

Physikalische Grundlagen von Transformatoren

[Wikibooks.org](https://de.wikibooks.org/)

12. Februar 2012

Inhaltsverzeichnis

0.1	ZUSAMMENFASSUNG DES PROJEKTS	1
0.2	ZWECK EINES TRANSFORMATORS	2
0.3	PRIMÄR- UND SEKUNDÄRWICKLUNG	3
0.4	BETRIEB MIT EINER DREIECKSPANNUNG	8
0.5	BETRIEB MIT EINER RECHTECKSPANNUNG	14
0.6	BETRIEB MIT EINER SINUSSPANNUNG	20
0.7	DER EISENKERN	22
0.8	WIDERSTANDSTRANSFORMATION	33
0.9	EINZELNACHWEISE	34
0.10	SIEHE AUCH	34
0.11	WEBLINKS	34
1	AUTOREN	35
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	37

KATEGORIE: BUCH¹



Dieses Buch steht im Regal ELEKTROTECHNIK².

0.1 Zusammenfassung des Projekts

- **Zielgruppe:** Alle, die Detailwissen zu Transformatoren suchen und Vorkenntnisse in Mathematik und Physik haben.
- **Lernziele:** Wie verhält sich ein Transformator bei unterschiedlichen Spannungsverläufen? Wie ist er zu dimensionieren? Benötigt er einen Eisenkern? Wo sind die Grenzen der Anwendbarkeit der jeweiligen Formeln?
- **Buchpatenschaft/Ansprechperson:** BENUTZER:HERBERTWEIDNER³
- **Sind Co-Autoren gegenwärtig erwünscht?** Wenn ich erst mal die detaillierte Gliederung fertig habe, könnt ihr euch gern beteiligen!
- **Richtlinien für Co-Autoren:** WP-übliche Gepflogenheiten. Erlaubt ist nur solides Standardwissen, das aus den Induktionsgesetzen folgt.

¹ [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/KATEGORIE%3A%20BUCH](http://de.wikibooks.org/wiki/Kategorie%3A%20Buch)

² [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/REGAL%3AELEKTROTECHNIK](http://de.wikibooks.org/wiki/Regal%3AElektrotechnik)

³ [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/BENUTZER%3AHERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/wiki/Benutzer%3AHerbertWeidner)

- **Projektumfang und Abgrenzung zu anderen Wikibooks:** Es geht nur um Breitbandtransformatoren aller Bau- und Betriebsarten von tiefsten bis zu höchsten Frequenzen mit und ohne Eisenkern. Es werden keine schwingkreisähnlichen RESONANZTRANSFORMATOREN⁴ für sehr hohe Frequenzen behandelt.
- **Themenbeschreibung:** Siehe Inhaltsverzeichnis
- **Aufbau des Buches:**

0.2 Zweck eines Transformators

Ein Transformator hat meist die Aufgabe, den Wert einer Wechselspannung zu vergrößern oder zu verkleinern, wobei nur geringe Leistungsverluste auftreten. Es gibt aber auch Anwendungen, bei denen die galvanische Trennung von Primär- und Sekundärwicklung im Vordergrund steht, weil zwischen beiden große Potentialunterschiede von einigen tausend Volt bestehen. Im folgenden Buch wird auch auf die Besonderheiten eingegangen, die bei *anderen* primärseitigen Kurvenformen als der Sinusform zu beachten sind. Das können in SCHALTREGLERN⁵ Rechteckspannungen sein, wobei sekundärseitig erhebliche Abweichungen der Kurvenform auftreten können. Die Grundfrequenz bleibt erhalten, der Oberwellengehalt kann sich stark ändern.

Bemessungsgrundlagen werden begründet und für hohe und tiefe Frequenzen dargestellt. In einem speziellen Kapitel geht es darum, wieso manche Transformatoren einen Eisenkern benötigen, andere nicht. Ein Eisenkern bringt neben Vorteilen immer auch Nachteile mit, die im Detail diskutiert werden.

⁴ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/RESONANZTRANSFORMATOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Resonanztransformator)

⁵ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SCHALTREGLER](http://de.wikipedia.org/wiki/Schaltregler)

0.3 Primär- und Sekundärwicklung

0.3.1 Veränderung der Magnetflussdichte B in der Primärwicklung

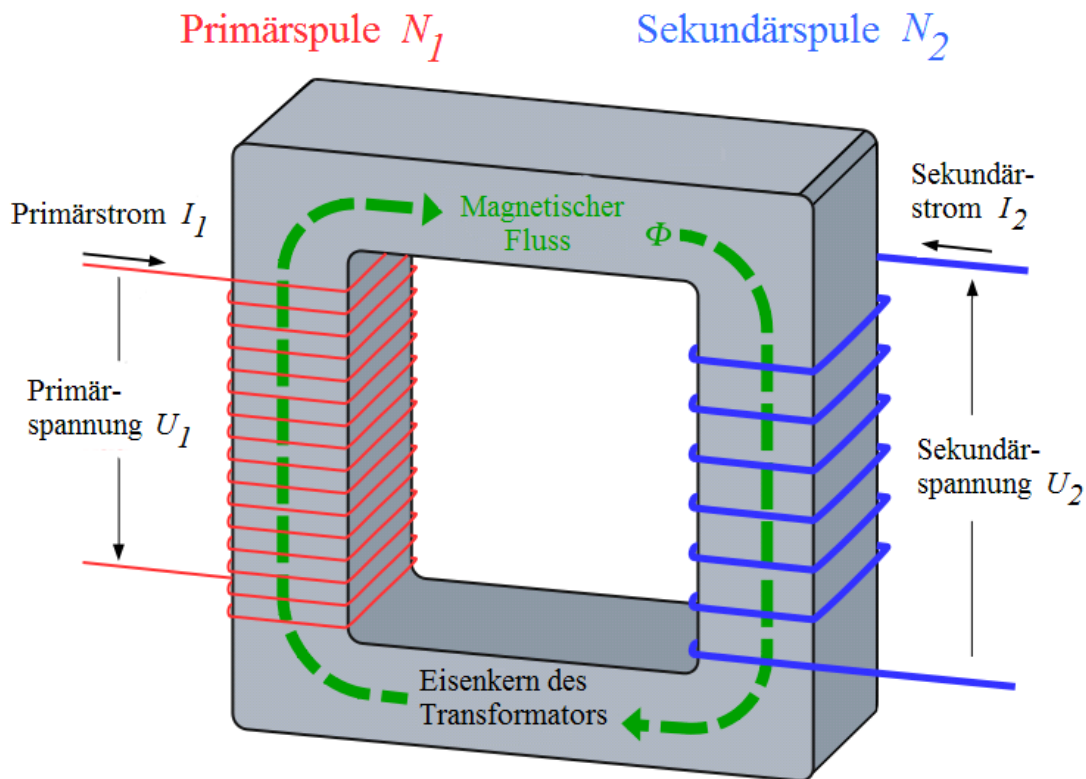


Abb. 2: Abwärtstransformator mit physikalischen Symbolen

Die Primärwicklung eines Trafos mit $N_{\text{primär}}$ Windungen und der Länge L wird vom Primärstrom $J_{\text{primär}}$ durchflossen, wodurch ein Magnetfeld erzeugt wird, das im Inneren der Spule besonders stark ist. Die magnetische Flussdichte beträgt dort:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{\text{primär}}}{L} \cdot J_{\text{primär}}$$

Dabei ist μ_r die PERMEABILITÄTSZAHL⁶ des Spulenkerns, der meist aus Eisen besteht, und μ_0 die MAGNETISCHE FELDKONSTANTE⁷.

Würde man die Primärspule mit *eingepprägtem* Strom betreiben, ließe sich der Trafo einfach erklären. Die meisten Trafos werden aber mit *eingepprägter* Spannung betrieben und hier treten

6 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PERMEABILIT%C3%A4T](http://de.wikipedia.org/wiki/Permeabilit%C3%A4t)

7 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/MAGNETISCHE_FELDKONSTANTE](http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Feldkonstante)

die ersten Missverständnisse und Fehlinterpretationen auf. Der Grund ist einfach: Spannungsmessung ist bequemer als die Messung des Stromes. Häufig wird ein Oszilloskop verwendet, das *nur* Spannungen messen und aufzeichnen kann. In obiger Formel kommt aber gar keine Spannung vor.

Was ist EINGEPRÄGTE SPANNUNG⁸?

