

$$i_L(t) = I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{mit} \quad I = \frac{U}{R}$$

Fig. 84-28 Energie der Induktivität

Daraus lässt sich die Energie berechnen, die für den Aufbau des magnetischen Feldes in der Induktivität benötigt wird. Diese Arbeit wird

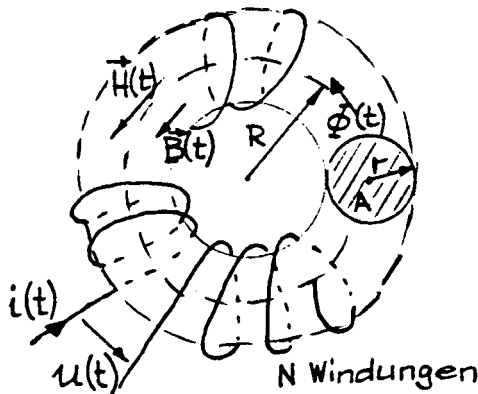
$$W_L = \int_{t=0}^{\infty} u_L(t) \cdot i_L(t) \cdot dt = U \cdot I \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{I^2 \cdot L}{2} \quad (84-44)$$

Aufgabe: Beweisen Sie dieses Ergebnis

te nicht mehr zu vernachlässigen.

³⁹ In gleicher Weise kann die im Kondensator gespeicherte Energie berechnet werden. Aufgabe: Zeigen Sie, dass für den Kondensator gilt $W_C = U^2 C/2$.

84.6.2 Magnetische Feldenergie



In einer Kreisringspule herrscht ein homogenes Feld, wenn $r \ll R$.

Der Fluss $\Phi = \Phi(t)$ ergibt sich zu $\Phi(t) = B(t) \cdot A$

Die insgesamt induzierte Spannung u_{ind} wird zu

$$u_{\text{ind}}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = N \cdot A \cdot \frac{dB(t)}{dt}$$

worin $A = r^2 \cdot \pi$.

Fig. 84-29 Magnetische Feldenergie und Kreisringspule

Die während eines Zeitelements dt im Feld der Spule gespeicherte Energie ergibt sich daraus zu

$$dW = u \cdot i \cdot dt = N \cdot i \cdot A \cdot dB$$

Mit dem Durchflutungsgesetz $N \cdot i = \Theta = H \cdot \ell$ und mit $V = A \cdot \ell$ wird

$$dW = V \cdot H \cdot dB$$

Die im magnetischen Feld gespeicherte Energie ergibt sich daraus zu

$$W = V \cdot \int_0^B H \cdot dB \quad (84-45)$$

und die magnetische Energiedichte zu

$$w = \frac{W}{V} = \int_0^B H \cdot dB \quad (84-46)$$

Bei Materialien mit konstanter, feldunabhängiger relativer Permeabilität μ_r kann wegen $dB = \mu \cdot dH$ integriert werden und es werden

$$W = V \cdot \frac{B \cdot H}{2} = V \cdot \frac{B^2}{2 \cdot \mu} = V \cdot \frac{\mu \cdot H^2}{2}$$

$$w = \frac{B \cdot H}{2} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu} = \frac{\mu \cdot H^2}{2} \quad (84-47)$$

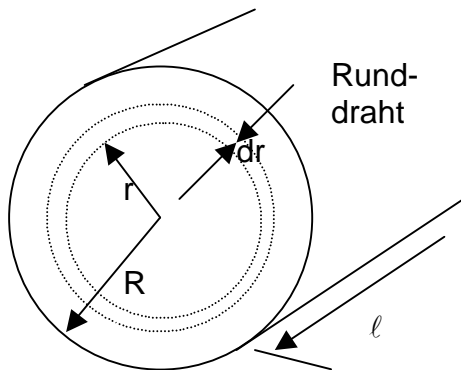
84.6.3 Innere Induktivität eines runden Drahtes

Im Innern eines Leiters mit kreisrundem Querschnitt und dem Radius R gilt

$$H = \frac{i}{2\pi \cdot R^2} \cdot r$$

Ein beliebiger coaxialer Hohlzylinder mit dem Radius r und der Wandstärke dr innerhalb des ℓ langen Drahtes enthält die Energie dW mit

$$dW = V \cdot \frac{\mu \cdot H^2}{2} = 2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \ell \cdot \frac{\mu}{2} \left(\frac{i}{2\pi \cdot R^2} \cdot r \right)^2 = i^2 \cdot \frac{\mu \cdot \ell}{4\pi \cdot R^4} \cdot r^3 \cdot dr$$



Damit wird die im ganzen Draht gespeicherte Energie

$$W = \int_0^R dW = i^2 \cdot \frac{\mu \cdot \ell}{16 \cdot \pi}$$

Weiter gilt für die vom magnetischen Feld aufgenommene Energie

$$W = \frac{L \cdot i^2}{2}$$

Fig. 84-30 Innere Induktivität eines Drahtes

und die innere Induktivität **eines** Drahtes ergibt sich zu

$$L = \frac{\mu \cdot \ell}{8 \cdot \pi} \quad (84-48)$$

Damit wird der innere Induktivitätsbelag L' im magnetisch neutralen Runddraht

$$\frac{L}{\ell} = L'_i = \frac{\mu_0}{8 \cdot \pi} = 50 \text{ nHm}^{-1} \quad (84-49)$$

84.6.4 Kraft im Luftspalt

Wir gehen aus von einem magnetischen Kreis mit dem Luftspalt δ und dem Luftspaltquerschnitt A .

Der Querschnitt $A = a \cdot b$ sei mit $a \gg \delta$ und $b \gg \delta$ so gross, dass eine homogene Verteilung von B_δ über den ganzen Luftspalt angenommen werden darf.

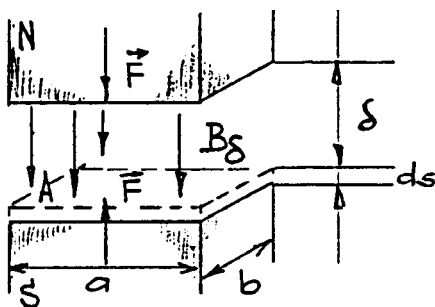


Fig. 84-31 Kraft im Luftspalt

Das untere Eisenteil sei beweglich angeordnet.

Die Verschiebung um das infinitesimale Wegstück ds hat eine Veränderung der magnetischen Weglänge δ zur Folge. (Die Änderung der Weglänge im Eisen sei vernachlässigt).

Es sei F die Kraft, mit der sich die beiden Eisenteile (Anker und Joch) anziehen. Die Flussdichte B ist bewirkt aus einer Spule, die den Strom i führt.

Die Änderung des Luftspaltes δ um ds benötigt Energie. Diese Energie lässt sich einerseits ausdrücken als mechanische Arbeit mit $dW = F \cdot ds$ und andererseits als Energie, die dem magnetischen Feld entnommen wird mit $dW = u \cdot i \cdot dt$.

Darin ist $u = N \cdot d\Phi/dt$ bewirkt aus der Flussänderung, die aus der Wegänderung um ds folgt. Damit wird $dW = N \cdot i \cdot d\Phi = \Theta \cdot d\Phi$.

Aus $\Phi = A \cdot B_\delta$ wird $d\Phi = A \cdot dB_\delta$. Zudem ist $\Theta = \int \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = H_\delta \cdot \delta + \sum_i H_i \cdot \ell_i$

Damit wird $dW = \Theta \cdot d\Phi = (H_\delta \cdot \delta + \sum_i H_i \cdot \ell_i) \cdot A \cdot dB_\delta$ und daraus bei überall gleichem Eisenquerschnitt und ohne Streufelder

$$W = \int dW = \delta \cdot A \cdot \int H_\delta \cdot dB_\delta + \ell_{Fe} \cdot A \cdot \int H_{Fe} \cdot dB_\delta$$

$$W = \int dW = \delta \cdot A \cdot \int \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot dB_\delta + \ell_{Fe} \cdot A \cdot \int \frac{B_\delta}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot dB_\delta$$

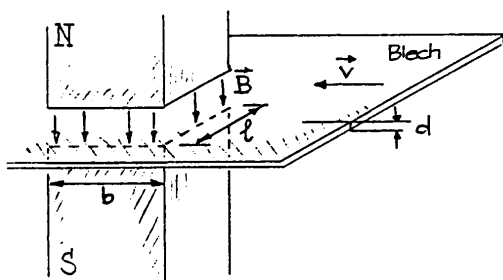
$$W = \delta \cdot A \cdot \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0} + \ell_{Fe} \cdot A \cdot \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0} = W_{\text{Luftspalt}} + W_{\text{Eisen}} \quad (84-50)$$

Mit $W_{\text{Luftspalt}} = \int_0^\delta F \cdot ds = F \cdot \delta = \delta \cdot A \cdot \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0}$ wird die im Luftspalt wirksame Kraft

$$F_{\text{Luftspalt}} = \frac{A \cdot B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (84-51)$$

84.6.5 Kraftwirkung durch Wirbelströme

Wir schieben ein elektrisch leitendes, nicht ferromagnetisches Blech (zum Beispiel Aluminium oder Kupfer) der Dicke d durch ein Magnetfeld mit konstanter Flussdichte B (Luftspalt eines magnetischen Kreises).



Wir denken uns das Blech quer zur Stossrichtung in Streifen geschnitten.

In den so entstehenden, endlich vielen Leitern wird je eine Spannung induziert.

Diese Spannungen sind im Blech kurzgeschlossen (viele kleine Kurzschlussströme).

Fig. 84-32 Dia- oder paramagnetisches Blech im Luftspalt

Die so entstehende Ströme nennen wir Wirbelströme.

Es handelt sich dabei um räumlich verteilte und zeitabhängige Ströme. Eine Berechnung dieser Ströme ist daher sehr aufwendig. Der Bewegung wirkt eine Kraft F entgegen (LENZ Regel).

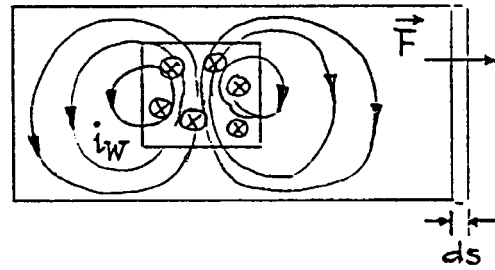


Fig. 84-33 Kraftwirkung durch Wirbelströme

Betrachten wir einen Spezialfall :

Es seien v (Stossgeschwindigkeit) und damit F konstant. Damit wird die Leistung

$$\vec{F} \cdot \frac{d\vec{s}}{dt} = P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Die in den vielen Leitern erzeugte Spannung wird

$$u = \vec{B} \cdot (\vec{\ell} \times \vec{v}) = B \cdot \ell \cdot v$$

Der Widerstand R_δ des Bleches im Luftspalt wird mit $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$ zu

$$R_\delta = \rho \cdot \frac{\ell}{b \cdot d} \quad \text{und der wirksame Widerstand wird} \quad R = k \cdot R_\delta .$$

Mit dem Faktor k werden der ausserhalb des Feldes liegende Widerstandsanteil und die Rückwirkungen der Wirbelströme auf das Magnetfeld berücksichtigt.

