

## 1.4 Spulen und Transformatoren

### 1.4.1 Elektrotechnische Grundlagen

#### Magnetismus und Elektromagnetismus

Ein Körper heißt *magnetisch*, wenn er Eisen oder Stahl anzieht. *Dauermagnete* (Permanentmagnete) üben diese Wirkung beständig aus. Wir merken uns:

- jeder Magnet hat zwei Pole, die man als Nord- und Südpol (N und S) bezeichnet,
- jeder Magnet ist von einem Kraftfeld umgeben (magnetisches Feld oder kurz Magnetfeld),
- gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an.

#### Elektromagnetismus

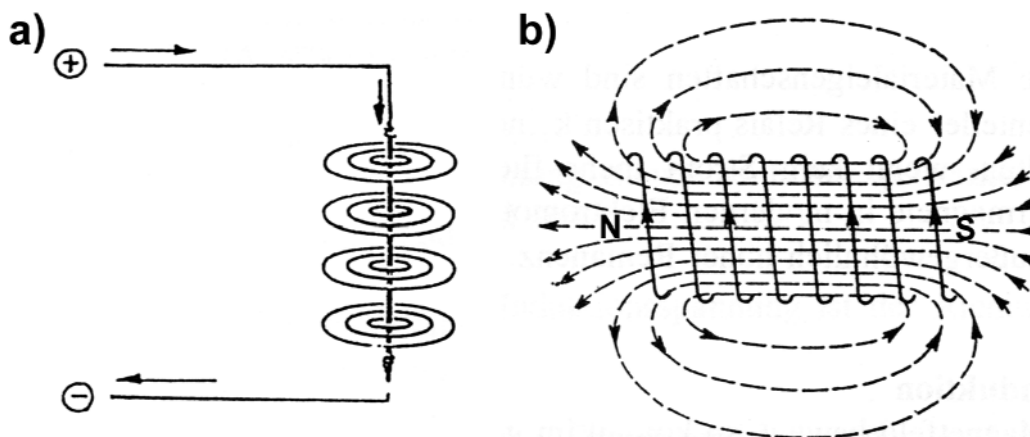
Wir merken uns: Jede Elektronenbewegung - also jeder Stromfluß - hat zur Folge, daß sich ein Magnetfeld aufbaut. Mit anderen Worten: jeder stromdurchflossene Leiter ist stets von einem Magnetfeld umgeben (Abbildung 1.4.1a).

#### Die Spule

Eine Spule erhält man durch Aufwickeln eines drahtförmigen Leiters, wodurch sich bei Stromfluß ein gebündeltes Magnetfeld ergibt (Abbildung 1.4.1b). Bringt man einen Eisenkern in die Spule, wird die magnetische Wirkung noch weiter verstärkt.

*Wir merken uns:*

Die Feldstärke des von einer Spule erzeugten Magnetfeldes ist um so größer, je mehr Windungen sie hat und je stärker der fließende Strom ist.



**Abbildung 1.4.1** Elektromagnetismus. a) das Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter; b) das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

#### Die Permeabilität

Die Permeabilität ist eine Zahlenangabe, die kennzeichnet, wie Stoffe im Magnetfeld den Feldverlauf beeinflussen. Die (relative) Permeabilität des Vakuums ist definitionsgemäß = 1.

## Die magnetischen Eigenschaften der Stoffe

Entsprechend der Größenordnung der Permeabilität teilt man die Stoffe in 3 Gruppen ein:

1. paramagnetische Stoffe. Ein paramagnetischer Stoff drängt die Feldlinien - verglichen mit deren Verlauf im Vakuum - weiter auseinander (mit anderen Worten: ein paramagnetischer Kern in einer Spule schwächt deren Magnetfeld ab). Die Permeabilität ist kleiner als Eins.
2. diamagnetische Stoffe. Ein diamagnetischer Stoff bündelt die Feldlinien in gewissem (geringem) Maße. Die Permeabilität ist größer als Eins.
3. ferromagnetische Stoffe. Ein ferromagnetischer Stoff bündelt die Feldlinien in starkem Maße. Die Permeabilität liegt in der Größenordnung von 1000 und mehr. Ferromagnetisch sind Eisen, Nickel, Kobalt und verschiedene Legierungen.

*Wir merken uns:*

Die Permeabilität dia- und paramagnetischer Stoffe liegt nahe bei 1. In der Praxis können wir diese Stoffe als "unmagnetisch" ansprechen.

## Weich- und hartmagnetische Werkstoffe - die Remanenz

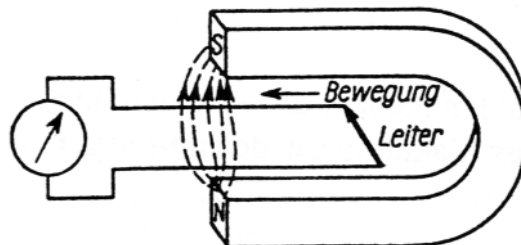
Ein weichmagnetischer Werkstoff (z. B. ein Kern aus weichem Eisen) bündelt äußere Magnetfelder (z. B. als Kern in einer Spule), wird aber nach dem Verschwinden des Feldes selbst nicht magnetisch. Ein hartmagnetischer Werkstoff (z. B. ein Kern aus Stahl) behält einen gewissen Magnetismus bei, auch wenn kein äußeres Magnetfeld mehr vorhanden ist; er ist zum Dauermagneten geworden. Diese "übriggebliebene" Magnetisierung heißt Remanenz.

*Wir merken uns:*

Beide Materialeigenschaften sind wünschenswert. So dürfen die "Eisenteile" eines Relais praktisch keine remanente Magnetisierung behalten, wenn kein Strom mehr fließt. Hingegen beruhen die Dauermagnete in modernen Elektromotoren auf Sonderwerkstoffen mit außergewöhnlich hoher Remanenz.

## Die elektromagnetische Induktion

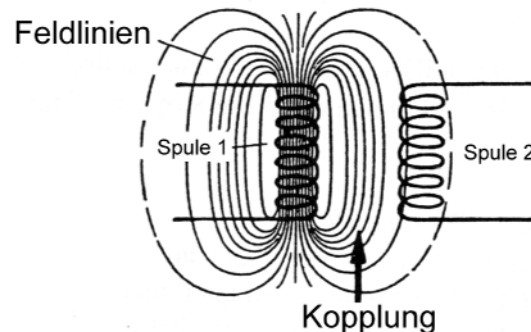
Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so kommt im geschlossenen Stromkreis ein Stromfluß zustande (Abbildung 1.4.2); der bewegte Leiter wird zur Spannungsquelle. Man sagt, daß im Leiter eine Spannung *induziert* wird (Induktionsspannung).