Das ist beispielsweise die Netzspannung 230 V aus der Steckdose, denn der Innenwiderstand des Stromnetzes ist sehr gering und beträgt nur wenige Ohm. Man muss schon sehr viel Strom fließen lassen, bis die Spannung merklich absinkt. Auch ein stabilisiertes Labornetzteil gibt sehr konstant 12 V (Gleichspannung) ab. Der Strom lässt sich bei Kenntnis des Lastwiderstandes berechnen, er ändert *nicht* die Spannung. Die Mehrzahl aller technisch verwendeten Stromquellen wie Batterien, Akkus, Generatoren müssten eigentlich als *Spannungsquellen* bezeichnet werden, denn sie geben eingeprägte Spannung ab, die optimalerweise nicht stromabhängig ist. Von den zwei Grenzfällen der Belastung – Leerlauf und Kurzschluss – ist bei der Spannungsquelle der Leerlauf als Grundzustand anzusehen, denn dann ist die abgegebene Leistung Null. Kurzschluss kann Schäden verursachen, weil der Strom über alle Grenzen steigt.

Was ist EINGEPRÄGTER STROM⁹?

Es gibt Labornetzgeräte, die sich beispielsweise auf sehr konstanten Strom 0,3 A einstellen lassen und diesen Strom bei Kurzschluss genauso wie bei Belastung mit 20 Ω oder 35 Ω liefern. Man darf eingepprägten Strom nicht mit konstantem (Gleich-)Strom gleichsetzen, es gibt auch eingepprägten Wechselstrom. Diesen findet man selten, die Herstellung ist aber einfach: Man legt an die Steckdose (230 V, 50 Hz) eine Reihenschaltung von Belastungswiderstand R und einem 2 μF -Kondensator. Dann fließt fast unabhängig von R ein Wechselstrom mit dem Effektivwert 145 mA. Gleichgültig, ob R den Wert Null Ohm oder 30 Ω oder 120 Ω besitzt. Da die Spannung bei Leerlauf nicht unbegrenzt steigt, handelt es sich um kein ideales Konstantstromgerät für Wechselstrom. Von den zwei Grenzfällen der Belastung – Leerlauf und Kurzschluss – ist bei der Stromquelle der Kurzschluss als Grundzustand anzusehen, denn dann ist die abgegebene Leistung Null. Leerlauf kann Schäden verursachen, weil die Spannung über alle Grenzen steigt.

0.3.2 Betrieb der Primärspule an eingepprägter Spannung

Die Formel des letzten Kapitels zeigt, dass *nur* der Strom $J_{\text{primär}}$ zuständig ist für die Erzeugung des Magnetfeldes. Wie gelangt man zur Spannung $U_{\text{primär}}$ zwischen den Anschlüssen der Spule? Das ist ein etwas holpriger Weg. Zunächst gibt es die Formel des INDUKTIONSGESETZES¹⁰:

8 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHE_SPANNUNG%23EINGEPR%24GTE_SPANNUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Spannung%23Eingep%24gte_Spannung)

9 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHER_STROM%23EINGEPR%24GTER_STROM](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer_Strom%23Eingep%24gter_Strom)

10 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTROMAGNETISCHE%20INDUKTION](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische%20Induktion)

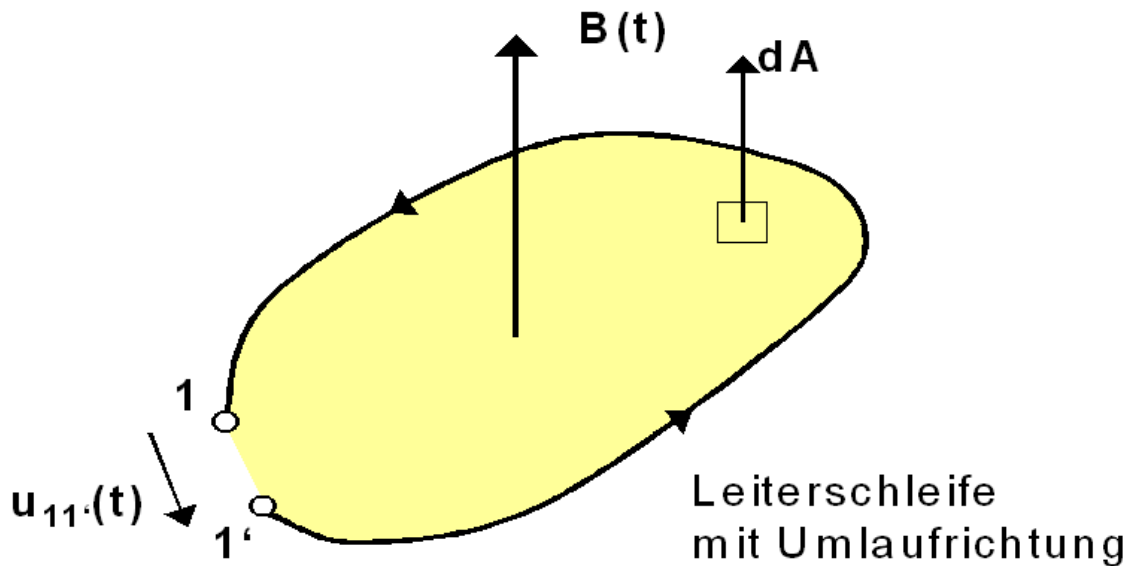


Abb. 3: Leiterschleife im Magnetfeld. $U_{11'}(t)$ im Bild bedeutet die Umlaufspannung U_{ind} des Textes

$$U_{\text{ind}} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Für ruhende Leiter lässt sich die Reihenfolge der Integration bzw. Differentiation vertauschen und das Integral auflösen, weil das B-Feld überall im Spulenquerschnitt A den gleichen Wert besitzt. Die vereinfachte Formel lautet

$$U_{\text{ind}} = -A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Dabei ist A die von den Windungen umschlungene Fläche, im nebenstehenden Bild gelb gezeichnet.

Man beachte, dass $U_{\text{primär}}$ *von außen* an die Primärspule angeschlossen wird und eine fest vorgegebene Kurvenform wie Rechteck oder Sinus besitzt. U_{ind} wird dagegen vom sich ändernden Magnetfeld *erzeugt*, eine Reaktion auf eine Änderung des Magnetfeldes. Im Regelfall sind beide Spannungen fast gleich und nur der Unterschied $\Delta U = U_{\text{primär}} - U_{\text{ind}}$ ist ausschlaggebend für den Betrieb der Primärspule.

Etwas unphysikalisch kann man auch so argumentieren: Die Primärspule ist wie jede andere Induktivität ein konservatives Element und „versucht“, das einmal vorhandene Magnetfeld beizubehalten:

- „Will“ ein externer Strom das Magnetfeld verstärken, wird sofort eine *Gegenspannung* (das ist das Minuszeichen der obigen Formel) erzeugt, die den Stromanstieg bremst.

- „Will“ ein externer Strom das Magnetfeld abschwächen, wird sofort eine *Mitspannung* erzeugt, die einen zusätzlichen Strom erzeugt, der so gerichtet ist, dass das Magnetfeld verstärkt wird (LENZSCHE REGEL¹¹).

Ist die Primärspule fest mit dem Stromversorger verbunden, können diese Zusatzströme problemlos fließen. Das ist bei einem Netztrafo im Dauerbetrieb der Fall. Wird der Stromversorger aber plötzlich abgeschaltet, können diese Ströme zunächst nicht fließen. Deshalb ändert sich das Magnetfeld stärker und schneller „als vorgesehen“. Als Folge wird eine immer weiter anwachsende Spannung induziert, bis diese ausreicht, um einen Lichtbogen zu zünden und den zusätzlichen Strom wenigstens annähernd doch noch fließen zu lassen. Dieser Effekt wird beispielsweise bei der ZÜNDSPULE¹² ausgenutzt. In den folgenden Abschnitten werden beide Fälle im Einzelnen diskutiert.

Dieses „Nachlaufen“ der induzierten Spannung besitzt Ähnlichkeit mit einer REGELUNG¹³: Die treibende Spannung $U_{\text{primär}}$ ist der Sollwert, die induzierte Spannung U_{ind} ist der Istwert, das Magnetfeld B fungiert als Stellgröße. Diese „Quasiregelung“ sorgt dafür, daß die Magnetfeldänderung dB/dt immer sehr nah der treibenden Spannung folgt. Das Magnetfeld selbst ist phasenverschoben.

Den Vorgang kann man auch als „spannungsgeführte Magnetisierung“ bezeichnen. Sie funktioniert immer dann und dann nur so, wenn eine eingeprägte Spannung als Führungsgröße die Kontrolle übernimmt. Sie funktioniert nicht bei einer Speisung mit einem eingepprägten Strom, da ist alles einfacher. Das ist aber ein eher seltener Fall wie beispielsweise beim Stromwandler.