Damit werden

$$P = F \cdot v = \frac{u^2}{R} = B^2 \cdot \ell^2 \cdot v^2 \cdot \frac{b \cdot d}{k \cdot \rho \cdot \ell}$$

und daraus

$$F = \frac{\ell \cdot b \cdot d}{k \cdot \rho} \cdot v \cdot B^2 = p_1 \cdot v \cdot B^2 \quad (84-52)$$

Die auf das Blech wirkende Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit v , mit der wir das Blech durch den Luftspalt schieben und proportional zur magnetischen Flussdichte B im Quadrat. Der Proportionalitätsfaktor p_1 und daraus der Korrekturfaktor k lassen sich durch Messung ermitteln.

Wird ein ruhendes Blech einem Feld mit $B(t) = B \cdot \sin \omega t$ ausgesetzt, ergeben sich wiederum Wirbelströme, die das Blech erwärmen (Induktionskochherd).

Mit $u = \frac{d\Phi}{dt} = b \cdot \ell \cdot B \cdot \omega \cdot \cos \omega t$ wird die im Blech verbrauchte Leistung

$$P = \frac{u^2}{R} = \frac{b \cdot d}{k \cdot \rho \cdot \ell} \cdot b^2 \cdot \ell^2 \cdot \frac{B^2}{2} \cdot \omega^2 = p_2 \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (84-53)$$

Die so umgesetzte Leistung ist quadratisch proportional zur Frequenz f und zur Flussdichte B .

84.6.6 Der Wirbelstrommotor

Another form of induction motor is shown in Fig. 16–15. The arrangement shown is not suitable for a practical high-efficiency motor but will illustrate the principle. The electromagnet M , consisting of a bundle of laminated iron sheets wound with a solenoidal coil, is powered with alternating current from a generator. The magnet produces a varying flux of B through the aluminum disc. If we have just these two components, as shown in part (a) of the figure, we do not yet have a motor. There are eddy currents in the disc, but they are symmetric and there is no torque. (There will be some heating of the disc due to the induced currents.) If we now cover only one-half of the magnet pole with an aluminum plate, as shown in part (b) of the figure, the disc begins to rotate, and we have a motor. The operation depends on *two* eddy-current effects. First, the eddy currents in the aluminum plate oppose the change of flux through it, so the magnetic field above the plate always lags the field above that half of the pole which is not covered. This so-called “shaded-pole” effect produces a field which in the “shaded” region varies

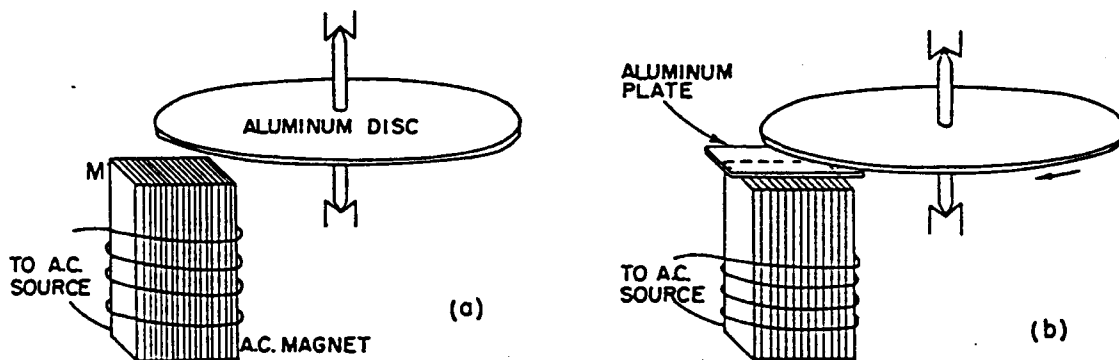


Fig. 16–15. A simple example of a shaded-pole induction motor.

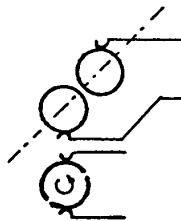
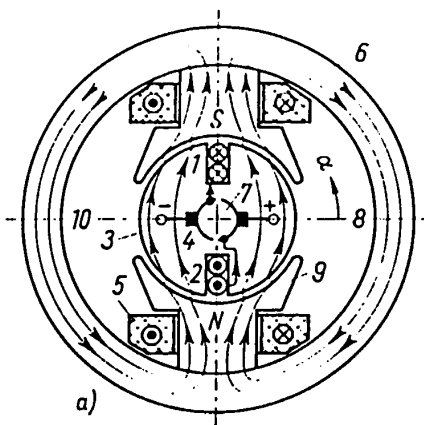
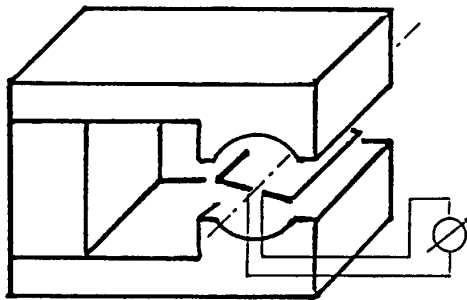
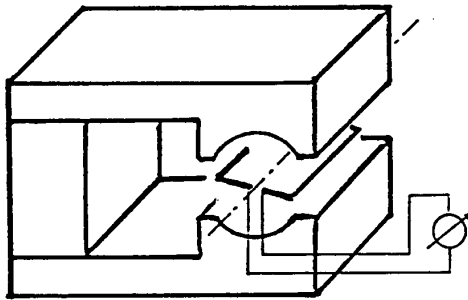
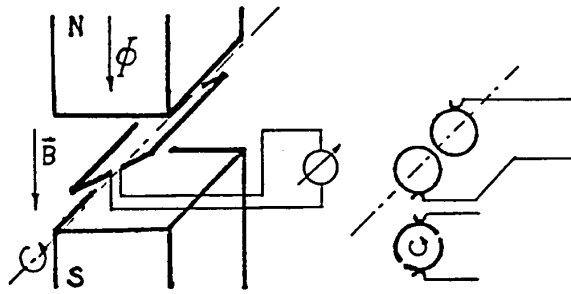
much like that in the “unshaded” region except that it is delayed a constant amount in time. The whole effect is as if there were a magnet only half as wide which is continually being moved from the unshaded region toward the shaded one. Then the varying fields interact with the eddy currents in the disc to produce the torque on it.

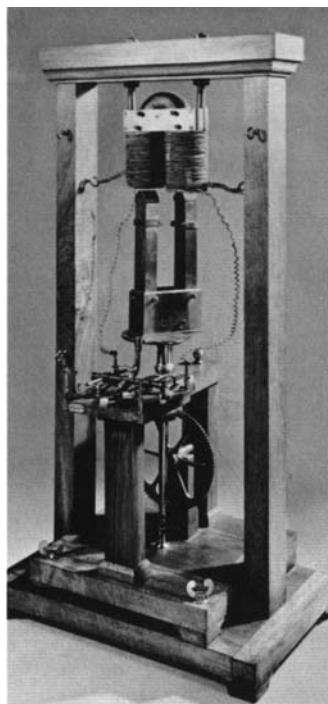
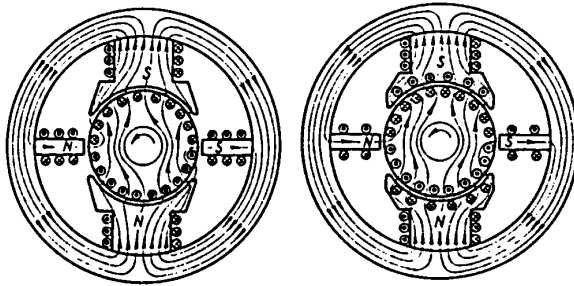
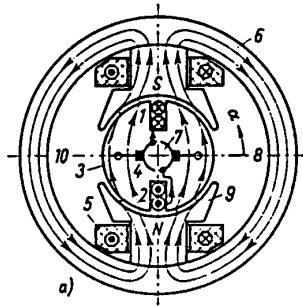
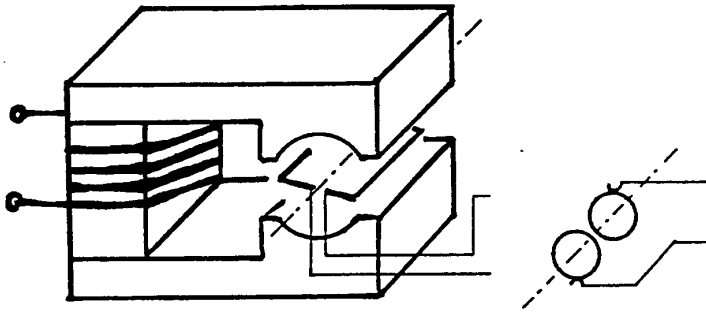
16–4 Electrical technology

When Faraday first made public his remarkable discovery that a changing magnetic flux produces an emf, he was asked (as anyone is asked when he discovers a new fact of nature), “What is the use of it?” All he had found was the oddity that a tiny current was produced when he moved a wire near a magnet. Of what possible “use” could that be? His answer was: “What is the use of a newborn baby?”

Fig. 84-34 Wirbelstrommotor. Aus [L 84-1]