**Abbildung 1.4.2** Bewegung eines Leiters im Magnetfeld. Das links dargestellte Meßgerät (Amperemeter) zeigt die induzierten Stromstöße an

Die Ursache der Induktionsspannung ist nicht das Hin- und Herbewegen, sondern die Tatsache, daß sich - aus Sicht des Leiters - die Stärke des Magnetfeldes, das ihn durchfließt, infolge der

Bewegung zeitlich ändert. Wird das Magnetfeld auf andere Weise verändert, z. B. durch Beeinflussung des Stroms in einer Spule, so ruft dies in einem vom Magnetfeld durchfluteten Leiter ebenfalls eine Induktionsspannung hervor (Prinzip des Transformators, Abbildung 1.4.3).



**Abbildung 1.4.3** Der Transformator: wenn sich das Magnetfeld der Spule 1 ändert, wird in Spule 2 eine Spannung induziert.

*Wir merken uns:*

- die Induktionsspannung ist um so höher, je stärker sich das den Leiter durchflutende Magnetfeld ändert,
- die Richtung der Induktionsspannung ist der Richtung der Magnetfeldänderung entgegengesetzt.

*Hinweis:*

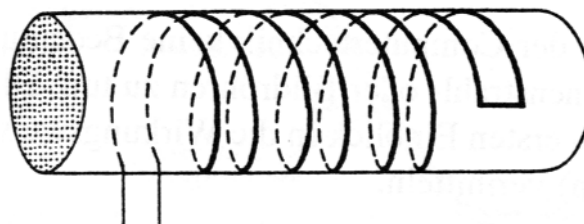
Auch "gewöhnliche" Drähte (und Leiterzüge auf Leiterplatten) sind, wenn Strom durchfließt, von einem Magnetfeld umgeben. Stromänderungen bewirken deshalb Induktionsspannungen in benachbarten Leitern. Das ist eine der Ursachen des Übersprechens (Crosstalk).

### Selbstinduktion

Ändert sich die Stärke des Stroms, der durch eine Spule fließt, so wird in einem benachbarten Leiter eine Spannung induziert. Aber auch die Spule selbst wird vom Magnetfeld durchflutet. Folglich wird in ihr selbst eine Induktionsspannung wirksam.

### Verminderung der Selbstinduktion

Die Selbstinduktion lässt sich beträchtlich vermindern (im Idealfall: aufheben), wenn man Hin- und Rückleiter unmittelbar nebeneinander wickelt (zweidrähtige bzw. bifilare Wicklung, Abbildung 1.4.4).



**Abbildung 1.4.4** Bifilare Wicklung

## Wirbelströme

Induktionsspannungen entstehen nicht nur in drahtförmigen Leitern, sondern auch in metallischen Flächen. Da diese einen sehr geringen Widerstand haben, äußert sich die Wirkung der Induktion in zirkulierenden Strömen (Wirbelströmen). Starke Wirbelströme heizen das Material auf und bedeuten Energieverlust. Von wechselnden Magnetfeldern durchflutete "Eisen"kerne bestehen deshalb aus geschichteten, voneinander isolierten dünnen Blechen oder aus gesinterten Pulverwerkstoffen (Ferritwerkstoffen).

### *Hinweis:*

Es gibt weich- und hartmagnetische Ferritwerkstoffe (Ferrite). Weichmagnetische Ferrite werden für elektromagnetische Bauelemente (Transformatoren, Spulen in Schwingkreisen, Drosseln) verwendet, die bei höheren Frequenzen (von einigen kHz bis in den UHF-Bereich) eingesetzt werden. Hartmagnetische Ferrite dienen als leistungsfähige Dauermagnete beispielsweise in Elektromotoren. Die Sintertechnologie gestattet es, auch komplizierte Formen, wie Ringkerne, Topfkerne, Spulenkern mit Gewinde usw. kostengünstig zu fertigen.

## Magnetische Durchflutung $\Theta$

Die magnetische Durchflutung  $\Theta$  (Theta) ist ein Maß für die Stärke des Magnetfeldes. Bei einer Spule hängt sie direkt von Stromstärke I und Windungszahl w ab:

$$\Theta = w \cdot I$$

Die magnetische Durchflutung wird in Amperewindungen (Aw) gemessen.

## Magnetische Feldstärke H

Die magnetische Feldstärke H gibt die Stärke des Magnetfeldes an, und zwar bezogen auf den Abstand vom Ursprung des Feldes:

$$H = \frac{\Theta}{d} = \frac{w \cdot I}{d}$$

Die magnetische Feldstärke wird in  $\frac{Aw}{cm}$  gemessen.

## Magnetischer Fluß $\Phi$

Der magnetische Fluß  $\Phi$  (Phi) kennzeichnet die Anzahl der magnetischen Feldlinien, die einen bestimmten Querschnitt durchdringen. Der magnetische Fluß wird in Weber (Wb) bzw. Voltsekunden (Vs) gemessen. 1 Wb = 1 Vs ist der magnetische Fluß, der in einer ihn umschlingenden Windung in 1 s eine Spannung von 1 V induziert.

## Magnetische Flußdichte bzw. Induktion B

Die Flußdichte oder magnetische Induktion B kennzeichnet den magnetischen Fluß  $\Phi$  durch eine bestimmte Fläche A, die senkrecht zu den Feldlinien steht:

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

Die Flußdichte wird in  $\frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$  bzw.  $\frac{\text{Wb}}{\text{cm}^2}$  oder in Tesla (T) gemessen:

$$1 \text{ T} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Eine ältere, gelegentlich noch gebrauchte Maßeinheit ist das Gauß (G):

$$1 \text{ G} = 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} = 10^{-12} \text{ T}$$

Die magnetische Induktion eines Stoffes mit der Permeabilität  $\mu$ , der einer magnetischen Feldstärke  $H$  ausgesetzt ist, ergibt sich zu:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H$$

### Die Permeabilität $\mu$

Die Permeabilität  $\mu$  kennzeichnet die "Güte" des Magnetwerkstoffes und wird dimensionslos (als bloßer Zahlenwert) angegeben (relative Permeabilität, auch mit  $\mu_{\text{rel}}$  bezeichnet). Im Vakuum ist definitionsgemäß  $\mu = 1$ . Die Permeabilität der Luft entspricht näherungsweise der des Vakuums.

### Die absolute Permeabilität (Induktionskonstante)

Die absolute Permeabilität (Induktionskonstante)  $\mu_0$  (sprich: Mü-Null) ist eine Naturkonstante:

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \approx 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

Mit diesem Wert muß die relative Permeabilität multipliziert werden.