0.3.3 Phasenverschiebungen

Nur wenn man die zeitlichen Zusammenhänge ignoriert, sieht das Ergebnis so aus, als würde die Primärspannung das Magnetfeld einprägen oder gar erzeugen. Tatsächlich misst man eine Phasenverschiebung, die sich mathematisch sehr einfach begründen lässt. Der zeitliche Zusammenhang zwischen $U_{\text{primär}} \sim U_{\text{ind}}$ und B wird durch die Formeln

$$U_{\text{prim}} = -A \cdot \frac{dB}{dt}$$

(differentielle Form)

und

$$\int U_{\text{prim}} \cdot dt = -A \cdot B + \text{Integrationskonstante}$$

(integrale Form)

¹¹ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LENZSCHE%20REGEL](http://de.wikipedia.org/wiki/Lenzsche%20regel)

¹² [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/Z%FCNDSPULE](http://de.wikipedia.org/wiki/Z%C3%BCndspule)

¹³ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/REGELUNGSTECHNIK](http://de.wikipedia.org/wiki/Regelungstechnik)

beschrieben. Beide sind gleichwertig, es sind nur unterschiedliche Schreibweisen für den gleichen physikalischen Zusammenhang. Aus beiden folgt, dass Spannung und die Flussdichte *bnicht* proportional sind, also *nicht* gleichzeitig Maximal- und Minimalwerte annehmen.

- Ist $U_{\text{primär}}$ sinusförmig, muss der Verlauf von B cosinusförmig sein (*siehe* NETZTRAFO¹⁴).
- Ist $U_{\text{primär}}$ konstant, steigt der Verlauf von B (bis zu einer gewissen Grenze, Sättigung,) linear an (*siehe* SPANNUNGSWANDLER¹⁵).

Diese Zusammenhänge lassen sich experimentell leicht nachweisen, wenn man einen HALL-SENSOR¹⁶ richtig orientiert in die Spule einbringt. Enthält diese einen Eisenkern, muss man für die Sonde ein kleines Loch bohren, um den Verlauf von B im Eisenkern bestimmen zu können. Die Spannungen von Hallsonde und Primärwicklung vergleicht man dann mit einem Oszilloskop. Diese Phasenverschiebung ist in der Praxis selten von Interesse, sie fördert aber das Verständnis, wie denn nun ein Trafo funktioniert.

0.3.4 Auswirkung des Magnetfeldes in der Sekundärwicklung

Wenn sich dieses Magnetfeld *nicht* ändert, wird auch keine Spannung induziert. Deshalb kann man keinen Gleichstrom transformieren. Das würde auch dem Energiesatz widersprechen, denn ein konstantes Magnetfeld kann man mit einem Permanentmagneten erzeugen – und die Sekundärspule würde ständig Strom liefern.

Wenn sich das Magnetfeld ändert, wird in einer oder mehreren Sekundärspule(n) *ebenso* wie in der Primärspule (SELBSTINDUKTION¹⁷) eine Wechselspannung induziert, die proportional zur Windungszahl steigt. Die Kurvenform der Sekundärspannung kann von der Kurvenform der Primärspannung erheblich abweichen.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, elektrische Spannung durch ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION¹⁸ zu erzeugen. Beim Generator wird beispielsweise ein Magnetfeld in einer Spule bewegt. Für alle diese Phänomene gibt es eine etwas umfangreiche Gleichung. Der für den Trafo relevante Teil lautet

$$U_{\text{ind}} = N_{\text{sek}} \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = N_{\text{sek}} \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{A \cdot N_{\text{prim}}}{L} \cdot \frac{dJ_{\text{prim}}}{dt}$$

wenn man, wie üblich, die N_{sek} Windungen der Sekundärspule eng anliegend auf den Eisenkern mit der Querschnittsfläche A wickelt. Fasst man alle konstanten Faktoren dieser Formel in C zusammen, erhält man

14 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/NETZTRAFO](http://de.wikipedia.org/wiki/Netztrafo)

15 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SPANNUNGSWANDLER](http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungswandler)

16 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HALL-SENSOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Hall-Sensor)

17 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SELBSTINDUKTION](http://de.wikipedia.org/wiki/Selbstinduktion)

18 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTROMAGNETISCHE%20INDUKTION%23INDUKTIONSSPANNUNG%20DURCH%20C4NDERUNG%20DES%20MAGNETISCHEN%20FLUSSES%20%28.%20INDUKTIONSPH4NOMEN%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische%20Induktion%23Induktionsspannung%20durch%20C4nderung%20des%20magnetischen%20flusses%20%28.%20Induktionsph4nomen%29)

$$U_{\text{ind}} = C \cdot \mu_r \cdot \frac{dJ_{\text{prim}}}{dt}$$

Im Regelfall wünscht man eine möglichst große induzierte Spannung pro Windung. Diese Gleichung zeigt, dass es für deren Betrag darauf ankommt, wie *schnell* sich J_{prim} als Funktion der Zeit ändert und wie sich μ_r verhält.

- Der Quotient dJ_{prim}/dt bedeutet die zeitliche *Änderung* des Stromes durch die Primärspule; dieser Quotient muss groß sein, denn die Zeitdifferenz dt steht im Nenner. Das hat eine weitreichende Auswirkung: Je kleiner dt ist, also je schneller sich der Strom ändert, desto größer ist die induzierte Spannung. Das wird in Impulstrafos wie ZÜNDSPULE¹⁹ und FUNKENINDUKTOR²⁰ oder beim ELEKTROZAUN²¹ ausgenutzt, um durch schnelles *Abschalten* des Stromes HOCHSPANNUNG²² zu erzeugen. Bei Betrieb mit Gleichstrom lässt sich diese Hochspannung mit einer parallel geschalteten FREILAUFDIODE²³ verhindern, wenn sie nicht gewünscht ist, beispielsweise beim Ausschalten von Relaispulen. Der Stromverlauf beim Einschalten einer Spule mit einer Gleichspannung wird HIER²⁴ erklärt.
- Der Materialparameter μ_r hat in Luft den Wert 1. Das ist problemlos, sorgt aber bei langsamen Stromänderungen für geringe induzierte Spannung.
- Falls (bei tiefen Frequenzen) die Primärspule einen Eisenkern besitzt, ist μ_r viel größer, aber leider nicht konstant und kann – stromabhängig – zwischen etwa 50.000 und 1 schwanken. Dieser sehr große Unterschied ist Ursache für eine Reihe von Problemen, die bei luftgefüllten Trafos nicht existieren. Bei Transformatoren für hohe Frequenzen verzichtet man deshalb gern auf Eisenkerne, bei tiefen Frequenzen sind sie immer notwendig.

Ein Beispiel soll die Anwendung der Formel zeigen: Das Magnetfeld ändere sich in 2 ms um 0,3 T, dann ist $dB/dt = 150 \text{ T/s}$. Mit einer richtig orientierten Spulenfläche von 6 cm^2 erhält man 90 mV pro Windung.

Ein Trafo kann die Kurvenform und/oder die PHASE²⁵ von Wechselstrom ändern. Um dieses Übertragungsverhalten zu verstehen, kann man die Primärspule an einen FUNKTIONSGENERATOR²⁶ legen und Kurvenformen wie Dreieckspannung, Rechteckspannung oder sinusförmigen Wechselspannung wählen. Das wird nachfolgend einzeln behandelt.

0.4 Betrieb mit einer Dreieckspannung

Das Übertragungsverhalten eines Trafos lässt sich auch erklären, wenn man statt der üblichen sinusförmigen Wechselspannung des STROMNETZES²⁷ eine Dreieckspannung aus einem Funktionsgenerator anlegt, weil dann die physikalischen Gleichungen leichter zu

19 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/Z%FCNDSPULE](http://de.wikipedia.org/wiki/Z%FCNDSPULE)

20 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FUNKENINDUKTOR](http://de.wikipedia.org/wiki/FUNKENINDUKTOR)

21 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTROZAUN](http://de.wikipedia.org/wiki/ELEKTROZAUN)

22 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HOCHSPANNUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/HOCHSPANNUNG)

23 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SCHUTZDIODE%23FREILAUFDIODE](http://de.wikipedia.org/wiki/SCHUTZDIODE%23FREILAUFDIODE)

24 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ZEITKONSTANTE%23ZEITKONSTANTE%20BEI%20EINER%20INDUKTIVIT%E4T](http://de.wikipedia.org/wiki/ZEITKONSTANTE%23ZEITKONSTANTE%20BEI%20EINER%20INDUKTIVIT%E4T)

25 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PHASENVERSCHIEBUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/PHASENVERSCHIEBUNG)

26 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FUNKTIONSGENERATOR](http://de.wikipedia.org/wiki/FUNKTIONSGENERATOR)

27 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STROMNETZ](http://de.wikipedia.org/wiki/STROMNETZ)

durchschauen sind. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Bei der verwendeten Frequenz ist der INDUKTIVE WIDERSTAND²⁸ der Primärspule

- viel *kleiner* als ihr ohmscher Widerstand; dann ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung fast Null und es gelten die Proportionalitäten: $U_{\text{primär}} \approx I_{\text{primär}} \approx B \approx \Phi$;
- viel *größer* als der ohmsche Widerstand. Dann besteht zwischen Strom und Spannung eine PHASENVERSCHIEBUNG²⁹.