84.7 Elektrische Maschinen



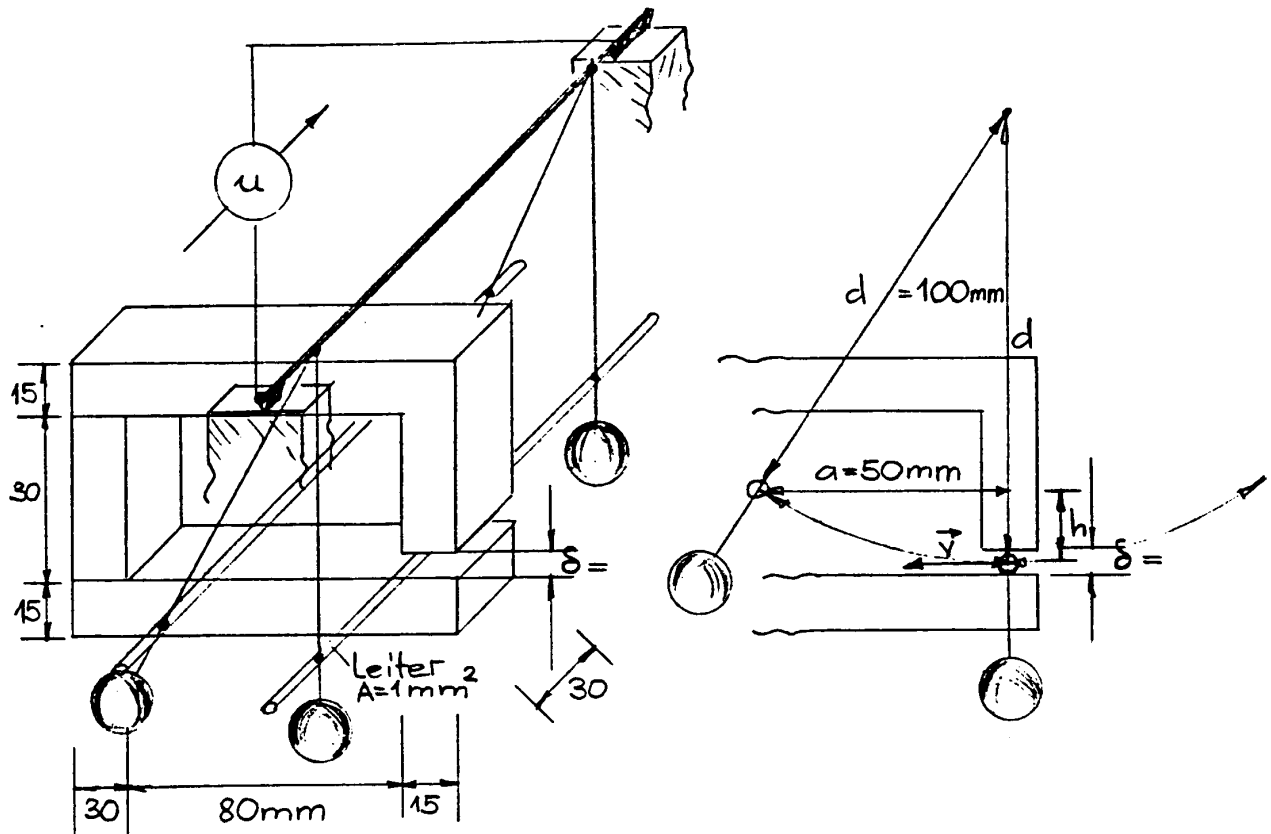


Generator von Pixii
1832/33

84.8 Anhang

84.8.1 Beispiele zum Induktionsgesetz

Beispiel A zum Induktionsgesetz

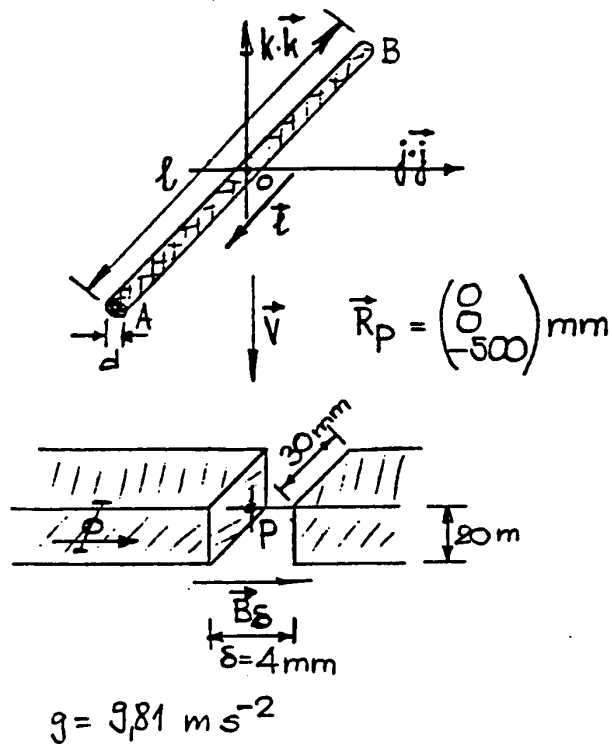


Material: Dynamoblech

Wie gross muss der Fluss Φ sein, damit $u_{\text{Max}} = 5 \text{ mV}$ induziert wird ?

Berechnen Sie den zugehörigen magnetischen Fe-Kreis.

Beispiel B zum Induktionsgesetz



Gegeben sei ein Leiterstück aus Kupfer mit der Länge $l = 100 \text{ mm}$ und dem Draht-Durchmesser $d = 1 \text{ mm}$. $\gamma_{\text{Cu}} = 8,92 \text{ g cm}^{-3}$.

Das Leiterstück werde im Ursprung losgelassen und falle waagrecht durch den Luftspalt δ eines magnetischen Kreises mit $B_\delta = 300 \text{ mT}$.

- Wie gross wird die induzierte Spannung u_{ind} an den Leiterenden? Welches Ende trägt den positiven Pol?
- Wie gross wird der Fluss Φ ?

84.8.2 Berechnen eines Transformators

Es ist nicht Aufgabe des vorliegenden Kurses, Uebertrager und Transformator umfassend zu behandeln. Trotzdem muss ein Elektroingenieur in der Lage sein, einfache Netzgeräte zu bauen und den zugehörigen Netztransformator mit M-Kern Blechen zu verwirklichen⁶²⁾. Pragmatisches⁶³⁾ Vorgehen scheint erlaubt.

Der Querschnitt A_{Fe} des Eisenkernes für einen Einphasentransformator ergibt sich genähert zu

$$A_{Fe} = 7 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{2 \cdot \hat{U}_1}{f \cdot \hat{B}} \cdot \frac{m_{Fe}}{m_{Cu}}} \quad [A_{Fe}] = m^2 \quad (a)$$

Die Massen m_{Fe} des Eisenkernes und m_{Cu} der Kupferwicklungen sind nicht gegeben, so dass der Eisenkernquerschnitt A_{Fe} sich genähert auch ergibt aus

$$A_{Fe} = 7 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{P_2}{f}} \quad [A_{Fe}] = m^2 \quad (b)$$

Aus den Tafeln 5 und 9 lassen sich der benötigte M-Kern und der zugehörige Wickelkörper bestimmen. (Im Zweifelsfalle wird der nächsthöhere Kern gewählt).⁶⁴⁾

Die Primärwindungszahl N_1 wird errechnet aus der Formel $N_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}}$ oder kann aus der Tafel 20 abgelesen werden.

Für die Bestimmung der Sekundärwindungszahl sind die im Kapitel 8 erwähnten Verluste zu berücksichtigen. Die Sekundärwindungszahl N_2 wird zu

$$N_2 = \frac{k_V \cdot U_{2N}}{4,44 \cdot f \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}} \quad (c)$$

Der sekundäre Verlustfaktor k_V wird der Tafel 19 entnommen oder nach Formel (d) berechnet.

62) M-Kern Bleche sind in verschiedenen Blechklassen auf dem Markt leicht erhältlich. Andere Bleche, insbesondere Schnittbandkerne: vgl. Spezialliteratur und Herstellerangaben. Künftig werden sich Ringkerntransformatoren durchsetzen.

63) gr. ~~gr.~~ tatsächlich. Nützlich, den ursächl. Zush. gebend.

64) Der Kernquerschnitt A_{Fe} kann auch aus der Tafel 16 abgelesen werden. Der Eisenfüllfaktor k_{Fe} muss geeignet mitberücksichtigt werden.

Das Ablesen des Verlustfaktors k_V in Tafel 19 lässt unter Umständen Verluste zu, die nicht gewünscht sind.

Aufgrund der vorgewählten sekundären Verlustspannung u_V ergibt sich der sekundäre Verlustfaktor k_V zu ⁶⁵⁾

$$k_V = 1 + \frac{u_V}{u_2} \quad (d)$$

$$u_V \approx u_{2H} - u_{2N}$$

Grundsätzlich soll der kleinere der beiden Verlustfaktoren gewählt werden. Vorausgesetzt bleibe, dass Netz-Kleintransformatoren im allgemeinen induktionsfrei belastet werden.

Tabelle zum Eisenfüllfaktor k_{Fe} ⁶⁶⁾

Blechdicke mm	Eisenfüllfaktor k_{Fe} bei Isolation		
	mit Papier 0,04 mm 40 μ m	mit Lack 0,025 mm 25 μ m	durch Phosphatierung 15 μ m
0,5	0,92	0,95	0,97
0,35	0,90	0,92	0,95

Bestimmung des Wickeldrahtes

Der Durchmesser d_{Cu} und die Stromdichte $|\vec{j}| = j$ sind abhängig von der zulässigen Erwärmung der Wicklungen und der übrigen Elemente des Transformators (Isolierstoffe). In Tafel 14 finden sich dazu nähere Angaben. ⁶⁷⁾

Mit Tafel 23 lässt sich die zulässige Stromdichte j bestimmen und der Drahtdurchmesser wird zu

$$d_{Cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot j}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I}{j}} \quad [d_{Cu}] = \text{mm} \quad (e)$$

Zusammen mit Tafel 24a wählen wir den nächsthöheren vorhandenen und empfohlenen Drahtdurchmesser.

65) Alle Verluste werden auf der Sekundärseite berücksichtigt. u_V hängt zusammen mit den P_{Cu} und F_δ : $u_V = \sqrt{u_{Cu}^2 + u_\delta^2}$
Die sekundäre Verlustspannung lässt sich daher nie tiefer wählen als $u_V > u_\delta$. Näherungsweise wird $u_\delta \approx \delta \frac{1}{u_1} \cdot u_1$
Der Streufaktor δ liegt für M-Kerne bei $\delta = 0,01 \sqrt{N}$

66) Die Stegbreite sei $\sqrt{A_{Fe}}$ und soll $0,82 \cdot \sqrt{A_{Fe}}$ nicht unterschreiten.

Die Uebertemperatur des Transformators ergibt sich zu

$$\vartheta^e = \frac{P_V}{\alpha_k \cdot O} \quad (f) \quad 67)$$

Aus der Tafel 26 entnehmen wir, wieviele Windungen pro cm^2 mit dem gewählten Draht möglich sind. Daraus kann nachgerechnet werden, ob der gewählte Wickelkörper genügend Wickelfläche aufweist.

Die grösstmögliche Anzahl Wickel-Lagen N_L ergibt sich mit der Wickelkörperbreite b_W zu

$$N_L = N \cdot \frac{b_W}{d_{Cu}} \quad (g)$$

Die zwischen den Lagen auftretende Spannung darf gewisse Werte nicht überschreiten.⁶⁸⁾

Die Betrachtungen gelten für ohmsche Lasten.

- 67) Kleintransformatoren werden häufig in Geräte eingebaut. Man rechnet daher im allgemeinen nicht mit Uebertemperaturen über 40°C bis höchstens 60°C .
Mögliche Sonderfälle: Trafo auf Gehäuseaussenseite angebracht, Gerätekühlung durch Ventilatoren und so weiter.
Als Normaltemperatur gelten 20°C . Der Begriff Uebertemperatur meint die absolute, positive Veränderung zu 20°C .
 α_k = Wärmeübergangszahl des Mediums, in dem sich der die Wärme erzeugende Körper befindet. Für nicht bewegte Luft ist $\alpha_k \approx 10^{-3} \text{ Watt cm}^{-2} \text{ Grad}^{-1} = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
O: Oberfläche des Körpers in cm^2 .
- 68) Bei einfach lackisolierten Drähten CuL : 25 Volt zwischen zwei oder mehr Lagen. Bei doppeltisolierten Drähten Cu2L und besser isolierten Drähten: 60 Volt zwischen zwei oder mehr Lagen.