#### *Hinweis:*

Die relative Permeabilität ist keine konstante Materialeigenschaft, sondern sie hängt von der magnetischen Feldstärke ab, der das Material ausgesetzt ist. Der Zusammenhang wird in Magnetisierungskurven dargestellt.

### Das Induktionsgesetz

Das Induktionsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Magnetfeldänderung und Induktionsspannung.

Der Betrag der Induktionsspannung entspricht dem Betrag der Änderung des magnetischen Flusses, bezogen auf die Zeit:

$$|U| = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$$

Da die Induktionsspannung der Flußänderung entgegengerichtet ist, kann man schreiben:

$$U = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Wird die Flußänderung von einer stromdurchflossenen Spule erbracht, läßt sich das Induktionsgesetz folgendermaßen angeben:

- für eine Spule mit  $w$  Windungen:

$$U = - w \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

- in Abhängigkeit von der Induktivität:

$$U = - L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}; \quad U = - L \cdot \frac{dI}{dt}$$

### **Induktivität L**

Die Induktivität ist ein Maß dafür, wie "gut" eine Spule ist. Sie ist um so höher, je größer der Spannungsstoß ist, der durch eine bestimmte Stromänderung induziert wird:

$$L = \frac{dU}{dI}$$

Die Induktivität wird in  $\frac{Vs}{A}$  bzw. in Henry (H) gemessen.

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ Vs}}{\text{A}}$$

Eine Spule hat eine Induktivität von 1 H, wenn eine Stromänderung von 1 A im Verlauf von 1 s eine Spannung von 1 V induziert. (Unter "Stromänderung" können wir uns beispielsweise vorstellen, daß der Strom in 1 s von Null auf einen Endwert von 1 A gleichmäßig ansteigt.)

### **Der magnetische Kreis**

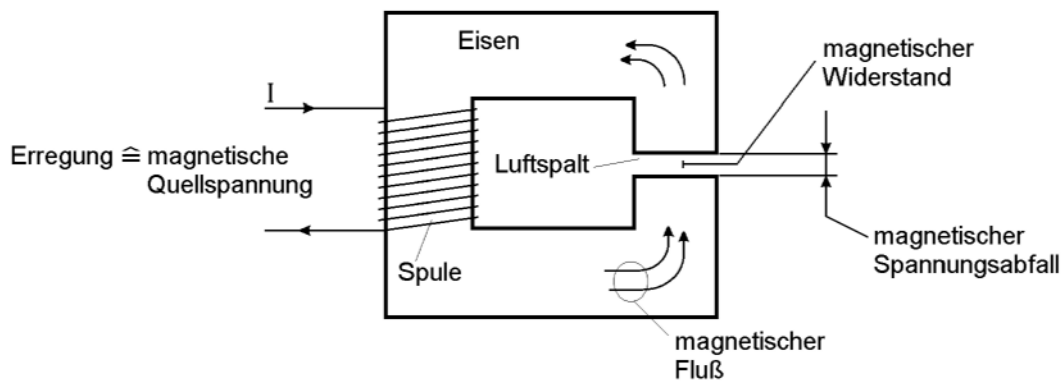
In einer von einem magnetischen Fluß durchsetzten Anordnung aus ferromagnetischem Material (einem magnetischen Kreis, Abbildung 1.4.5) gilt ein Zusammenhang, der mit dem Ohmschen Gesetz vergleichbar ist:

$$\text{Magnetischer Flu\ss} = \frac{\text{Magnetische Spannung (Durchflutung)}}{\text{magnetischer Widerstand}} \quad \varphi = \frac{\Theta}{R_m}$$

Eine solche Anordnung l\$\$sst sich mit einem Stromkreis vergleichen: der magnetische Flu\$\$ entspricht dem Strom, die Durchflutung der Spannung. Der magnetische Widerstand  $R_m$  ergibt sich durch Umstellung der Formel als Verh\$\$ltnis von Durchflutung und magnetischem Flu\$\$:

$$R_m = \frac{\Theta}{\varphi}$$

$R_m$  wird in  $\frac{Aw}{Vs}$  bzw.  $\frac{Aw}{Wb}$  gemessen.



**Abbildung 1.4.5** Der magnetische Kreis

Der magnetische Widerstand in einem Magnetkreis ergibt sich aus L\$\$nge  $l$ , Querschnittsfl\$\$che  $A$  und Permeabilit\$\$t  $\mu$ :

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_{\text{rel}} \cdot A}$$

### Die Magnetisierbarkeit der Werkstoffe

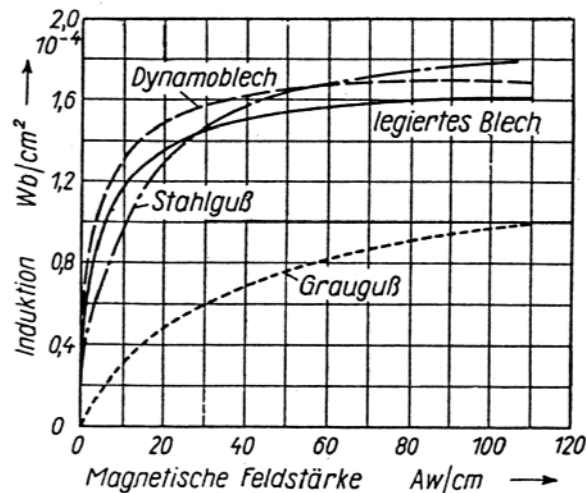
Die Flu\$\$dichte h\$\$ngt von der magnetischen Feldst\$\$rke  $H$  und der Permeabilit\$\$t  $\mu$  ab:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot H$$

Die Flu\$\$dichte ist aber nicht durch beliebiges Erh\$\$hen der Feldst\$\$rke beliebig steigerbar. Vielmehr gelangt jedes Material von einer gewissen Feldst\$\$rke an in eine magnetische S\$\$ttigung und ist so nicht weiter magnetisierbar. Abbildung 1.4.6 veranschaulicht dies anhand der Magnetisierungskurven einiger ferromagnetischer Werkstoffe.

### Die Sättigung in der Praxis

Es muß grundsätzlich vermieden werden, einen magnetischen Kreis in die Sättigung zu treiben. Sättigung bedeutet, daß die relative Permeabilität und damit die Induktivität abfällt. Damit verändern sich alle Kennwerte, die von diesen Größen abhängen. Ein magnetischer Kreis, im Bereich der Sättigung betrieben, verhält sich in starkem Maße nichtlinear. Um zu vermeiden, daß dieser Bereich im praktischen Betrieb durchlaufen wird, kann man den magnetischen Widerstand erhöhen. Das geschieht auf einfache Weise dadurch, daß man einen *Luftspalt* vorsieht.