0.4.1 Betrieb mit eingprägtem Strom

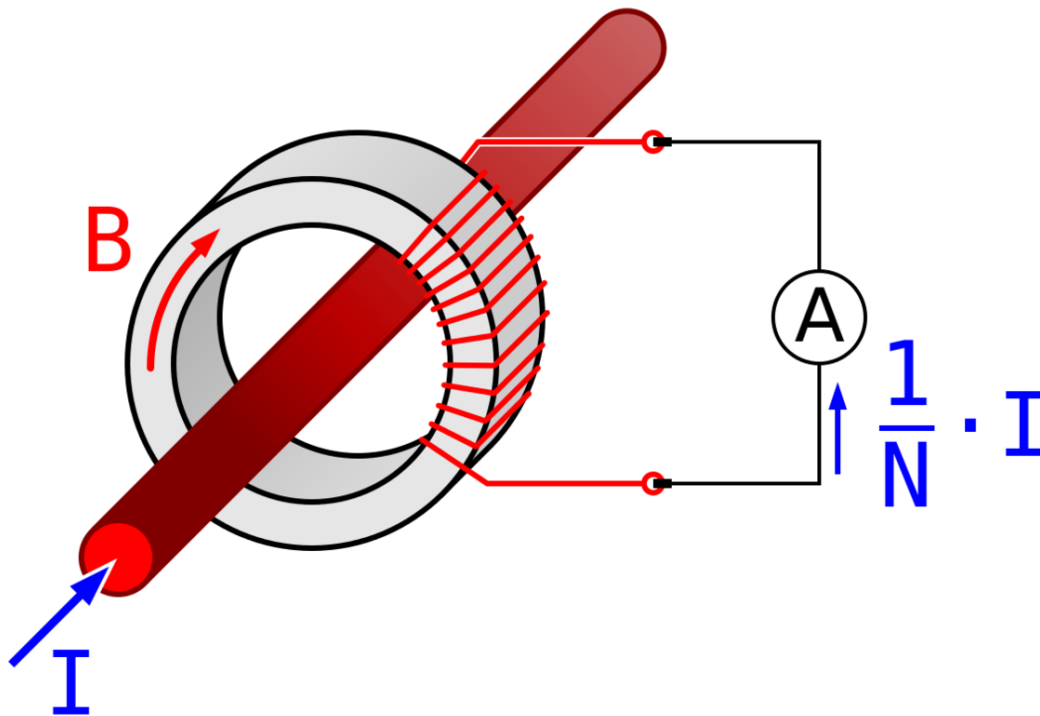


Abb. 4: Prinzip Durchsteckwandler

²⁸ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVER%20WIDERSTAND](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktiver%20Widerstand)

²⁹ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PHASENVERSCHIEBUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Phasenverschiebung)

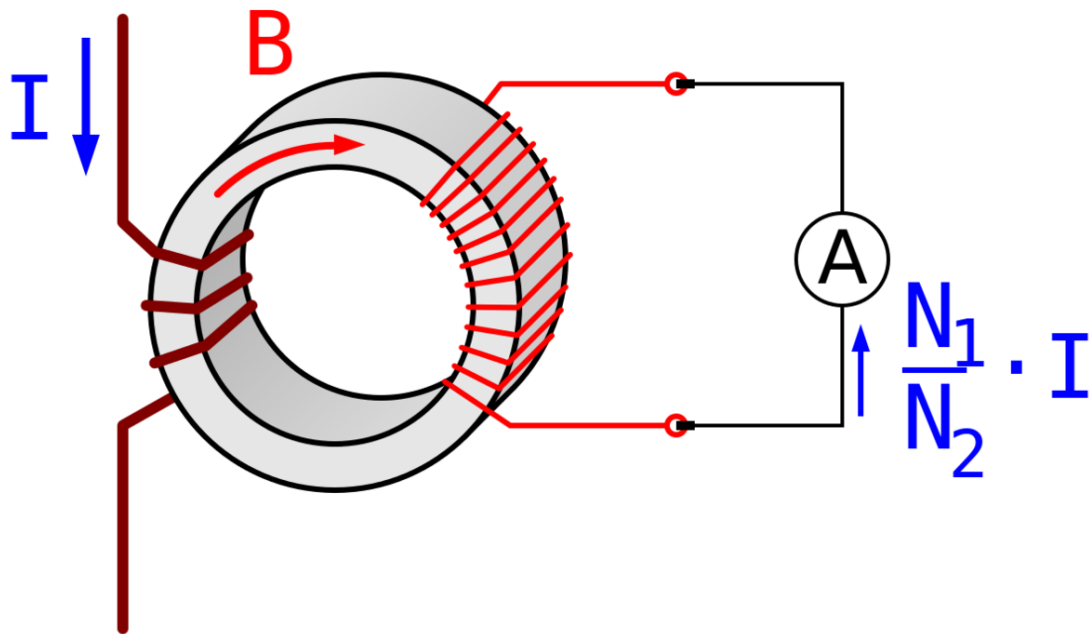


Abb. 5: Prinzip gewickelter Wandler

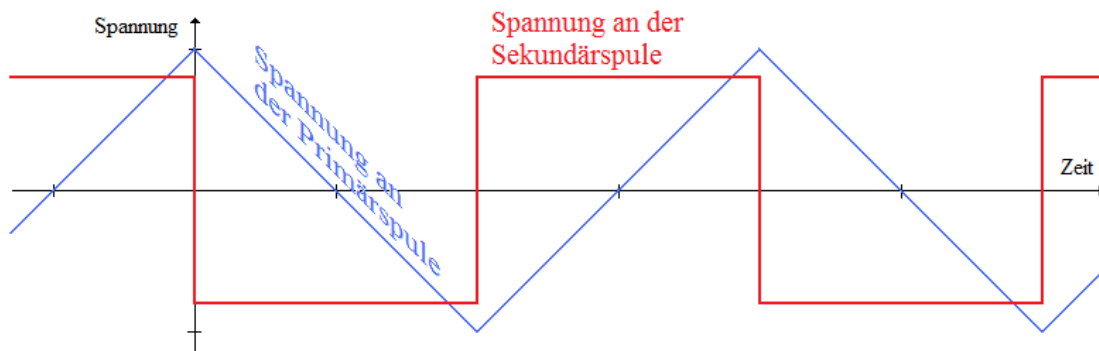


Abb. 6: Transformator mit eingprägtem *Strom*: primär Dreieckspannung *vor* dem Vorwiderstand, sekundär Rechteckspannung

Die Primärspule wird mit EINGEPRÄGTEM³⁰ Strom betrieben, wenn die Dreieckspannung über einen ausreichend großen Vorwiderstand eingespeist wird, der mindestens zehnmals größer ist als die Impedanz der Primärspule. Der Vorwiderstand kann auch der ohmsche Widerstand der

³⁰ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHER%20STROM%23EINGEPR%4GTER%20STROM](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer%20Strom%23Eingepre%4Gter%20Strom)

Spule sein. Diese Bedingung wird von *jedem* Trafo erfüllt, wenn die Frequenz nur ausreichend tief ist, weil der INDUKTIVE WIDERSTAND³¹ proportional zur Betriebsfrequenz sinkt.

Hier sind Spannung $U_{\text{primär}}$ und Strom $I_{\text{primär}}$ aus steigenden und fallenden Geradenstücken zusammengesetzt (blaue Dreiecksfunktion im Bild links). Weil die ABLEITUNG³² einer Geraden konstanten Wert besitzt, gilt in Verbindung mit der Proportion $U_{\text{primär}} \approx I_{\text{primär}} \approx B \approx \Phi$ die einfache Aussage $d\Phi/dt = \pm \textit{konstant}$ und aus der Gleichung

$$U_{\text{ind}} = N_{\text{sek}} \cdot \frac{dB}{dt} \cdot A \quad \text{wird} \quad U_{\text{ind}} = \pm \textit{konstant} \cdot N_{\text{sek}} \cdot A$$

Die sekundärseitig induzierte Spannung kann also nur zwischen zwei Werten wechseln. Sie ist genau so lange konstant, wie die Primärspannung steigt und ändert ihr Vorzeichen, wenn die Primärspannung fällt, wie im nebenstehenden Bild rot eingezeichnet ist. Die Übergänge erfolgen schlagartig. Mathematisch gesehen, differenziert diese Anordnung die angebotene Dreiecksspannung bzw. den Strom (beide sind über $U = R \cdot I$ verknüpft). Wenn die Dreiecksspannung schneller steigen als fallen würde (asymmetrische KIPPSCHWINGUNG³³), wäre während der Steigzeit auch U_{sek} deutlich größer.

Beim Vergleich der beiden Oszillogramme erkennt man, was ein stückweise konstanter Primärstrom bewirkt: Sobald sich $I_{\text{primär}}$ *nicht* ändert, weil die Spitzen der Dreiecke abgeschnitten werden, kann der Eisenkern zwar magnetisiert sein, das B -Feld ändert sich aber nicht und deshalb wird in der Sekundärspule keine Spannung induziert. Während der Zeitspannen, in denen die Dreiecksspannung flache Stellen hat, zeigt das Oszillogramm null Volt an.