84.8.3 Tabellen

Tafel 1

**Sorten, Dicken und physikalische Eigenschaften
von Elektroblechen**

(nach DIN 41 301)

Sorte	Zusammen- setzung	Wichte γ kg/dm ³	Spez. elektr. Wider- stand ρ $\Omega \cdot \text{mm}^2$ m	Dicke mm	Kernblechpermeabilität $\mu_{16}^{1)}$ M-Schnitte				Bandkern- permeabilität $\mu_{16}^{1)}$
					≥ 55	42 42v	30 30z	22 20	
A 0	Stahl mit $\approx 2,5$ bis 4,5% Si	7,70	0,40	0,50 0,35	—	400	—	—	450
A 2		7,63	0,55	0,35	—	700	—	—	800
A 3		7,57	0,68	0,35 0,20	— 700	700 700	— 700	— 650	800 —
C 2	Stahl $\approx 3,5$ bis 4,5% Si	7,55	0,50	0,35	1200	1200	1100	—	—
C 5 ³⁾		7,65	0,45	0,35	—	—	—	—	800
D 1	Stahl mit ≈ 36 bis 40% Ni	8,15	0,75	0,35 0,20	2000	2000	—	—	2000
				0,10 0,05	—		2000	1900		1900
D 1a		8,15	0,75	0,35 0,20	2300	2200	—	—	2300
				0,10 0,05	—		2200	2100		2100
D 3		8,15	0,75	0,35 0,20	2700	2400	—	—	2900
				0,10 0,05	—	2700	2400	2400		2500
E 3 ²⁾	Ni-Fe- Legierung mit $\approx 75\%$ Ni und weiteren Zusätzen	8,60	0,50	0,35 0,20	15	15	—	—	20
				0,10 0,05	—	13,5	13,5	13,5	18
E 4 ²⁾		8,70	0,55	0,35	27	24	—	—	35
				0,20	30	30	—	—	40
				0,10	30	27	24	22	35
				0,05	—	24	24	22	30
F 3 ²⁾	Ni-Fe- Legierung mit $\approx 50\%$ Ni	8,25	0,45	0,35 0,20	3,6	3,6	—	—	4
				0,10 0,05	—	—	3,6	3,3 3,6	

¹⁾ Der Index von μ gibt die magnetische Meßfeldstärke in mA/cm an (16 mA/cm entspricht der früheren Angabe von 20 mOe).

²⁾ Für E 3, E 4 und F 3 ist die Permeabilität $\mu_r \cdot 10^{-3}$ einzusetzen.

³⁾ C 5 ist kornorientierter Werkstoff. Werte gelten nur für die Walzrichtung.

Die Tabellen und Tafeln sind entnommen aus [L 84-4]

Tafel 2

**Magnetische und technologische Eigenschaften
von Elektroblechen**

(nach DIN 46 400)

Blech- sorte	Dicke mm	Ummagneti- sierungs- verlust ¹⁾ W/kg		Magnetische Induktion ²⁾ G mindestens für						Biege- zahl minde- stens	Wichte γ kg/dm ³	
		V 10	V 15	B 5	B 10	B 25	B 50	B 100	B 300		mit Zunder	ent- zundert
		I 3,6	3,6	8,6	—	—	15 300	16 300	17 300		19 800	10	7,8	7,85
II 3,0	3,0	7,2	—	—	15 000	16 000	17 100	19 500	7,75	7,8		
III 2,6	2,6	6,3	—	—	14 900	15 800	17 000	19 400	7,65	7,7		
III 2,3	2,3	5,6	—	—	14 700	15 700	16 900	19 300				
III 2,0	2,0	4,9	—	—	14 500	15 500	16 700	19 000	6			
IV 1,7	0,5	1,7	4,0	12 000	13 200	14 300	15 500	16 500	18 500	2	—	7,6
IV 1,45	0,35	1,45	3,6									
IV 1,5	0,5	1,5	3,7	2								
IV 1,3	0,35	1,3	3,3	2								
IV 1,35	0,5	1,35	3,3	12 500	13 500							
IV 1,1	0,35	1,1	2,7	12 900	13 700					1	—	7,55
IV 1,0		1,0	2,5									

Anhaltswerte für die Stahlzusammensetzung

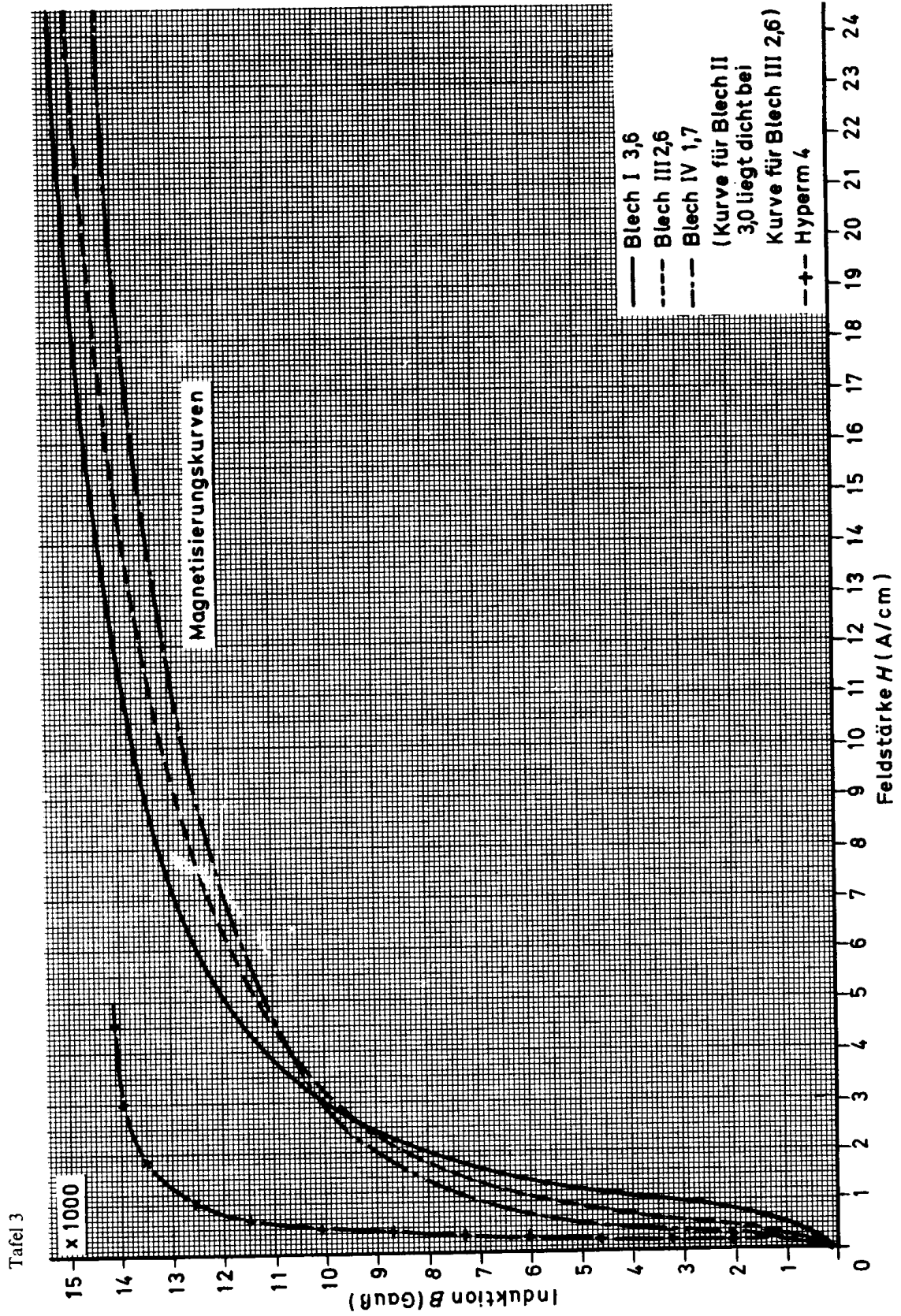
Blech- sorte	% C höchstens	% Si ³⁾ mittel
I 3,6	0,08	0,7
II 3,0	0,08	1,0
III 2,6	0,08	1,7
III 2,3	0,07	2,3
III 2,0	0,07	2,7
IV 1,7	0,07	3,4
IV 1,45		
IV 1,5	0,07	3,9
IV 1,3		
IV 1,35	0,07	4,3
IV 1,1		
IV 1,0		

¹⁾ Die Ummagnetsierungsverluste V 10 und V 15 geben die bei der Wechselfeldmagnetsierung von 50 Hz auftretenden Verluste in W/kg für Scheitelwerte der Induktionen von 10000 und 15000 G bei 20 °C an.

²⁾ Die magnetische Induktion B (gemessen in G), die zur Beurteilung der Magnetsierbarkeit dient, wird bezeichnet mit
 $B 5 \quad B 10 \quad B 25 \quad B 50 \quad B 100 \quad B 300$
für die Feldstärke

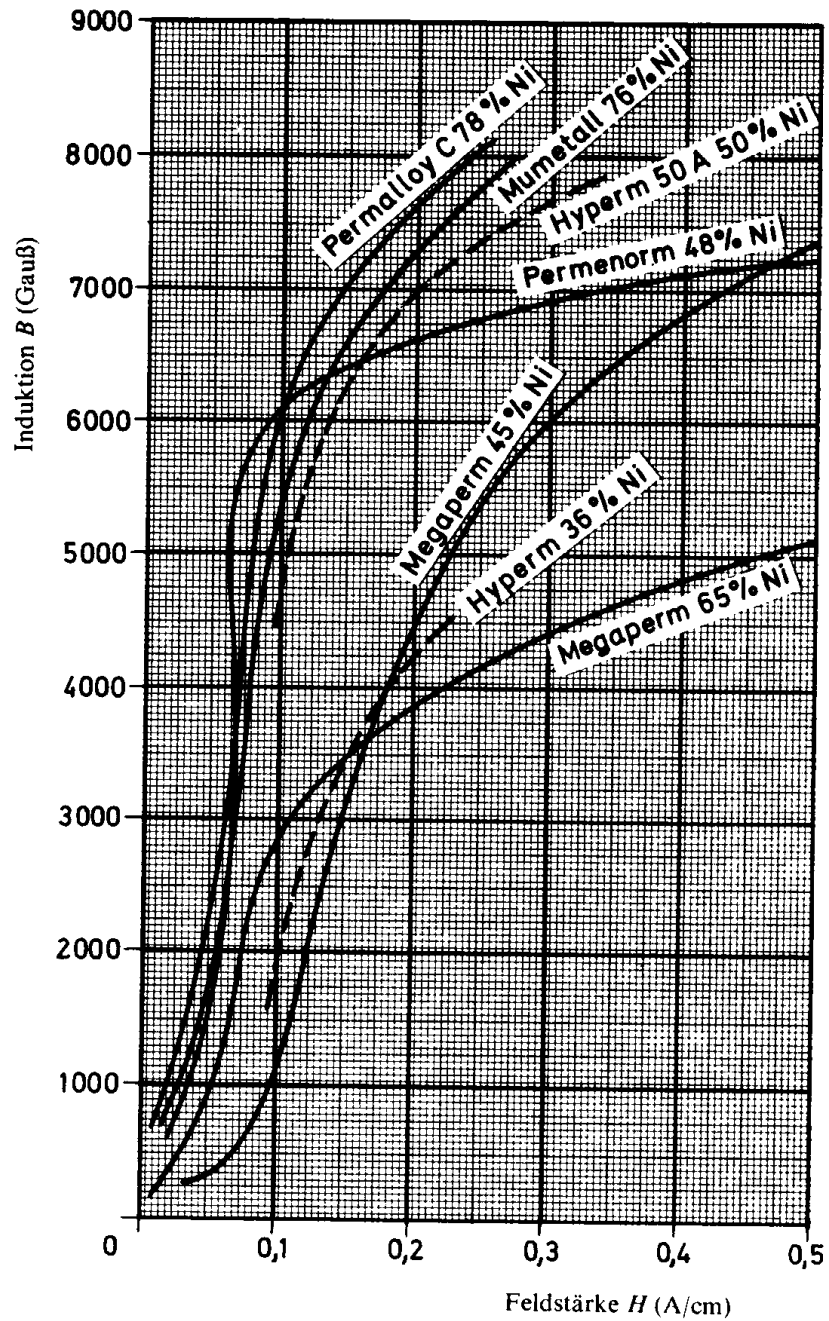
$H = 5 \quad 10 \quad 25 \quad 50 \quad 100 \quad 300 \text{ A/cm.}$

³⁾ Silizium kann zum Teil durch Aluminium ersetzt sein, sofern der Si-Gehalt etwa 1,7% übersteigt.