**Abbildung 1.4.6** Magnetisierungskurven (Beispiele). Die Kurven beschreiben die Abhängigkeit der Flußdichte bzw. Induktion von der Feldstärke

*Wir merken uns:*

Elektromagnetische Bauelemente, die von Wechselstrom mit Gleichanteil durchflossen werden (das sind z. B. Drosselspulen in Netzteilen oder NF-Übertrager) müssen im Eisenkreis einen Luftspalt haben. Solche Bauelemente werden durch den fließenden Gleichstrom-Anteil ständig vormagnetisiert, so daß der überlagerte Wechselstrom-Anteil den Kern eher in die Sättigung treiben könnte. Der Luftspalt bewirkt, daß die Permeabilität über einen größeren Bereich der magnetischen Feldstärke von dieser nahezu linear abhängt (Linearisierung).

## 1.4.2 Spulen

### Die Spule im Wechselstromkreis

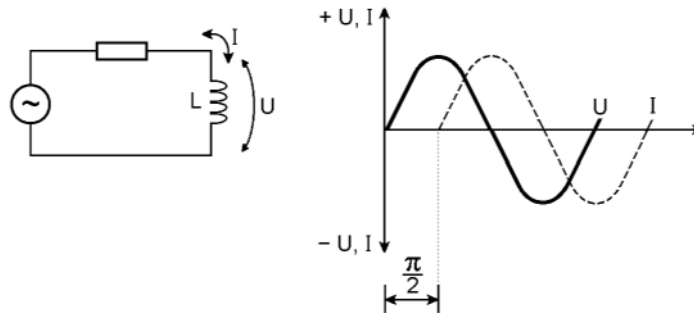
Wenn wir einer Spule Ladungsträger zuführen, bewirkt der Stromanstieg, daß eine EMK induziert wird, die dem weiteren Stromanstieg entgegengerichtet ist. Erst mit deren Abklingen wird die Spule zum Leiter, durch den Strom fließt. Der Strom kann erst dann sein Maximum erreichen, wenn die Gegen-EMK abgeklungen ist. Wir beobachten also die Reihenfolge: erst Spannung, dann Stromfluß. Man sagt, die Spannung eilt dem Strom voraus (positive Phasenverschiebung). Bei einer idealen Spule (deren Draht ein idealer Leiter ist) beträgt die Phasenverschiebung  $\pi/2$  bzw.  $90^\circ$  (Abbildung 1.4.7). Der Blindwiderstand einer idealen Spule ergibt sich zu:

$$X_L = \omega L = 2 \pi f L$$



*Wir merken uns:*

Der Blindwiderstand einer Spule *steigt* mit steigender Frequenz. Mit anderen Worten: Die Spule läßt Gleichstrom passieren und schwächt Wechselstrom um so mehr ab, je höher dessen Frequenz ist (Anwendung: Drosselspule).



**Abbildung 1.4.7** Die Spule im Wechselstromkreis

### Die Spule als Energiespeicher

Eine Spule der Induktivität  $L$ , die vom Strom  $I$  durchflossen wird, hat folgenden Energiebetrag  $E$  gespeichert:

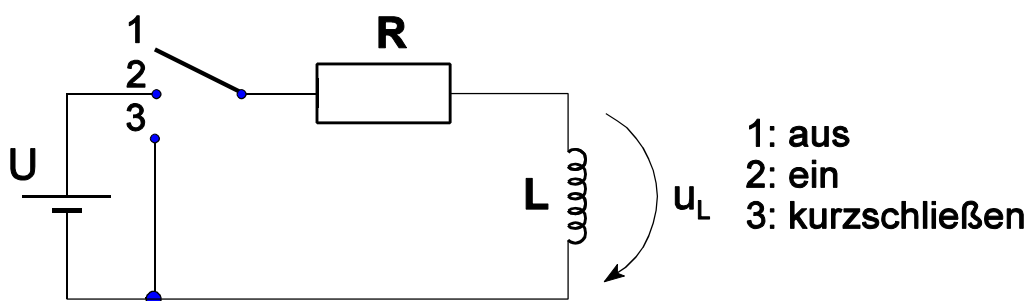
$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

Beispiel: 0,5 H, 1 A.

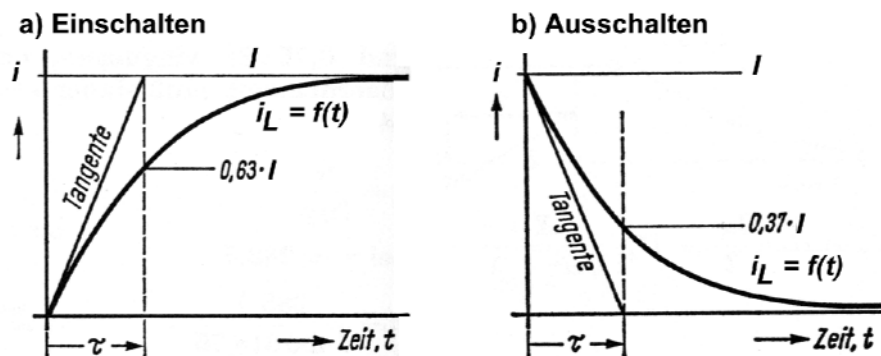
$$E = 0,5 \cdot 0,5 \text{ Vs/A} \cdot (1 \text{ A})^2 = 0,25 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s} = 0,25 \text{ Ws} = 0,25 \text{ J}$$

### Ein- und Ausschalten einer Spule über einen Widerstand - die Zeitkonstante

Wird eine Spule über einen Widerstand an eine Spannungsquelle geschaltet oder wird der fließende Strom unterbrochen, so ergeben sich charakteristische Strom- und Spannungsverläufe (Abbildungen 1.4.8 bis 1.4.10).



**Abbildung 1.4.8** Ein- und Ausschalten einer Spule (Prinzipschaltung)



**Abbildung 1.4.9** Der Stromverlauf beim Ein- und Ausschalten

Geben wir eine Spannung auf eine Spule, so ruft der einsetzende Stromfluß eine Induktionsspannung hervor. Diese ist der verursachenden Stromänderung entgegengerichtet. Folglich wird sich die Spule zunächst wie ein sehr hoher Widerstand verhalten.