Falls der Trafo einen Eisenkern besitzt, kann dieser bei großen Strömen magnetisch GESÄTTIGT³⁴ werden. Dann sinkt μ_r von sehr hohen Werten um 5000 auf nur 1. Aus der obigen Gleichung folgt dann, dass die Flussdichte B kaum noch zunehmen kann (dB wird Null), auch wenn der Primärstrom stark ansteigt. Das hat die gleiche Konsequenz wie ein konstanter Strom: Die induzierte Sekundärspannung wird Null.

Die Eigenschaft, dass *jeder* Transformator $I_{\text{primär}}$ differenziert, bewirkt beim STROMWANDLER³⁵ und bei der ROGOWSKISPULE³⁶, dass *Gleichströme* nicht gemessen werden können.

31 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVER%20WIDERSTAND](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktiver%20Widerstand)

32 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DIFFERENTIALRECHNUNG%23ABLEITUNGSREGELN](http://de.wikipedia.org/wiki/Differentialrechnung%23Ableitungsregeln)

33 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/KIPPSCHWINGUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Kippschwingung)

34 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/S%e4ttigungsmagnetisierung](http://de.wikipedia.org/wiki/S%e4ttigungsmagnetisierung)

35 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STROMWANDLER](http://de.wikipedia.org/wiki/Stromwandler)

36 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ROGOWSKISPULE](http://de.wikipedia.org/wiki/RogowskiSpule)

0.4.2 Betrieb mit eingepprägter Spannung

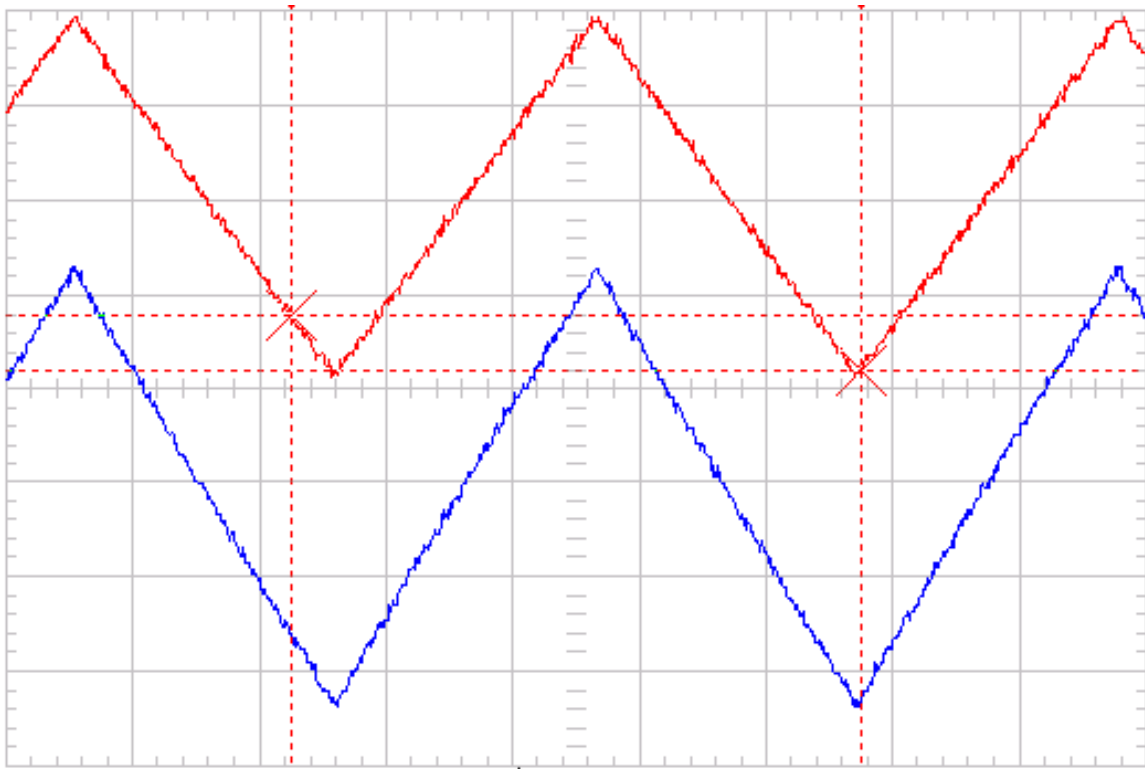


Abb. 7: Transformator mit eingepprägter Dreiecksspannung, sekundär ebenfalls Dreiecksspannung

Die Primärspule wird mit EINGEPRÄGTER³⁷ Spannung betrieben, wenn die Impedanz der Spule mindestens zehnmals größer ist als ihr ohmscher Widerstand. Das kann bei *jedem* Trafo durch ausreichend hohe Frequenz erreicht werden. Bei tiefen Frequenzen (NETZFREQUENZ³⁸) wählt man meist einen zusätzlichen Eisenkern mit großem μ_r , um die INDUKTIVITÄT³⁹ zu vergrößern. $U_{\text{primär}}$ wird dann mit unveränderter Kurvenform übertragen, solange der Kern nicht in Sättigung gerät. Die Begründung:

- Die angelegte Wechselspannung $U_{\text{primär}}$ lässt in der Primärspule einen Wechselstrom fließen, der im Eisenkern ein magnetisches Wechselfeld erzeugt.
- Dieses induziert in allen Spulen des Trafos, also *auch* in der Primärspule eine „Gegenspannung“ $U_{\text{induziert}}$, die fast so groß ist wie die angelegte Wechselspannung und diese weitgehend kompensiert (LENZSCHE REGEL⁴⁰). Als „Antriebsspannung“ für den Primärstrom steht nur die geringe Differenzspannung $U_{\text{primär}} - U_{\text{induziert}}$ zur Verfügung, die am ohmschen Widerstand des Spulendrahtes abfällt. Deshalb ist der Primärstrom so gering.
- Wäre die Gegenspannung zu gering, würde die Differenzspannung $U_{\text{primär}} - U_{\text{induziert}}$ sofort größer werden und höheren Primärstrom fließen lassen. Dadurch würde aber das Magnetfeld

37 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHE%20SPANNUNG%23EINGEP%27R%C3%A4gte%20SPANNUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische%20Spannung%23Eingep%27r%C3%A4gte%20Spannung)

38 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/NETZFREQUENZ](http://de.wikipedia.org/wiki/Netzfrequenz)

39 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVIT%C3%A4t](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktivit%C3%A4t)

40 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LENZSCHE%20REGEL](http://de.wikipedia.org/wiki/Lenzsche%20Regel)

ansteigen und mehr Gegenspannung erzeugen. Dieses Verhalten nennt man dynamisches STABILES GLEICHGEWICHT⁴¹. Es sorgt in jedem Moment dafür, dass die induzierte Spannung „parallel“ zur angelegten Wechselspannung mitläuft und pro Windung in jeder Spule den gleichen Wert hat. Deshalb gilt unabhängig von der Kurvenform:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