Tafel 4

Magnetisierungskurven: Nickel-Eisen-Legierungen



Tafel 5

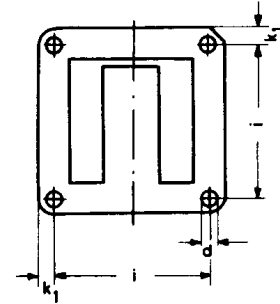
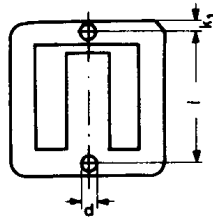
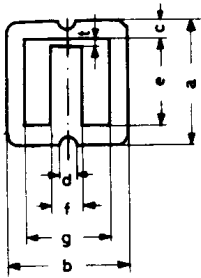
**Hauptmaße der Kernbleche
Typ M**

(nach DIN 41302)

M 20 bis M 30

M 42

M 42 v, M 55 bis M 102



Maße in mm

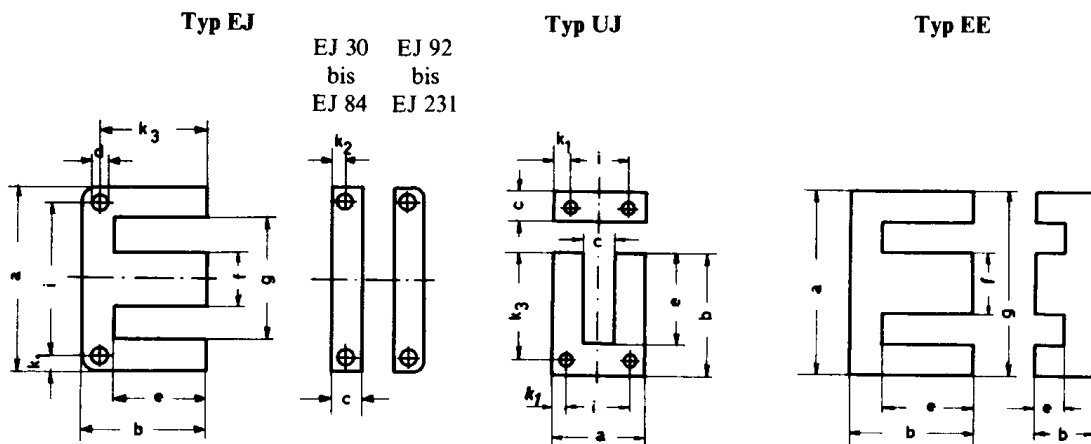
Kurzzeichen	a	b	c	d	e	f	g	i	k ₁	Luftspalt t				gebräuchliche Blechkicken	
M 20	20	20	3,5	2,8	13	5	13	—	—	—	0,3	—	—	—	bis 0,15
M 22	22	20	3,5	2,8	15	5	13	—	—	—	0,3	—	—	—	bis 0,15
M 30 z	30	28	5,0	3,0	20	7	18	—	—	—	0,3	—	—	—	bis 0,15
M 30	30	30	5,0	3,0	20	7	20	—	—	—	0,3	—	—	—	bis 0,15
M 42	42	42	6,0	3,5	30	12	30	36	3,0	0	0,3	0,5	1	—	bis 0,5
M 42 v	42	42	6,0	2,6	30	12	30	36	3,0	0	0,3	0,5	1	—	bis 0,5
M 55	55	55	8,5	3,5	38	17	38	47	4,0	0	0,3	0,5	1	—	0,1 bis 0,5
M 65	65	65	10,0	4,5	45	20	45	56	4,5	0	—	0,5	1	—	0,1 bis 0,5
M 74	74	74	11,5	4,5	51	23	51	64	5,0	0	—	0,5	1	—	0,15 bis 0,5
M 85	85	85	14,5	4,5	56	29	56	75	5,0	0	—	0,5	1	2	0,35 und 0,5
M 102	102	102	17,0	5,5	68	34	68	91	5,5	0	—	0,5	1	2	0,35 und 0,5

M 22 und M 30 z nicht für Neukonstruktionen verwenden.

M 42 v entspricht M 42, hat jedoch 4 Befestigungslöcher.

Hauptmaße der Kernbleche

(nach DIN 41 302)



Maße in mm

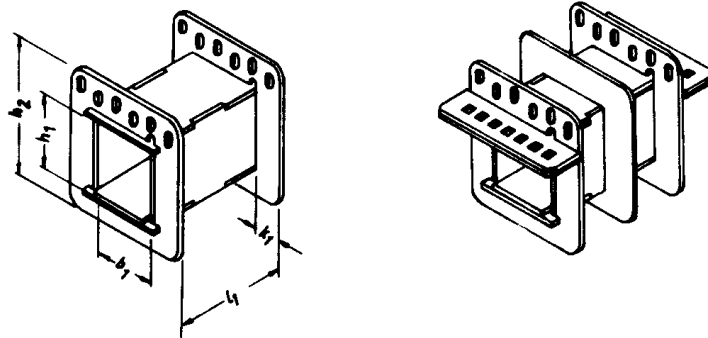
Kurzzeichen	a	b	c	d	e	f	g	i	k ₁	k ₂	k ₃	gebräuchliche Blechdicken
EJ 30	30,0	20,0	5,0	—	15,0	10,0	20,0	—	—	—	—	0,1 bis 0,5
EJ 38	38,4	25,6	6,4	—	19,2	12,8	25,6	—	—	—	—	
EJ 42	42,0	28,0	7,0	3,5	21,0	14,0	28,0	35,0	3,5	—	24,5	0,35 und 0,5
EJ 48	48,0	32,0	8,0	3,5	24,0	16,0	32,0	40,0	4,0	—	28,0	
EJ 54	54,0	36,0	9,0	3,5	27,0	18,0	36,0	45,0	4,5	—	31,5	
EJ 60	60,0	40,0	10,0	3,5	30,0	20,0	40,0	50,0	5,0	—	35,0	
EJ 66	66,0	44,0	11,0	4,5	33,0	22,0	44,0	55,0	5,5	—	38,5	
EJ 78	78,0	52,0	13,0	4,5	39,0	26,0	52,0	65,0	6,5	—	45,5	
EJ 84	84,0	56,0	14,0	4,5	42,0	28,0	56,0	70,0	7,0	—	49,0	
EJ 92	92,0	62,5	11,5	4,5	51,0	23,0	69,0	82,0	5,0	6,5	57,5	
EJ 106	106,0	70,5	14,5	5,5	56,0	29,0	77,0	94,0	6,0	8,5	64,5	
EJ 130	130,0	87,5	17,5	6,8	70,0	35,0	95,0	115,0	7,5	10,0	80,0	
EJ 150	150,0	100,0	20,0	7,8	80,0	40,0	110,0	135,0	7,5	12,5	92,5	
EJ 170	170,0	117,5	22,5	8,0	95,0	45,0	125,0	150,0	10,0	12,5	107,5	
EJ 195	195,0	152,5	27,5	11,0	125,0	55,0	140,0	170,0	12,5	15,0	140,0	

Fortsetzung der Tafel 6 auf S. 86

Tafel 9

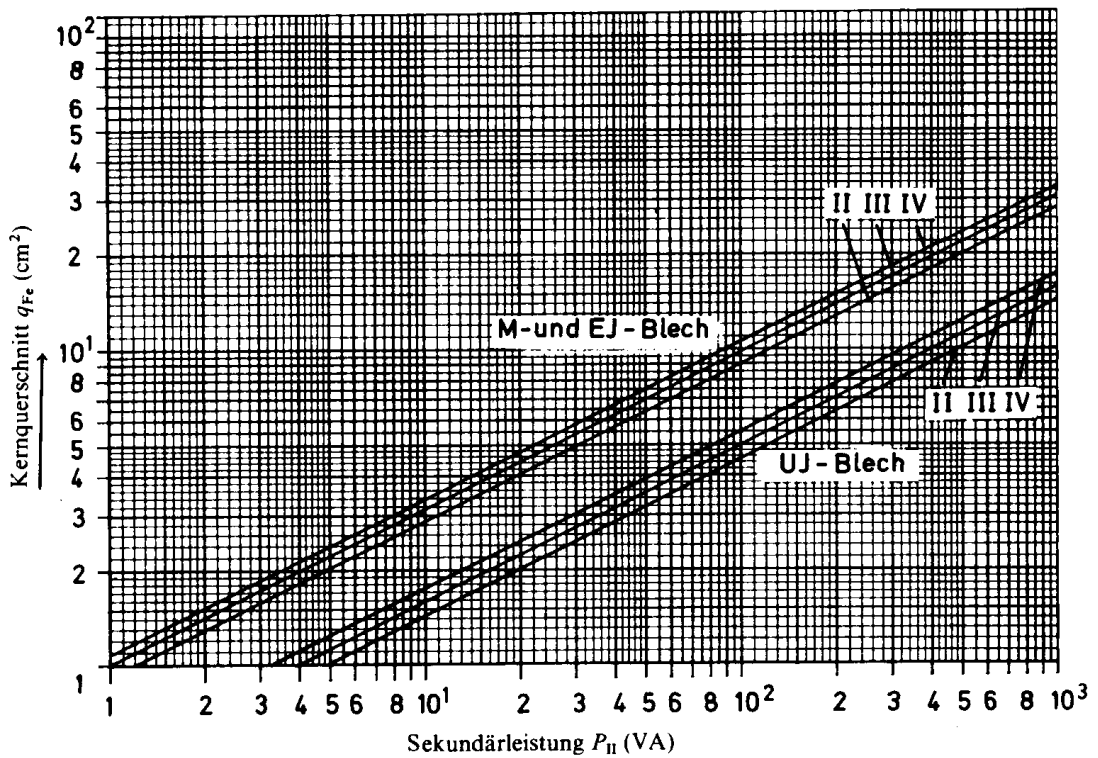
**Spulenkörper in Schachtelbauweise
für M- und EJ-Kerne**

(nach DIN 41 304)