#### Einschalten

Die Spule ist stromlos ( $i_L = 0$ ). Wir bringen den Schalter in Abbildung 1.4.8 in Stellung 2, verbinden also die Reihenschaltung von Widerstand R und Induktivität L mit der Spannungsquelle. Der durch die Spule fließende Strom  $i_L$  wird nach einer Exponentialfunktion ansteigen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert ( $i_L = I = U/R$ ) erst bei  $t = \infty$  erreicht (also nie).

$$i_L = \frac{U}{R} (1 - e^{-t \frac{R}{L}}) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

#### Die Zeitkonstante

Der Quotient des Widerstands- und des Induktivitätswerts entscheidet über den Stromanstieg. Er wird deshalb als Zeitkonstante  $\tau$  bezeichnet:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

#### Typische Zeitpunkte beim Einschalten:

- nach der Zeit  $\tau$  fließen 63% des Dauerstromes durch die Spule ( $0,63 U/R$ ),
- nach der Zeit  $2 \tau$  fließen 77% des Dauerstromes durch die Spule ( $0,77 U/R$ ),
- nach der Zeit  $4 \tau$  fließen 98% des Dauerstromes durch die Spule ( $0,98 U/R$ ),,
- nach der Zeit  $7 \tau$  weicht der Strom weniger als 100 ppm vom Dauerstrom  $U/R$  ab.

Die Tangente im Punkt  $t = 0$  schneidet die 100%-Linie im Abstand  $\tau$ .

#### Ausschalten (1)

Die Spule wird von Gleichstrom durchflossen ( $i_L = U/R$ ). Um den Stromfluß abzustellen, bringen wir den Schalter in Abbildung 1.4.7 in Stellung 3, bilden also aus Widerstand R und Spule L einen geschlossenen Stromkreis. Die Stromänderung führt zu einer Induktionsspannung, die ihrerseits einen Stromfluß bewirkt. Der die Spule durchfließende

Strom  $i_L$  wird nach einer Exponentialfunktion abfallen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert ( $u_c = 0$ ) erst bei  $t = \infty$  erreicht (also nie).

$$i_L = \frac{U}{R} e^{-t \frac{R}{L}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

*Typische Zeitpunkte beim Ausschalten:*

- nach der Zeit  $\tau$  ist der Strom auf 37% des Dauergleichstroms abgeklungen ( $0,37 U/R$ ),
- nach der Zeit  $2 \tau$  ist der Strom auf 14% des Dauergleichstroms abgeklungen ( $0,14 U/R$ ),
- nach der Zeit  $4 \tau$  ist Strom auf 2% des Dauergleichstroms abgeklungen ( $0,02 U/R$ ),
- nach der Zeit  $7 \tau$  weicht der Strom als 100 ppm von 0 A ab.

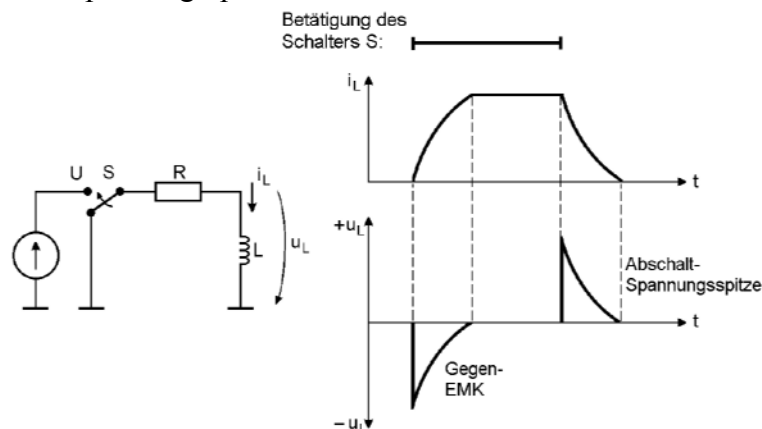
Die Tangente im Punkt  $t = 0$  schneidet die Nulllinie im Abstand  $\tau$ .

*Ausschalten (2)*

Um den Stromfluß abzustellen, bringen wir (vgl. Abbildung 1.3.4) den Schalter wieder in Stellung 1. Die Spule hängt also gleichsam in der Luft. In der Theorie bewirkt die unendlich schnelle Stromänderung eine unendlich hohe und unendlich kurze Spannungsspitze (Abschalt-Induktionsspannung). In der Praxis entsteht eine sehr hohe Spannungsspitze (bis hin zu einigen kV), die im Laufe der Zeit abklingt, und zwar nach eine Exponentialfunktion gemäß Abbildung 1.4.9b, wobei sich die Zeitkonstante aus der Induktivität und aus den parasitären Widerständen ergibt. Die Höhe der Spannungsspitze hängt von der gespeicherten Energie und von der Geschwindigkeit der Stromänderung ab.

*Die Spannung über der Spule*

Wenn wir einen Impuls auf eine Spule geben, so verhält sich diese zunächst wie ein *sehr hoher Widerstand* und wird dann allmählich zum (*näherungsweise*) *Kurzschluß* (es wirkt dann nur der Leitungswiderstand der Drahtwicklung). Wenn wir eine stromdurchflossene Spule abschalten, so bedeutet das wiederum eine Stromänderung. Diese führt zu einer Induktionsspannung, die gleiche Polarität hat wie die ursprünglich anliegende Spannung; es entsteht eine Abschalt-Spannungsspitze.



**Abbildung 1.4.10** Strom - und Spannungsverläufe beim Ein- und Ausschalten

*Einschalten:*

$$u_L = - U e^{-\frac{t}{\tau}}$$

*Ausschalten durch Kurzschließen über Widerstand R:*

$$u_L = U e^{-\frac{t}{\tau}}$$

*Abschalten:*

$$u_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ wobei sich } \tau \text{ aus der Beschaltung ergibt}$$

### **Der $A_L$ -Wert**

Der  $A_L$ -Wert ist die übliche Angabe, um die Eigenschaften eines bestimmten Spulenkernes zu kennzeichnen. Der Wert ist ein Maß für die Selbstinduktion einer Spule, die man mit dem betreffenden Kern bauen kann. Aus der Angabe kann man berechnen, wieviele Windungen erforderlich sind, um mit dem jeweiligen Kern eine Spule mit einer bestimmten Induktivität zu realisieren. Der  $A_L$ -Wert wird üblicherweise in nH angegeben. Er hat genau genommen die Form  $nH/w^2$  (nH/Windungsquadrat). Es gilt:

$$L = A_L \cdot n^2; \quad n = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

### **Kennwerte**

Während Widerstände und Kondensatoren typischerweise als Normteile bezogen werden, werden die meisten Spulen nach Bedarf angefertigt (= gewickelt). Es gibt nur vergleichsweise wenige als "Industriestandards" anzusprechende vorgefertigte Typen (Induktivitäten für Schaltnetzteile und Spannungswandler, Entstördrosseln usw.). Deshalb genügt hier ein Überblick über die wichtigsten Kennwerte:

- Induktivitätswert (Nennwert). Die Induktivität ist dem Quadrat der Windungszahl proportional:  $L \sim w^2$ . Zur Induktivitätsberechnung: es kommt darauf an, wie die Spule aufgebaut ist (Zylinderspule, Toroid usw.). Vgl. die Spezialliteratur.
- Toleranz. Die zulässige Abweichung der Induktivität wird in Prozenten vom Nennwert angegeben.
- Wicklungswiderstand. Der ohmsche Widerstand der Wicklung. Aus gestreckter Länge, Querschnitt und spezifischem Widerstand des Drahtmaterials zu berechnen.
- Verlustfaktor. Der Verlustfaktor  $\tan \delta$  (Tangens Delta) ist das Verhältnis vom ohmschen zum induktiven Widerstand (bzw. vom Wirk- zum Blindwiderstand) bei einer bestimmten Frequenz. (Die ideale Spule wäre ein reiner Blindwiderstand, und der Strom würde der Spannung um  $90^\circ$  nacheilen. Jede reale Spule hat aber ohmsche Widerstandsanteile, so daß sich eine geringere Phasenverschiebung ergibt.) Der Verlustfaktor ist frequenzabhängig (s. Abschnitt 1.4.3).

- Güte. Die Güte  $Q$  ist der Kehrwert des Verlustfaktors:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta}$$

### Ersatzschaltung

Abbildung 1.4.11 zeigt die typische Ersatzschaltung einer Spule.

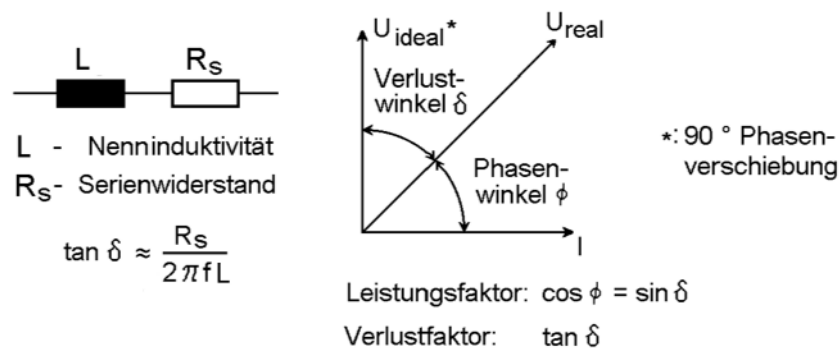


Abbildung 1.4.11 Ersatzschaltung einer Spule

## 1.4.3 Spulen und Transformatoren im Schaltplan

In Abbildung 1.4.12 sind die üblichen Schaltsymbole für Spulen und Transformatoren zusammengestellt.

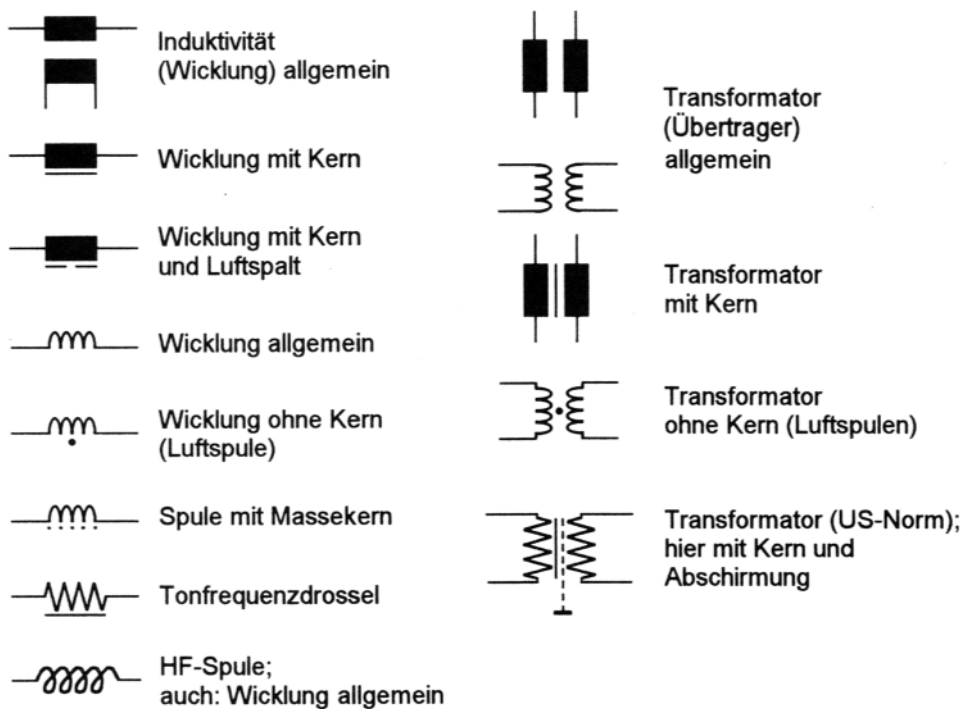
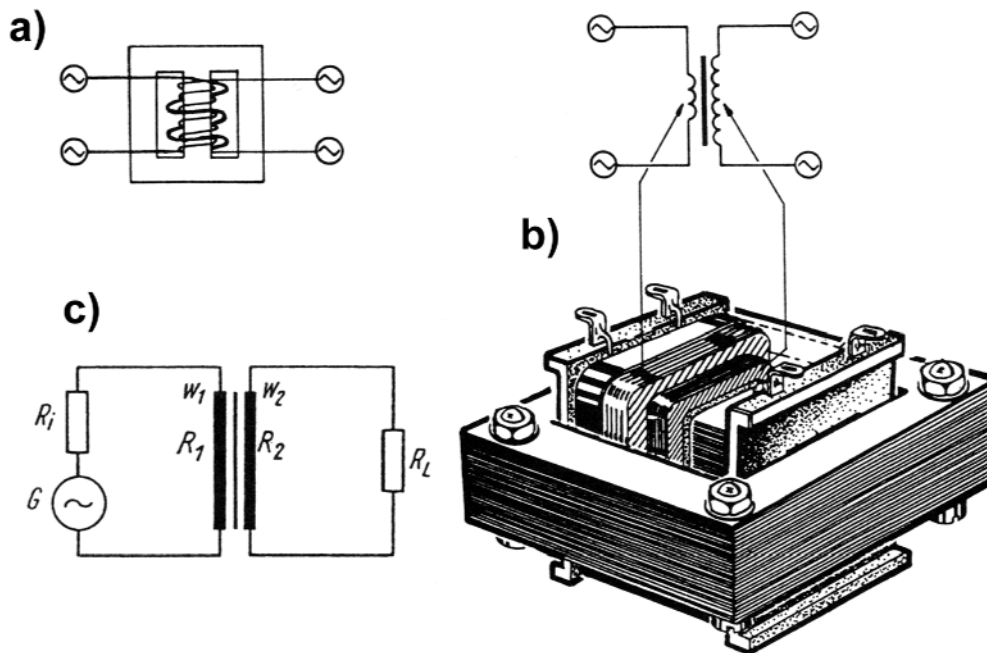