0.4.3 Betrieb mit Frequenzgemisch

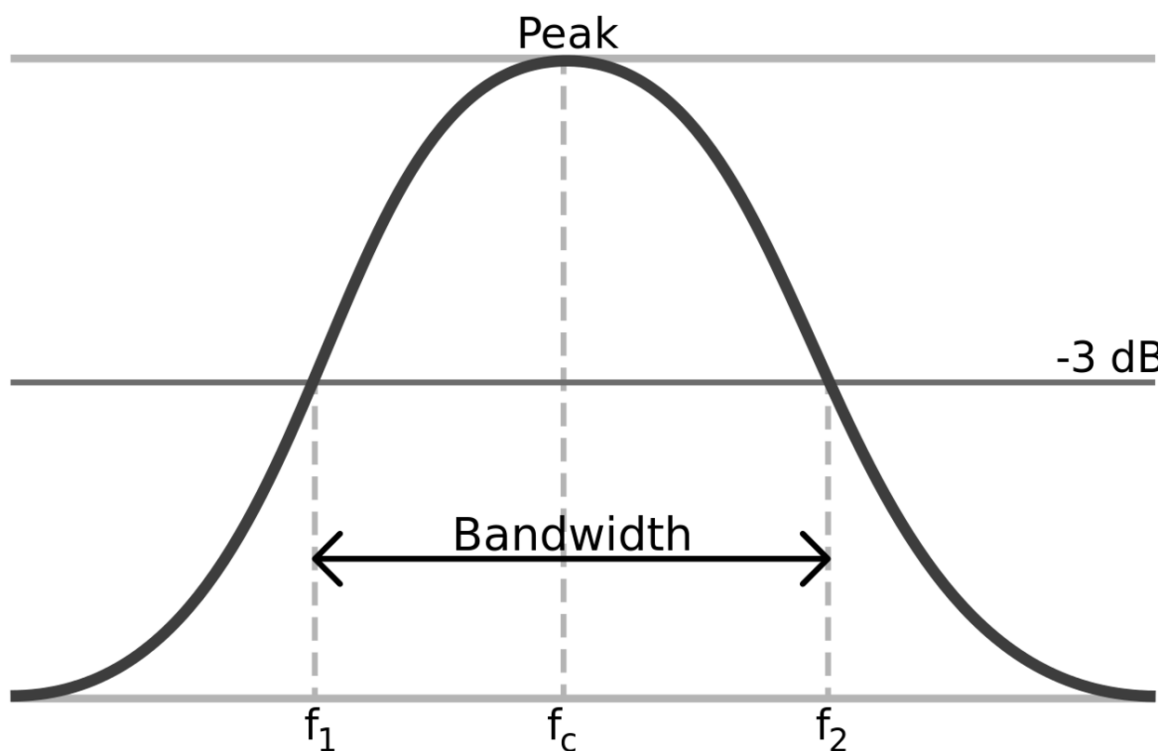


Abb. 8: Der Abstand f_2 bis f_1 heißt Bandbreite

In diesem Artikel werden nur Breitbandtrafos behandelt, die – wie Audiotransformatoren – ein Frequenzgemisch von $f_1 = 50$ Hz bis $f_2 = 20$ kHz übertragen müssen (Dreiecksspannung ist auch ein Frequenzgemisch). Dabei ändert sich die Impedanz der Primärspule im gleichen Verhältnis $20000/50 = 400$, was dazu führt, dass bei tiefen Frequenzen der ohmsche und bei hohen Frequenzen der induktive Anteil am Gesamtwiderstand überwiegt.

- Bei tiefen Frequenzen ist der Primärstrom EINGEPÄG⁴², der Trafo differenziert. Das bedeutet zum einen eine Phasenverschiebung von etwa 90° zwischen Ein- und Ausgangsspannung, zum anderen sinkt die induzierte Sekundärspannung proportional zur

41 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STABILES%20GLEICHGEWICHT](http://de.wikipedia.org/wiki/Stabiles%20gleichgewicht)

42 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHER%20STROM%23EINGEP%e4GTER%20STROM](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer%20strom%23eingep%e4gter%20strom)

Frequenz. Für eine möglichst tiefe Grenzfrequenz muss die Primärspule möglichst viele Windungen haben, damit die Impedanz ausreichend groß bleibt.

- Bei mittleren Frequenzen überträgt der Trafo die Kurvenform 1:1, da mit EINGEPÄRTER SPANNUNG⁴³ gearbeitet wird. Die Phasenverschiebung beträgt etwa 0°.
- Bei hohen Frequenzen macht sich immer stärker der Einfluss der Wicklungskapazität bemerkbar, der den Wechselstrom nicht *durch* die Spule, sondern zunehmend durch die parallel liegende, unvermeidbare Kapazität fließen lässt. Zusammen können beide einen SCHWINGKREIS⁴⁴ bilden, der einen schmalen Frequenzbereich bevorzugt. Dieser liegt umso tiefer, je mehr Windungen die Spule besitzt. Es treten wieder deutliche Phasenverschiebungen auf.

Die Forderungen für hohe und tiefe Grenzfrequenz widersprechen sich, deshalb sind Breitbandtrafos schwierig zu bauen.

0.5 Betrieb mit einer Rechteckspannung

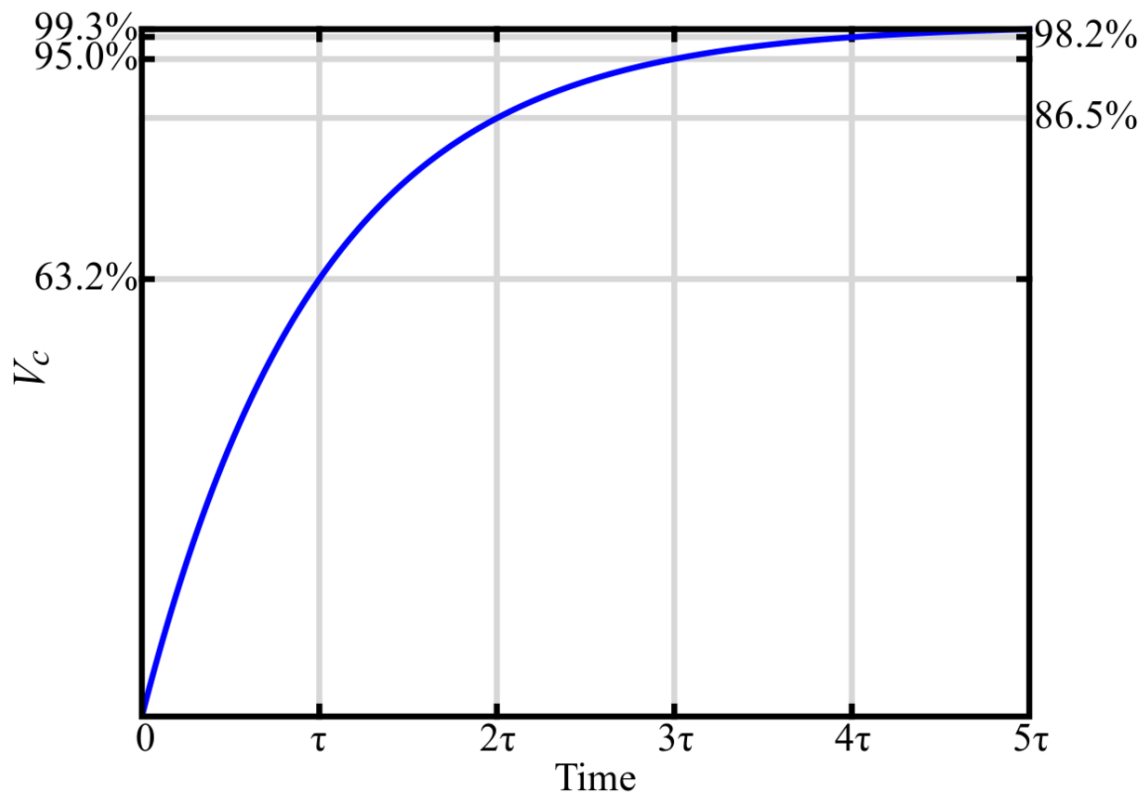


Abb. 9: Strom I_L durch die Spule nach dem Einschalten an eine Gleichspannung als Funktion der Zeit

43 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHE%20SPANNUNG%23EINGEP%24RTE%20SPANNUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische%20Spannung%23Eingep%24rte%20Spannung)

44 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SCHWINGKREIS](http://de.wikipedia.org/wiki/Schwingkreis)

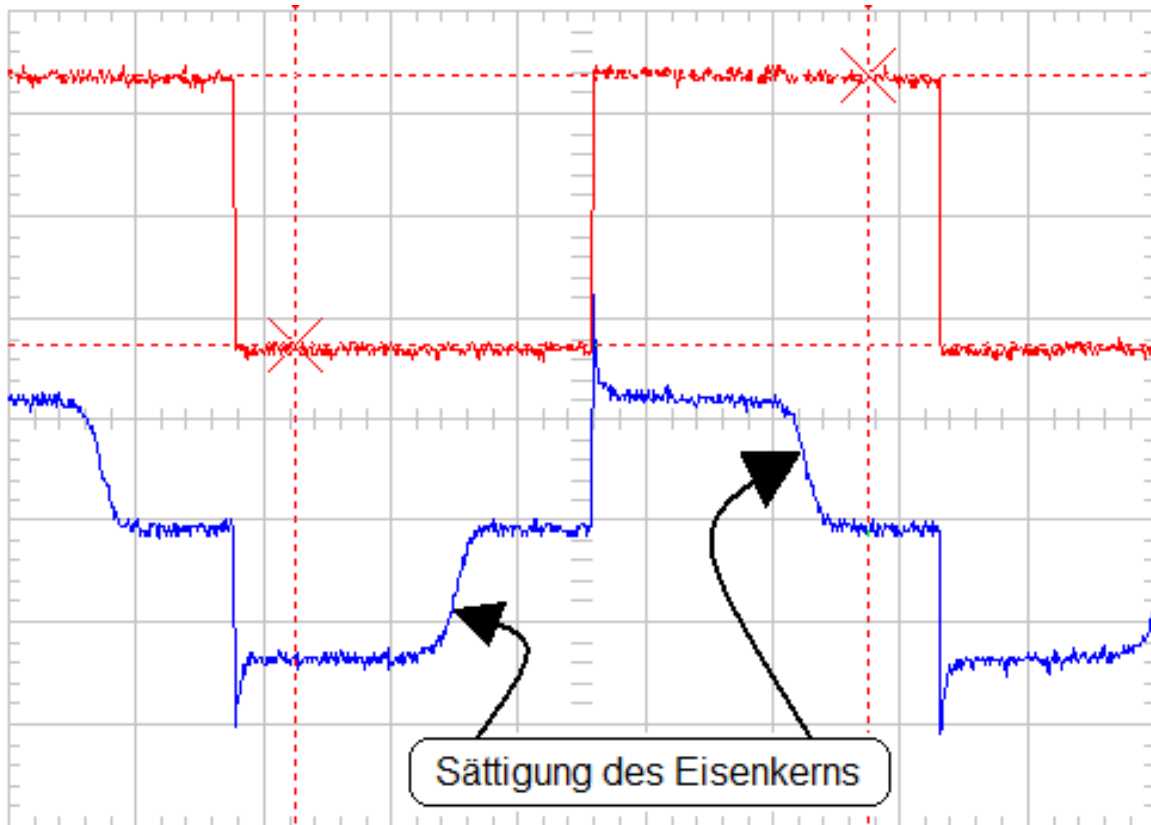


Abb. 10: Sättigungsmagnetisierung eines Eisenkerns. rot=Primärspannung, blau=Sekundärspannung