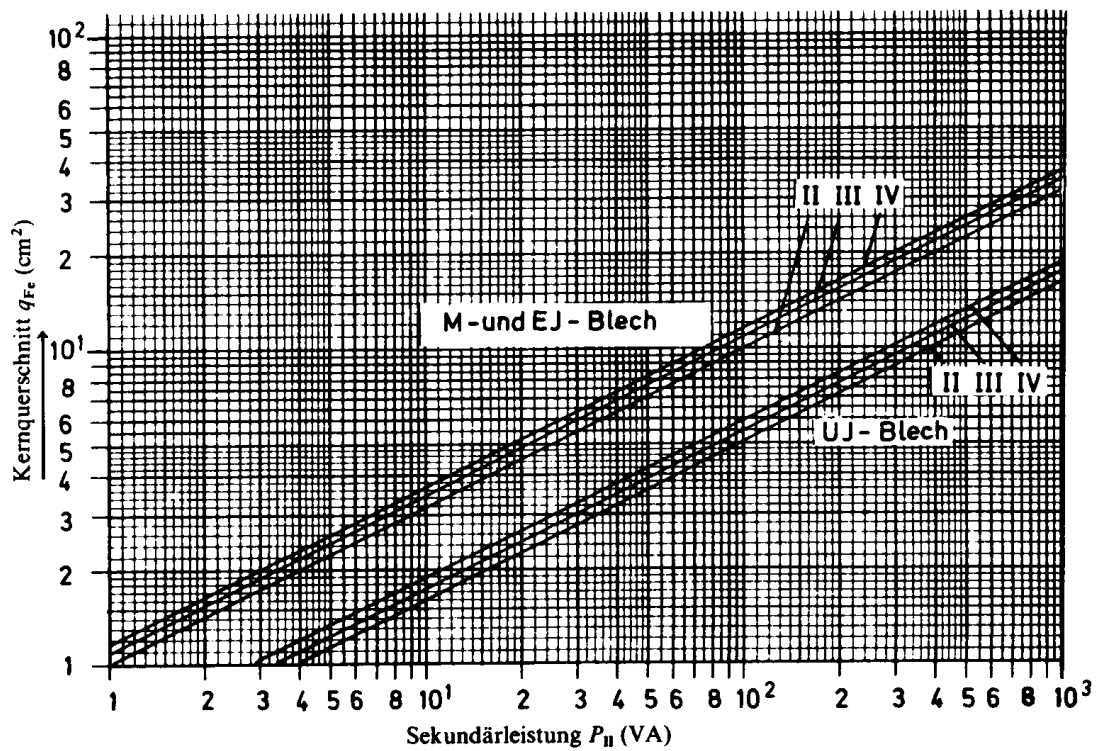
**Maße in mm**

Für Kern- bleche nach DIN 41 302	b_1 Kleinst- maß	h_1 Kleinst- maß	h_2 Größt- maß	k_1 Kleinst- maß	l_1 Kleinst- maß	Für Kern- bleche nach DIN 41 302	b_1 Kleinst- maß	h_1 Kleinst- maß	h_2 Größt- maß	k_1 Kleinst- maß	l_1 Kleinst- maß
M 42	12,6	15,7	34,2	6,7	26,6	EJ 42	14,5	14,8	30,2	5,1	18,6
M 42v						EJ 48	16,5	16,8	34,2	6,0	21,6
M 55	17,6	21,7	43,7	8,1	33,1	EJ 54	18,5	18,8	38,2	6,8	24,2
M 65	20,6	27,8	53,7	10,1	38,6	EJ 60	20,6	21,0	42,7	7,7	26,7
M 74	23,6	33,5	63,7	11,6	44,6	EJ 66	22,6	23,0	46,7	8,7	28,6
M 85 $\frac{a}{b}$	29,6	33,5	62,2	10,9	48,5	EJ 78	26,6	27,5	56,2	10,7	34,6
		46,5	75,2			EJ 84 $\frac{a}{b}$	28,6	29,5	60,2	11,7	37,6
M 102 $\frac{a}{b}$	34,6	36,5	71,2	13,0	60,5	EJ 84 $\frac{b}{c}$	28,6	43,5	74,2	20,2	46,6
		54,0	88,8			EJ 92 $\frac{a}{b}$		23,6	24,5			75,2	33,5	84,3
						EJ 106 $\frac{a}{b}$	29,6	33,5	88,3	20,6	51,5
						EJ 106 $\frac{b}{c}$	29,6	46,5	101,3	20,6	51,5
					EJ 130 $\frac{a}{b}$	35,7		37,7	105,3			25,9	64,5
						EJ 130 $\frac{b}{c}$	35,7	47,7	115,3	25,9	64,5
					EJ 150 $\frac{a}{b}$	40,7		41,7	122,3			29,8	70,1
					EJ 150 $\frac{b}{c}$		51,7	132,3			
					EJ 150 $\frac{c}{d}$		61,7	142,3			
						EJ 170 $\frac{a}{b}$	45,7	56,7	151,3	33,7	85,1
					EJ 170 $\frac{b}{c}$	66,7		161,3			
					EJ 170 $\frac{c}{d}$	76,7		171,3			
						EJ 195 $\frac{a}{b}$	56,5	57,7	162,3	35,7	115,1
					EJ 195 $\frac{b}{c}$	70,7		175,3			
					EJ 195 $\frac{c}{d}$	85,7		190,4			

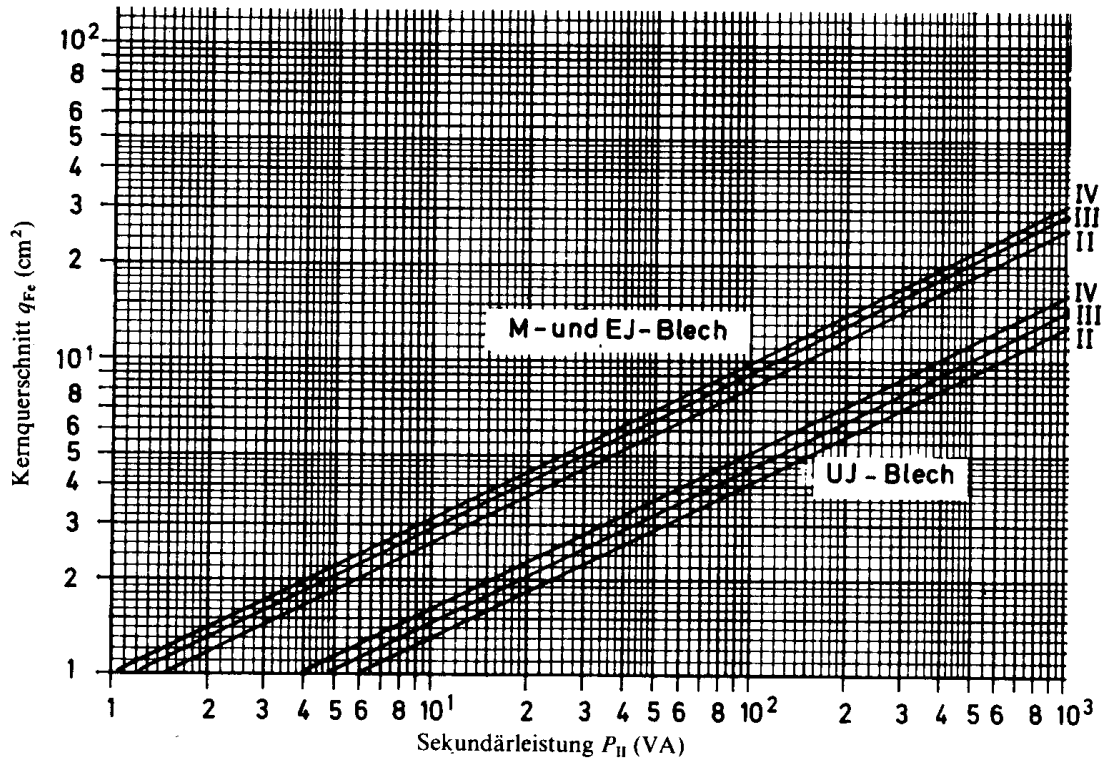
Tafel 16 Bestimmung des Kernquerschnittes q_{Fe} für Transformatoren ($f = 50 \text{ Hz}$)



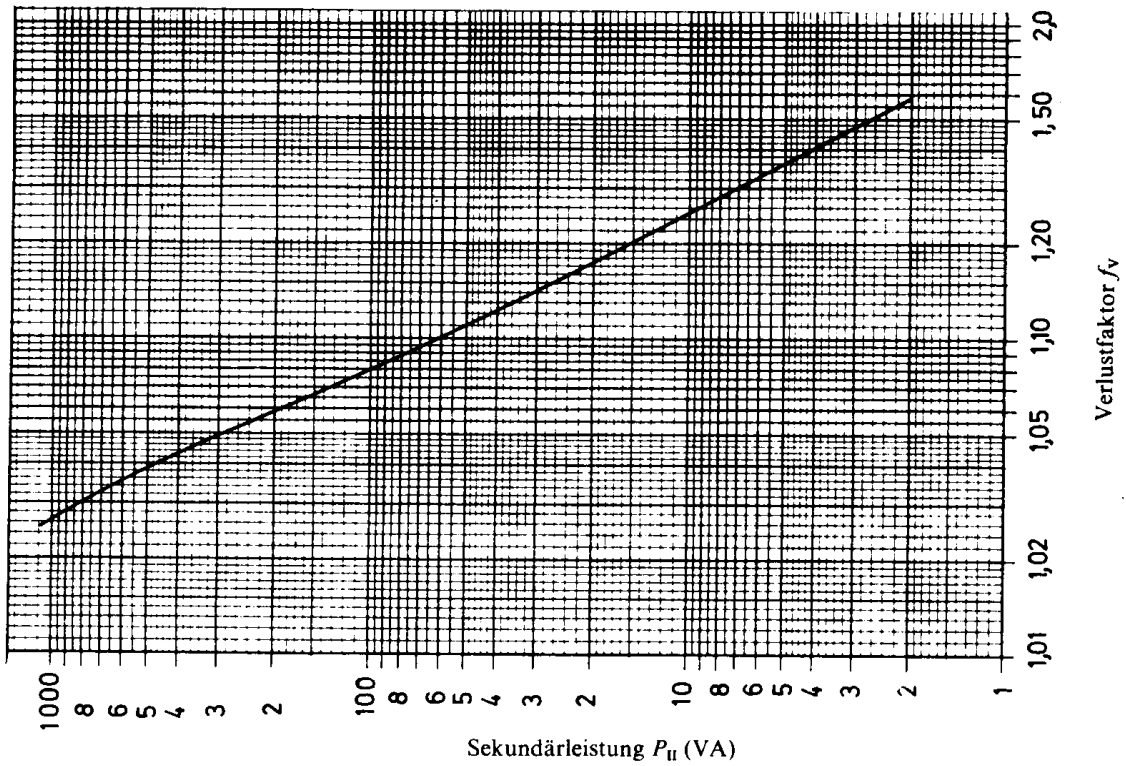
Tafel 17 Bestimmung des Kernquerschnittes q_{Fe} für Transformatoren ($f = 42 \text{ Hz}$)