Abbildung 1.4.12 Schaltsymbole für Spulen und Transformatoren

## 1.4.4 Transformatoren

Transformatoren (kurz: Trafos) oder Übertrager sind elektromagnetische Bauelemente mit wenigstens zwei voneinander isolierten Spulen (Wicklungen). Die erste Wicklung (Primärwicklung) wird von außen erregt, die zweite Wicklung (Sekundärwicklung) wirkt als Spannungsquelle und kann einen weiteren, vom ersten galvanisch getrennten Stromkreis ansteuern (Abbildung 1.4.13). Transformatoren können Wechselstrom oder Impulse übertragen.



**Abbildung 1.4.13** Der Transformator. a) grundsätzlicher Aufbau, b) Schaltbild und technische Ausführung als Netztransformator, c) Transformator mit primärem und sekundärem Stromkreis

Transformatoren haben folgende grundsätzliche Anwendungsgebiete:

- das Übertragen von Leistung bei einer festen Frequenz (Beispiel: Netztransformator),
- Widerstandsanpassung,
- Spannungsübertragung über einen größeren Frequenzbereich,
- Impulsübertragung.

### Grundlegende Zusammenhänge

Der ideale (verlustlose) Transformator

Beim verlustlosen Transformator sind - weil nichts verlorenght - Eingangs- und Ausgangsleistung gleich:

$$P_1 = P_2; \text{ damit } I_1 U_1 = I_2 U_2$$

Die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = \ddot{u}_U \text{ (Spannungsübersetzung)}$$

Die Stromstärken verhalten sich umgekehrt zu den Windungszahlen:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \ddot{u}_I \text{ (Stromübersetzung)}$$

Die Widerstände verhalten sich wie die Quadrate der Windungszahlen:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{W_1^2}{W_2^2} = (\ddot{u}_U)^2$$

Zum Widerstandsbegriff: Als Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  betrachten wir hier die Verhältnisse von Spannung und Strom auf der Primär- und auf der Sekundärseite (vgl. auch Abbildung 1.4.13c). Es gilt dann:

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2}; \text{ damit wird } \frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{I_1} \cdot \frac{I_2}{U_2} = \frac{W_1^2}{W_2^2}$$

Diese Zusammenhänge haben Auswirkungen auf die Gestaltung des Transformators. Wir merken uns:

- je mehr Windungen eine Wicklung hat, um so höher ist die Spannung, für die sie bestimmt ist,
- hat eine der beiden Wicklungen weniger Windungen und sind diese aus dickerem Draht gefertigt, so ist diese Wicklung für einen höheren Strom bei geringerer Spannung vorgesehen.

Damit bereitet es keine Schwierigkeit, einen einfachen Netztrafo auch ohne Datenblatt oder Wicklungszettel richtig anzuschließen: Die Wicklung mit dickerem Draht ist die Sekundärwicklung (geringere Spannung bei höherem Strom), die mit dem dünneren Draht die Primärwicklung.

### Widerstandsanpassung

Auf der Primärseite eines Transformators wird ein Widerstand wirksam, der  $(\ddot{u}_U)^2$  mal so groß ist wie der Lastwiderstand  $R_L$ . Durch einen entsprechend ausgelegten Transformator kann man somit eine Wechselspannungsquelle an einen beliebigen Eingangswiderstand anpassen. Dazu muß das Übersetzungsverhältnis so gewählt werden, daß der Widerstand auf der Primärseite dem Innenwiderstand der Spannungsquelle gleich ist (Leistungsanpassung).

## Induktivitäten

Beim einfachen Transformator mit zwei Wicklungen sind drei Induktivitätskennwerte zu unterscheiden:

- die Induktivität  $L_1$  der Primärwicklung,
- die Induktivität  $L_2$  der Sekundärwicklung,
- die Gegeninduktivität  $M$ .

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left( \frac{W_1}{W_2} \right)^2 \quad \text{bzw.} \quad \frac{L_1}{L_2} = (\ddot{u}_U)^2$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \text{ (idealer Transformator)}$$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \text{ (realer Transformator; der Kopplungsfaktor } k \text{ ist stets } < 1)$$

## Der reale Transformator

Jeder reale Transformator hat Verluste und somit einen Wirkungsgrad  $< 1$ . Die einzelnen Ursachen kann man folgendermaßen unterscheiden:

- ohmsche Verluste. Deren Ursache ist der endliche Durchgangswiderstand der Wicklungsdrähte.
- Streuverluste. Nicht alle magnetischen Feldlinien verbleiben im magnetischen Kreis. Somit wirkt nicht die gesamte magnetische Energie auf die Sekundärwicklung.
- Wirbelstromverluste. Im Kern entstehen Wirbelströme. Dies absorbiert einen Teil der Energie des Magnetfeldes. Abhilfe: gegeneinander isolierte Bleche (je dünner die Bleche, um so geringer die Wirbelstromverluste) oder Herstellung des Kerns aus Sinterwerkstoffen (Ferriten).
- Hystereseverluste. Diese entstehen durch das ständige Ummagnetisieren des Kerns.

Die Wirbelstrom- und Hystereseverluste bezeichnet man insgesamt als Eisenverluste (wozu noch weitere, hier weniger bedeutsame Effekte beitragen).

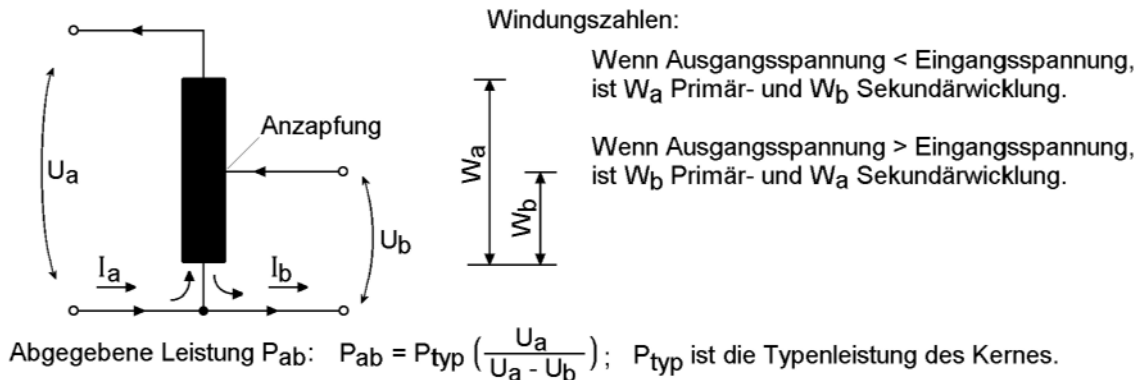
Wir merken uns:

- ohmsche Verluste erwärmen den Draht, Eisenverluste den Kern,
- der reale Transformator hat einen Wirkungsgrad zwischen 70 und 95%,
- die Sekundärseite des Transformators verhält sich wie jede andere Spannungsquelle. Sie hat einen endlichen Innenwiderstand, und ihre Leerlaufspannung ist größer als die Spannung unter Last.
- Transformatoren trennen zwar galvanisch, sind aber nicht rückwirkungsfrei.