In SCHALTNETZTEILEN⁴⁵ werden Trafos immer mit rechteckförmigen Spannungsverläufen versorgt, weil dadurch die VERLUSTLEISTUNG⁴⁶ in den elektronischen Schaltern (TRANSISTOREN⁴⁷) sehr gering sind. Die Spannung wird von Kondensatoren mit geringen INNENWIDERSTÄNDEN⁴⁸ bereitgestellt, deshalb liegt hier Betrieb mit EINGEPRÄGTER SPANNUNG⁴⁹ vor. Wenn durch die Primärspule vorher kein Strom geflossen ist, steigt dieser nach dem Einschalten *immer* nach der gleichen GESETZMÄSSIGKEIT⁵⁰ an, die im nebenstehenden Bild dargestellt ist: Zunächst schnell, dann langsamer und schließlich strebt der Strom dem Grenzwert U_{prim}/R zu, wobei R der ohmsche Widerstand der Primärwicklung ist. Dann ist das Magnetfeld zwar sehr stark, es ändert sich aber nicht mehr und deshalb sinkt die induzierte Spannung auf Null. Weit vorher muss der Strom abgeschaltet werden, um den Transistor nicht zu gefährden und den Eisenkern nicht in die SÄTTIGUNGSMAGNETISIERUNG⁵¹ zu treiben.

45 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SCHALTNETZTEIL](http://de.wikipedia.org/wiki/Schaltnetzteil)

46 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/VERLUSTLEISTUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Verlustleistung)

47 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TRANSISTOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Transistor)

48 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INNENWIDERSTAND](http://de.wikipedia.org/wiki/Innenwiderstand)

49 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHE%20SPANNUNG%23EINGEPR%44TE%20SPANNUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische%20Spannung%23Eingepre%44te%20Spannung)

50 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVIT%44T%23ZEITKONSTANTE](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktivit%44t%23Zeitkonstante)

51 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/S%44TTIGUNGSMAGNETISIERUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/S%44ttigungsmagnetisierung)

Im nebenstehenden Bild wird deutlich *vor* dem Zeitpunkt, an dem die rot dargestellte Wechsellspannung periodisch umgepolt wird, der Eisenkern gesättigt. Obwohl die Spannung weiterhin anliegt und der Primärstrom stark ansteigt (nicht aufgezeichnet), wird die induzierte Spannung (blau dargestellt) zu Null, weil die Änderung des Magnetfeldes $d\Phi$ auch Null wird. Bei höherer Frequenz und entsprechend kürzerer Einschaltdauer wäre dieser Effekt nicht aufgetreten. Die Spannungszeitfläche der angelegten Spannungshalbwelle ist hier größer als die für welche der Trafo ausgelegt ist. (Windungszahl und oder Eisenfläche sind zu klein.)

Als Beispiel wird angenommen, dass als Primärspule zehn Windungen dicker Kupferdraht auf einen FERRIT⁵²-Kern mit der KENNZAHL⁵³ $A_L = 1200 \text{ nH}$ gewickelt werden. Diese Spule hat die Induktivität $120 \mu\text{H}$ und wird über einen Schalttransistor Q mit einem Kondensator verbunden, der auf 300 V aufgeladen ist. Mit einem Gesamtwiderstand der Reihenschaltung dieser Bauelemente von 1Ω ergibt sich die ZEITKONSTANTE⁵⁴ $T = 120 \mu\text{s}$. In dieser Zeit steigt der Strom fast linear an und erreicht $63,2 \%$ des Endwertes 300 A . Wenn der Schalttransistor 19 A aushält, darf er also nur $12 \mu\text{s}$ lang bis t_1 eingeschaltet sein. Während dieser Zeit entnimmt er dem Kondensator die Energie $E = 0,5 \cdot L \cdot J^2 = 22 \text{ mWs}$.

0.5.1 Sperrwandler

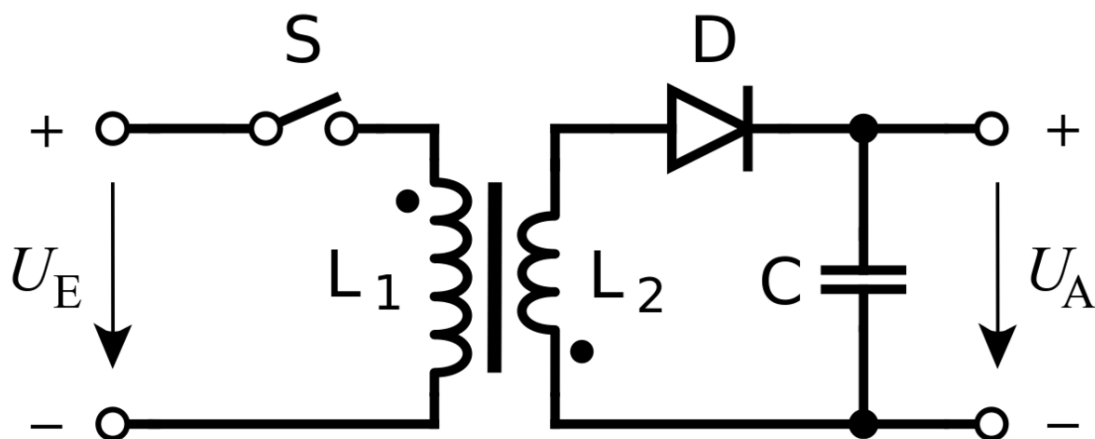


Abb. 11: Prinzip des Sperrwandlers

52 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FERRIT](http://de.wikipedia.org/wiki/Ferrit)

53 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVIT%20t%23BESTIMMUNG%20DER%20INDUKTIVIT%20t%20MITTELS%20AL-WERT](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktivit%20t%23Bestimmung%20der%20Induktivit%20t%20mittels%20AL-Wert)

54 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVIT%20t%23ZEITKONSTANTE](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktivit%20t%23Zeitkonstante)