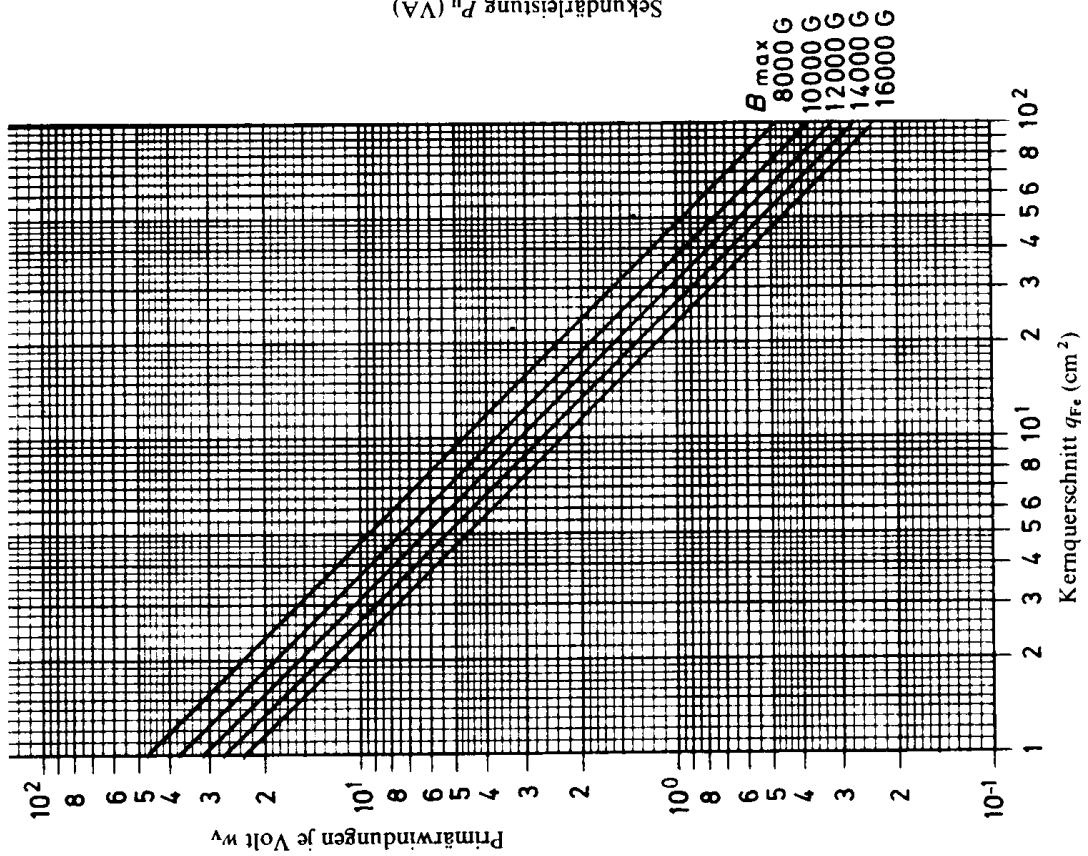
Tafel 18 Bestimmung des Kernquerschnittes q_{Fe} für Transformatoren ($f = 60 \text{ Hz}$)



Tafel 19 Ermittlung des sekundären Verlustfaktors f_v für die Vorberechnung von Netztransformatoren

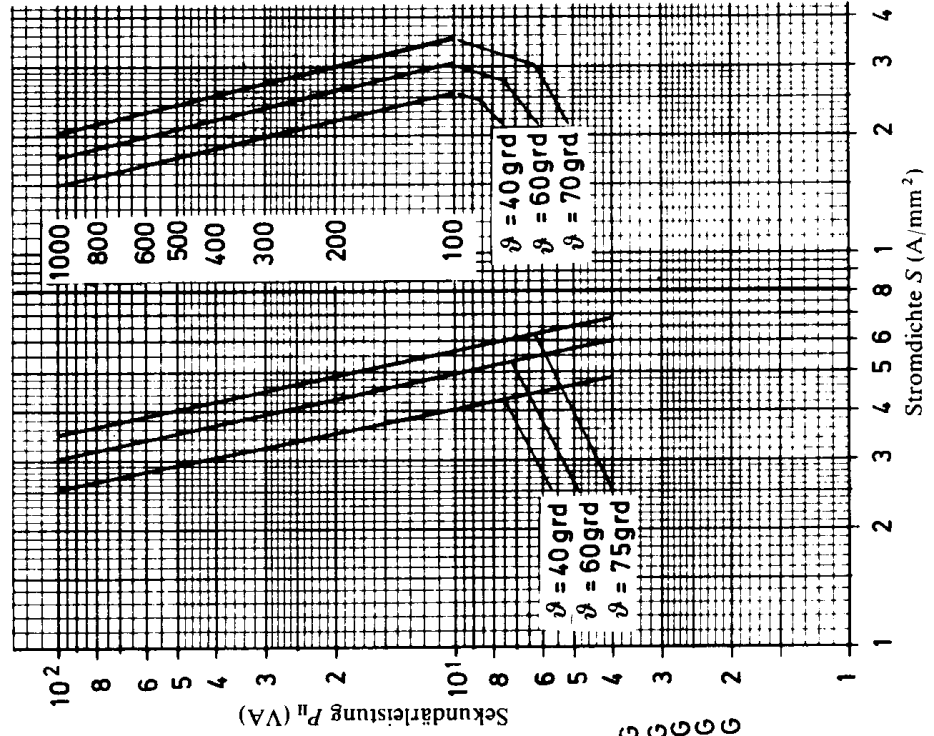


Tafel 22 Primärwindungen je Volt in Abhängigkeit vom Kernquerschnitt q_{Fe} ($f = 60$ Hz)



Tafel 23 Stromdichte S in Abhängigkeit von der Übertemperatur ϑ und von der Sekundärleistung P_{II}

Für EJ-Kerne und einschichtig bewickelte UJ-Kerne:
 bis 50 VA: Diagrammwerte $\times 0,7$
 über 50 bis 100 VA: Diagrammwerte $\times 0,75$
 über 100 bis 1000 VA: Diagrammwerte $\times 0,8$



Tafel 24 a

Die wichtigsten Daten für Kupferlackdrähte nach DIN 46435 doppelt lackisoliert

Nenn- durch- messer mm	Zulässige Abwei- chung mm	Leiter- querschnitt mm ²	Gleichstromwiderstand bei 20 °C			Außendurchmesser		Gewicht ca. kg/km	Länge ca. km/kg
			Kleinst- wert ¹⁾ Ω/m	Größt- wert ²⁾ Ω/m	ca. Ω/g	Kleinstmaß mm	Größtmaß mm		
0,03	4)	0,0007069	21,22	27,56	3480,0	0,039	0,041	0,00702	142,0
● 0,032		0,0008042	18,88	24,02	2710,0	0,041	0,043	0,00792	126,0
0,036		0,001018	15,23	18,65	1690,0	0,045	0,049	0,0100	100,0
● 0,04		0,001257	12,49	14,95	1110,0	0,050	0,054	0,0123	81,1
0,045		0,001590	9,995	11,69	697,0	0,055	0,061	0,0155	64,3
● 0,05		0,001964	8,166	9,396	456,0	0,062	0,068	0,0193	51,9
0,056		0,002463	6,552	7,448	291,0	0,068	0,076	0,0240	41,6
0,06		0,002827	5,732	6,464	221,0	0,073	0,081	0,0276	36,3
0,063		0,003117	5,196	5,848	182,0	0,077	0,085	0,0304	32,9
(0,07)		0,003848	4,220	4,740	119,0	0,087	0,093	0,0376	26,6
● 0,071		0,003959	4,104	4,610	113,0	0,087	0,095	0,0386	25,9
● 0,08		0,005027	3,235	3,625	70,2	0,099	0,105	0,0489	20,5
● 0,09		0,006362	2,556	2,864	44,1	0,109	0,117	0,0615	16,3
● 0,1		0,007854	2,072	2,318	29,0	0,121	0,129	0,0757	13,2
(0,11)		0,009503	1,704	1,934	19,9	0,132	0,140	0,0912	11,0
● 0,112		0,009852	1,646	1,864	18,5	0,135	0,143	0,0947	10,6
(0,12)	0,01131	1,439	1,617	14,1	0,144	0,152	0,108	9,22	
● 0,125	0,01227	1,328	1,488	12,0	0,147	0,159	0,117	8,53	
(0,13)	0,01327	1,230	1,373	10,2	0,154	0,164	0,127	7,89	
● 0,14	0,01539	1,064	1,180	7,64	0,164	0,176	0,147	6,82	
0,15	0,01767	0,9276	1,025	5,81	0,174	0,188	0,168	5,96	
● 0,16	0,02011	0,8192	0,8983	4,50	0,185	0,199	0,191	5,25	
0,17	0,02270	0,7272	0,7940	3,54	0,196	0,210	0,215	4,66	
● 0,18	0,02545	0,6499	0,7068	2,82	0,206	0,222	0,240	4,16	
0,19	0,02835	0,5843	0,6332	2,27	0,217	0,233	0,267	3,74	
● 0,2	0,03142	0,5282	0,5706	1,85	0,227	0,245	0,296	3,38	
(0,22)	0,03801	0,4377	0,4702	1,27	0,249	0,267	0,357	2,80	
● 0,224	0,03941	0,4224	0,4534	1,18	0,252	0,272	0,370	2,70	
(0,23)	0,04155	0,4009	0,4297	1,06	0,260	0,278	0,390	2,56	
(0,24)	0,04524	0,3686	0,3942	0,898	0,271	0,289	0,424	2,36	
● 0,25	0,04909	0,3374	0,3659	0,765	0,279	0,301	0,459	2,18	
(0,26)	0,05309	0,3123	0,3379	0,654	0,290	0,312	0,496	2,01	
● 0,27	0,05726	0,2899	0,3130	0,563	0,301	0,323	0,535	1,87	
● 0,28	0,06158	0,2698	0,2907	0,488	0,310	0,334	0,574	1,74	
0,3	0,07069	0,2355	0,2527	0,370	0,333	0,355	0,658	1,52	
● 0,315	0,07793	0,2139	0,2289	0,305	0,349	0,371	0,725	1,38	
(0,32)	0,08042	0,2073	0,2217	0,287	0,353	0,377	0,748	1,34	
(0,34)	0,09079	0,1839	0,1961	0,225	0,376	0,398	0,843	1,19	
(0,35)	0,09621	0,1737	0,1850	0,201	0,385	0,409	0,893	1,12	
● 0,355	0,09898	0,1689	0,1797	0,190	0,392	0,414	0,919	1,09	
(0,36)	0,1018	0,1643	0,1747	0,179	0,396	0,420	0,944	1,06	
(0,37)	0,1075	0,1556	0,1653	0,161	0,408	0,430	0,997	1,00	
(0,38)	0,1134	0,1476	0,1566	0,145	0,417	0,441	1,05	0,952	
● 0,4	0,1257	0,1327	0,1419	0,118	0,438	0,462	1,16	0,860	
(0,42)	0,1385	0,1205	0,1286	0,0971	0,461	0,483	1,28	0,781	
● 0,45	0,1590	0,1051	0,1118	0,0739	0,490	0,516	1,47	0,681	
(0,48)	0,1810	0,09253	0,09814	0,0571	0,524	0,546	1,67	0,599	
● 0,5	0,1964	0,08534	0,09037	0,0485	0,543	0,569	1,81	0,553	
● 0,56	0,2463	0,06794	0,07215	0,0309	0,606	0,632	2,26	0,442	
0,6	0,2827	0,05927	0,06276	0,0235	0,648	0,674	2,60	0,385	
● 0,63	0,3117	0,05381	0,05687	0,0193	0,678	0,706	2,86	0,350	
(0,65)	0,3318	0,05042	0,05356	0,0171	0,700	0,726	3,04	0,329	
● 0,71	0,3959	0,04234	0,04481	0,0121	0,762	0,790	3,63	0,276	
● 0,75	0,4418	0,03788	0,04022	0,00966	0,802	0,832	4,04	0,247	
● 0,8	0,5027	0,03334	0,03530	0,00747	0,853	0,885	4,59	0,218	
● 0,85	0,5675	0,02950	0,03131	0,00586	0,905	0,937	5,18	0,193	
● 0,9	0,6362	0,02634	0,02789	0,00467	0,956	0,990	5,80	0,172	
● 0,95	0,7088	0,02362	0,02506	0,00376	1,007	1,041	6,46	0,155	
● 1	0,7854	0,02134	0,02259	0,00307	1,059	1,093	7,15	0,140	