### Der Spar- oder Autotransformator

Spar- oder Autotransformatoren haben keine getrennten Primär- und Sekundärwicklungen. Sie haben statt dessen nur eine Wicklung mit verschiedenen Anzapfungen, so daß ein Teil der Wicklung gleichzeitig dem Primär- und dem Sekundärkreis angehört (Abbildung 1.4.14).



**Abbildung 1.4.14** Spar- oder Autotransformator

Die Vorteile:

- ein Teil des Stroms wird nicht durch induktive Kopplung, sondern direkt (galvanisch) übertragen; deshalb kann man bei gleicher Kerngröße mehr Leistung übertragen als mit einem herkömmlichen Transformator,
- im gemeinsamen Wicklungsteil sind die Primär- und Sekundärströme entgegengesetzt gerichtet. Der resultierende Strom wird so geringer; das ermöglicht es, dünneren Draht zu verwenden.

Die Nachteile:

- keine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärkreis,
- die Vorteile treten nur dann ein, wenn die Spannungsübersetzung  $\left( \frac{U_a}{U_b} \right)$  zwischen 1 und 4 liegt.

### Technische Ausführungen

#### *Anzapfungen und mehrere Sekundärwicklungen*

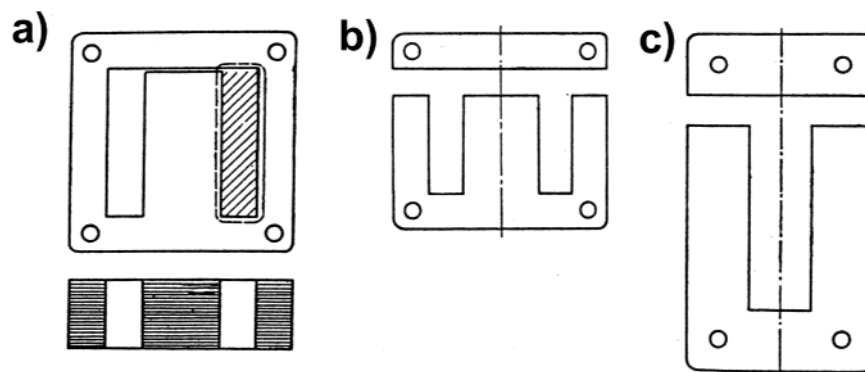
Diese Vorkehrungen dienen dazu, (1) verschiedene Übersetzungsverhältnisse mit einem einzigen Trafotyp zu verwirklichen (je nachdem, über welche Anzapfung man die Wicklung anschließt), und (2) verschiedene Sekundärspannungen bereitzustellen. Sekundärwicklungen mit (Mitten-) Anzapfung sind erforderlich, wenn man symmetrische Spannungen benötigt (beispielsweise zur Zweiweggleichrichtung).

*Praxistips:*

1. Bei mehreren Wicklungen: vor dem Einschalten zweimal hinsehen, ob alles richtig angeschlossen ist. (Vor dem Einbau: Überprüfen, daß die Wicklungen keinen Schluß gegeneinander haben.)
2. Anzapfungen sind an ihren Lötstützpunkten gefährdet (versehentliches Ablöten oder Durchtrennen). Prüfen Sie stets, ob eine angezapfte Wicklung zwischen den beiden äußersten Anschlüssen noch Durchgang hat.

*Kerne*

Es gibt verschiedene Kernformen (M-Schnitt, E/I-Schnitt, U/I-Schnitt usw. (Abbildung 1.4.15)).



**Abbildung 1.4.15** Kernbleche für Netz- und Niederfrequenztransformatoren und -drosseln. a) M-Schnitt, b) E/I-Schnitt, c) U/I-Schnitt

*Kerne mit Luftspalt*

Transformatoren und Drosselspulen, die von Gleichstromanteilen durchflossen werden, brauchen einen Luftspalt im Eisenkreis.

M-Bleche haben von Hause aus einen Luftspalt. Sie werden, wenn das Bauelement einen benötigt, von einer Seite in den Wickelkörper gestopft. M-Kerne ohne Luftspalt werden durch umschichtiges Stopfen hergestellt (die Bleche werden mit der mittleren Zunge abwechselnd von der einen und von der anderen Seite in den Wickelkörper gesteckt).

Bei den anderen Kernformen wird der Luftspalt durch isolierende Zwischenlagen hergestellt. Meist ist die Dicke des Luftspalts weitgehend unkritisch (Wertebereich: 0,03...0,3 mm).

## 1.4.5 Betätigungsmagnete

Der Betätigungsmagnet ist eine Spule, die einen beweglichen Eisenkern in sich hineinzieht (Solenoid) oder eine Spule mit Eisenkern, die einen beweglichen Anker anzieht.

**Die Kraftwirkung**

Die folgenden beiden Formeln dienen dazu, die von einem Betätigungsmagneten ausgeübte Kraft zu bestimmen. Ist ein Luftspalt vorhanden, so gilt:

$$F = \frac{(I_w)^2 \mu_0 A}{2 \cdot (l_{FE} + l_L) \cdot l_L}$$

Die Kraft nimmt mit dem Quadrat des Luftspaltes ab. Für einen magnetischen Kreis ohne Luftspalt (mit "klebendem" Anker) gilt:

$$F = \frac{(I_w)^2 \mu_0 \mu_{FE} A}{2 (l_{FE})^2}$$

Die Bedeutung der Formelzeichen:

- F - Kraft,
- I - Strom,
- w - Windungszahl,
- $\mu_0$  - absolute Permeabilität,
- $\mu_{FE}$  - relative Permeabilität des Kernmaterials,
- $l_{FE}$  - Eisenweglänge (Länge des Kraftlinienverlaufs im Eisen),
- $l_L$  - Luftspalt.