Nenn- durch- messer mm	Zulässige Abwei- chung mm	Leiter- querschnitt mm ²	Gleichstromwiderstand bei 20 °C			ca. Ω/g	Außendurchmesser		Gewicht ca. kg/km	Länge ca. km/kg
			Kleinst- wert ¹⁾ Ω/m	Größt- wert ²⁾ Ω/m			Kleinstmaß mm	Größtmaß mm		
● 1,06	± 0,011	0,8825	0,01953 ¹⁾		0,00243	1,121	1,153	8,03	0,125	
● 1,12		0,9852	0,01750		0,00195	1,181	1,217	8,96	0,112	
●(1,15)	± 0,012	1,039	0,01660		0,00176	1,212	1,248	9,44	0,106	
● 1,18		1,094	0,01576		0,00159	1,241	1,279	9,94	0,101	
● 1,25	± 0,013	1,227	0,01405		0,00126	1,313	1,351	11,1	0,0898	
● 1,32		1,368	0,01259		0,00101	1,385	1,423	12,4	0,0805	
● 1,4	± 0,014	1,539	0,01120		0,000802	1,466	1,506	14,0	0,0716	
●(1,45)	± 0,015	1,651	0,01044		0,000698	1,518	1,556	15,0	0,0668	
● 1,5		1,767	0,009757		0,000609	1,568	1,608	16,0	0,0625	
● 1,6	± 0,016	2,011	0,008575		0,000471	1,669	1,711	18,2	0,0549	
● 1,7	± 0,017	2,270	0,007596		0,000370	1,771	1,813	20,5	0,0487	
● 1,8	± 0,018	2,545	0,006775		0,000295	1,870	1,916	23,0	0,0435	
● 1,9	± 0,019	2,835	0,006081		0,000237	1,972	2,018	25,6	0,0390	
2	± 0,020	3,142	0,005488		0,000193	2,074	2,120	28,4	0,0352	
● 2,12	± 0,021	3,530	0,004884		0,000153	2,195	2,243	31,9	0,0314	
● 2,24	± 0,022	3,941	0,004375		0,000123	2,316	2,366	35,6	0,0281	
● 2,36	± 0,024	4,374	0,003941		0,0000999	2,436	2,488	39,4	0,0254	
● 2,5	± 0,025	4,909	0,003512		0,0000794	2,577	2,631	44,2	0,0226	
2,65	± 0,027	5,515	0,003126		0,0000629	2,728	2,784	49,7	0,0201	
● 2,8	± 0,028	6,158	0,002800		0,0000505	2,878	2,938	55,4	0,0180	
● 3	± 0,030	7,069	0,002439		0,0000383	3,078	3,142	63,6	0,0157	

Die mit - gekennzeichneten Nenndurchmesser entsprechen den in der IEC-Empfehlung 182-1, 1. Ausgabe 1964, Teil 1, "Diameters of conductors for round winding wires", vorgesehenen Durchmessern und sind bevorzugt zu verwenden. Die eingeklammerten Nenndurchmesser sind möglichst zu vermeiden.

¹⁾) Nennwerte, gerechnet mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $58 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

²⁾) Gerechnet mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $58,5 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

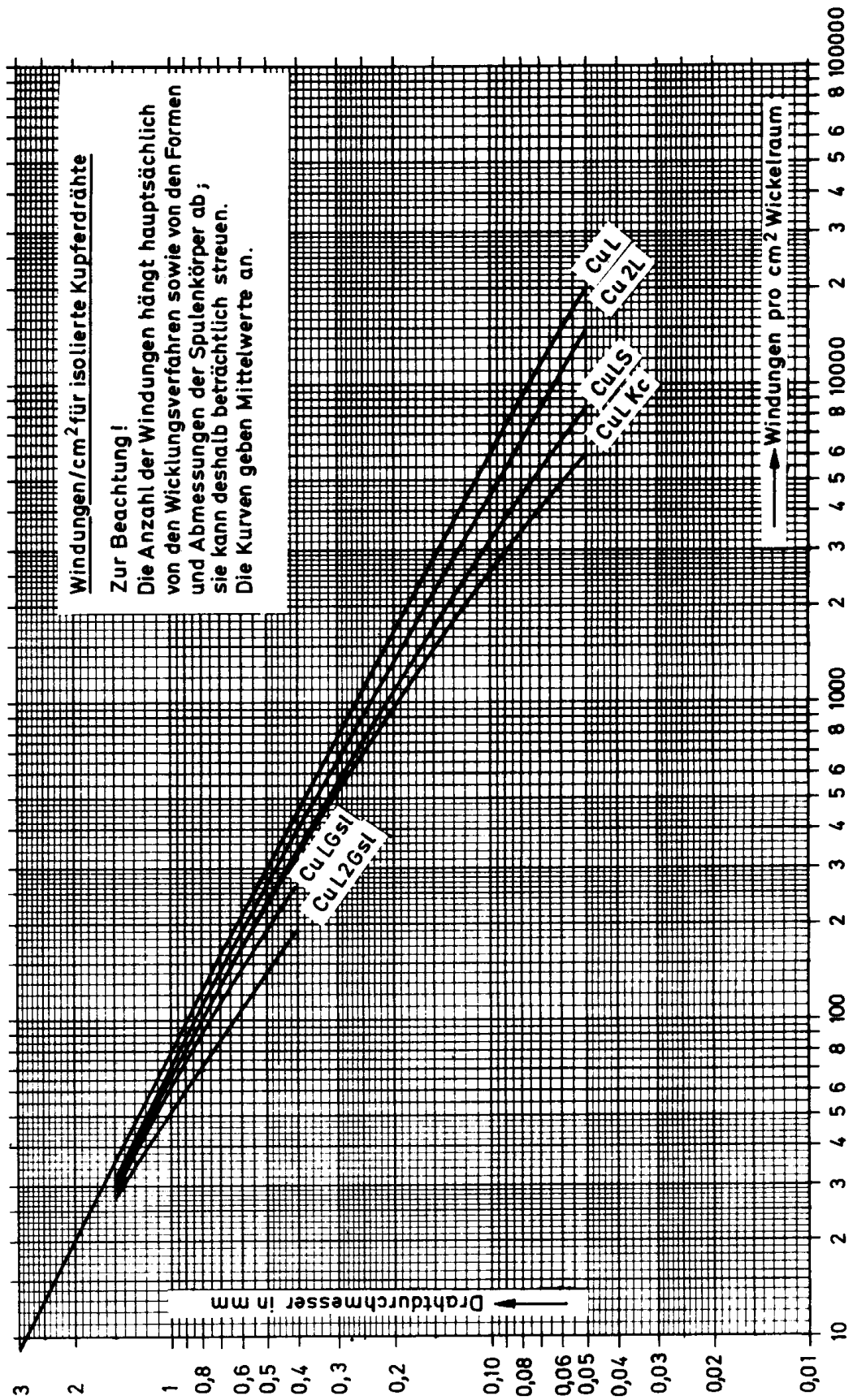
Bei Drähten mit einem Nenndurchmesser bis einschließlich 0,1 mm wurde die zulässige Abweichung für den Gleichstromwiderstand gegenüber einer in Vorbereitung befindlichen IEC-Empfehlung eingeeengt.

³⁾) Gerechnet mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $57,5 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Bei Drähten mit einem Nenndurchmesser bis einschließlich 0,1 mm wurde die zulässige Abweichung für den Gleichstromwiderstand gegenüber einer in Vorbereitung befindlichen IEC-Empfehlung eingeeengt.

⁴⁾) Für diese Abmessungen sind keine zulässigen Abweichungen festgelegt.

Tafel 26



84.8.4 Berechnung einer Drossel

84.9 Verzeichnisse**Figurenverzeichnis**

Fig. 84-1	Leiter im magnetischen Feld.....	4
Fig. 84-2	Rechte Hand - Regel	6
Fig. 84-3	Kraftwirkung auf Leiter	6
Fig. 84-4	Linke Hand - Regel	7
Fig. 84-5	LENZ' sche Regel	7
Fig. 84-6	Kraftwirkung auf bewegte Ladungsträger	8
Fig. 84-7	Hall – Spannung in stromdurchflossener Kupferfolie	9
Fig. 84-8	Erzeugung elektrischer Energie.....	10
Fig. 84-9	Sinusförmiger Spannungsverlauf.....	11
Fig. 84-10	Dreiphasen - Generator.....	11
Fig. 84-11	Spannungsverlauf im Drehstromsystem	12
Fig. 84-12	Drehstromsystem	12
Fig. 84-13	Selbstinduktionsspannung.....	13
Fig. 84-14	Selbstinduktionskoeffizient einer Kreisringspule	14
Fig. 84-15	Ankerrückwirkung	14
Fig. 84-16	Lange, gerade Spule	15
Fig. 84-17	Magnetische Kopplung	17
Fig. 84-18	Kopplung gerader Spulen.....	18
Fig. 84-19	Idealer Transformator	20
Fig. 84-20	Betrachtung am idealen Transformator	20
Fig. 84-21	Transformator	21
Fig. 84-22	Ersatzschaltbild zum Transformator.....	22
Fig. 84-23	Ersatzschaltbild des realen Transformators	23
Fig. 84-24	Amplitudengang eines realen Transformators	23
Fig. 84-25	Wirbelstromverluste	25
Fig. 84-26	Eisenverluste in Watt pro kg.....	26
Fig. 84-27	Verlustbehafteter Transformator im Leerlauf und Kurzschluss	26
Fig. 84-28	Energie der Induktivität.....	27
Fig. 84-29	Magnetische Feldenergie und Kreisringspule	28
Fig. 84-30	Innere Induktivität eines Drahtes	29
Fig. 84-31	Kraft im Luftspalt.....	29
Fig. 84-32	Dia- oder paramagnetisches Blech im Luftspalt.....	30
Fig. 84-33	Kraftwirkung durch Wirbelströme	31
Fig. 84-34	Wirbelstrommotor. Aus [L 84-1].....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 84-1	Hallkonstante.....	9
--------------	--------------------	---