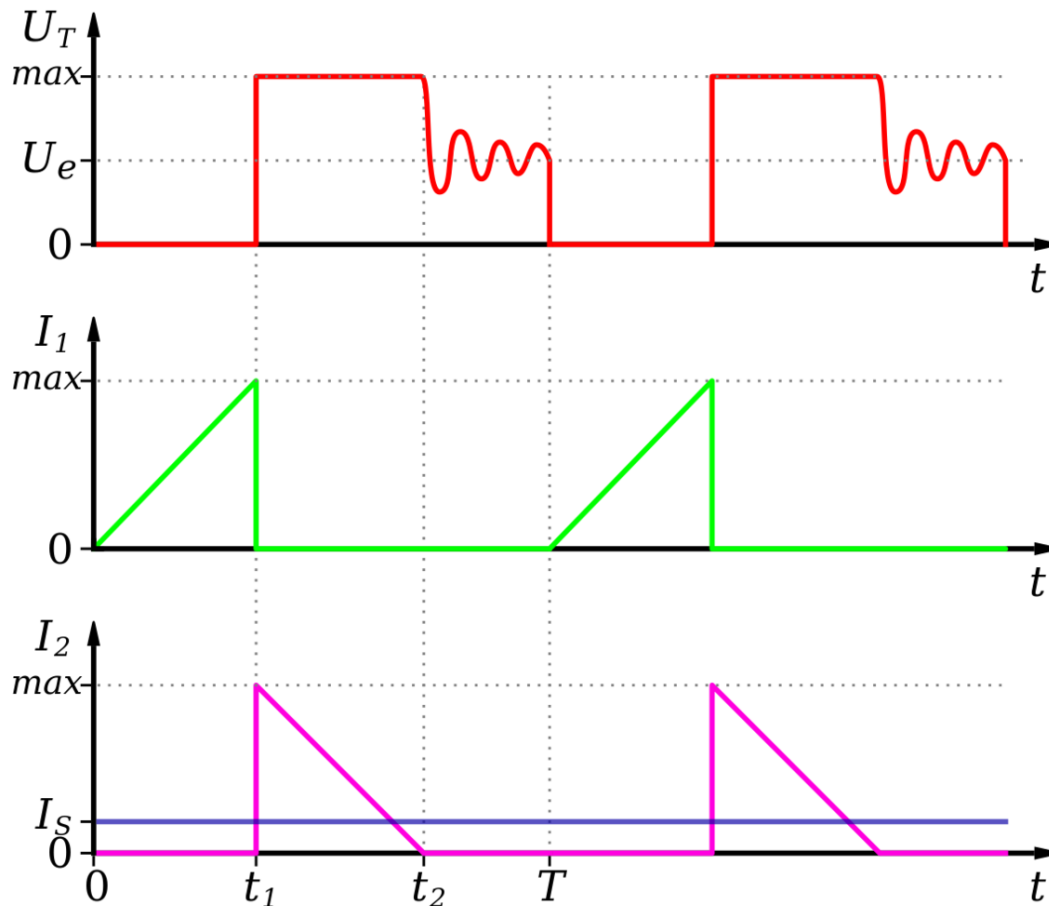


Abb. 12: Spannungen und Ströme beim Sperrwandler

U_T - Spannung über dem Schalttransistor,

I_1 - Strom durch die Primärspule L_1 (grün),

I_2 - Strom durch die Sekundärspule L_2 (violett)

Diese Energie wird beim SPERRWANDLER⁵⁵ während der Einschaltphase $0 \dots t_1$ als magnetische Feldenergie in der SPEICHERDROSSEL⁵⁶ mit Luftspalt gespeichert und *nach* dem Abschalten des Transistors ähnlich wie bei einem FUNKENINDUKTOR⁵⁷ als Spannungsimpuls an der Sekundärspule abgenommen. In NETZGERÄTEN⁵⁸ oder bei ELEKTRONENBLITZGERÄTEN⁵⁹ lädt man mit dieser Energie einen Kondensator C (rechts im Bild) auf. Dabei gibt es *kein* festes

55 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SPERRWANDLER](http://de.wikipedia.org/wiki/Sperrwandler)

56 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DROSSEL%20%28ELEKTROTECHNIK%29%20SPEICHERDROSSELN](http://de.wikipedia.org/wiki/Drossel%20%28Elektrotechnik%29%20SpeicherDrosseln)

57 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FUNKENINDUKTOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Funkeninduktor)

58 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/NETZGER%4E4T](http://de.wikipedia.org/wiki/Netzger%4E4T)

59 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/BLITZLICHT%20ELEKTRONENBLITZGER%4E4TE](http://de.wikipedia.org/wiki/Blitzlicht%20Elektronenblitzger%4E4TE)

Spannungsübersetzungsverhältnis nach der Form $U_p/U_s = N_p/N_s$, sondern die Sekundärspannung springt schlagartig auf die Spannung, die der Kondensator (noch) hat, weil die Primärspannung ebenfalls nicht in ihrer Höhe definiert ist nach dem Abschalten. Dadurch wird der GLEICHRICHTER⁶⁰ leitend und es fließt von t_1 bis t_2 Strom, der den Kondensator C auflädt. Wenn die gespeicherte magnetische Energie auf den Kondensator übertragen wurde, bricht die Sekundärspannung und die Primärspannung zusammen und nach einer kurzen Pause kann auf die Primärspule ab T der nächste Stromimpuls gegeben werden. Wichtig ist es zu wissen, dass die zu übertragende Energie nur im Luftspalt zwischen gespeichert wird, (Spannung mal Strom mal Zeit), weshalb solche Übertrager alle einen definierten Luftspalt haben müssen.

Die Energiezufuhr bewirkt beim Kondensator eine Spannungserhöhung, die sich mit der Gleichung $E = 0,5 \cdot C \cdot U^2$ berechnen lässt. Durch Differenzieren erhält man $\Delta E = C \cdot U \cdot \Delta U$. Wenn ein 2000 μF -Kondensator (noch) auf 12 V aufgeladen ist, erzeugt der nächste Energieimpuls von 22 mWs einen Spannungsanstieg um $\Delta U = 0,9$ V.

Im Dauerbetrieb muss der mittlere Magnetische Fluss Φ konstant sein, deshalb muss die SPANNUNGSZEITFLÄCHE⁶¹ zwischen 0 und t_1 genauso groß sein wie zwischen t_1 und t_2 . Zunächst wird die Primärspule über den Schalttransistor $t_1 = 12 \mu\text{s}$ lang an 300 V gelegt, anschließend liefert die Sekundärspule während der Zeitdauer $t_2 - t_1$ die Spannung 13 V an den 2000 μF -Kondensator (Spannungsverlust am Gleichrichter nicht vergessen!). Daraus folgt

$$300\text{V} \cdot 12 \mu\text{s} = 13\text{V} \cdot (t_2 - t_1)$$

mit der Lösung $t_2 - t_1 = 280 \mu\text{s}$. Wegen $I \cdot (t_2 - t_1) = C \cdot \Delta U$ lässt sich der mittlere Ladestrom 6,5 A des Kondensators ermitteln. Wie im Bild zu sehen ist, sinkt er in diesem Zeitraum vom Anfangswert 13 A etwa linear auf Null.

Beim Sperrwandler gilt - wie bei jedem Trafo - dass die induzierte Spannung pro Windung in allen Wicklungen gleich ist. (Auch die Kurvenform der Spannung.) Wenn im Zeitraum $t_2 - t_1$ an der Sekundärspule 13 V anliegt, erscheint diese Spannung mit dem entsprechenden Transformationsverhältnis $\ddot{u} = N_s/N_p = U_s/U_p$ auch an der Primärwicklung und muss zur Betriebsspannung addiert werden („Rücktransformation“). Wenn im vorliegenden Beispiel $\ddot{u} = 0,1$ gewählt wird, steigt die Spannung am Transistor während der Ladezeit des Kondensators auf

$$U_{\text{max}} = 300\text{V} + \frac{13\text{V}}{0,1} = 430\text{V}$$

60 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/GLEICHRICHTER](http://de.wikipedia.org/wiki/Gleichrichter)

61 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTROMAGNETISCHE%20INDUKTION%20SPANNUNGSZEITFL%4E4CHE](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische%20Induktion%20Spannungszeitfl%C4E4che)

0.5.2 DURCHFLUSSWANDLER⁶²

Hier findet *keine* Zwischenspeicherung der Energie im Eisenkern statt, sondern während der gesamten Einschaltphase des Transistors wird Energie an den Sekundärkreis übertragen. Der Eisenkern darf keinen Luftspalt besitzen, die HYSTERESEKURVE⁶³ soll schmal sein. Auch hier gilt - wie bei jedem Trafo - dass die induzierte Spannung pro Windung in allen Wicklungen gleich ist. Wenn im Zeitraum 0 bis t_1 300 V an die Primärspule gelegt werden und *gleichzeitig* an der Sekundärspule 13 V erwartet werden, muss das Transformationsverhältnis $\ddot{u} = N_s/N_p = U_s/U_p = 13\text{ V}/300\text{ V} = 0,043$ betragen.

Wird der Transformator mit Rechteckspannung betrieben, ist ein Eisenkern fast zwingend erforderlich, denn *ohne* einen solchen würde man sehr viele Windungen für eine ausreichend große Induktivität L benötigen und der ohmsche Widerstand der Spule wäre recht groß. Dadurch würde die Zeitkonstante L/R viel kleiner sein als im obigen Beispiel und auch die schnellsten Schalttransistoren würden zu langsam schalten.

0.5.3 Skin- und Proximity-Effekt

Der SKIN-EFFEKT⁶⁴ tritt vorwiegend bei hohen Signalfrequenzen in Erscheinung. Er bewirkt, dass nur noch das Äußere des Leiters zum Stromfluss beiträgt. Der Skin-Effekt beruht auf der Abschirmungswirkung elektrisch leitfähiger Materialien gegenüber elektromagnetischen Feldern. Nach Küpfmüller, Mathis, Reibiger: *Theoretische Elektrotechnik* ist dieser Effekt nicht, wie häufig beschrieben, auf Wirbelströme zurückzuführen. Vielmehr handelt es sich um eine Felddiffusion in den Leiter, bei der die Eindringtiefe begrenzt ist und somit ein Eindringmaß definiert werden kann. Ein metallischer magnetisch neutraler Leiter wirkt für Hochfrequenzfelder wie ein magnetisch undurchlässiger Stoff mit der Permeabilität null. Der Skin-Effekt kann durch die Verwendung von HOCHFREQUENZLITZE⁶⁵ verringert werden. Bei HF-Litze wird ein Leiter durch die Parallelschaltung von gegeneinander elektrisch isolierten und miteinander verwobenen Einzelleitern ersetzt.

Der PROXIMITY-EFFEKT⁶⁶ beruht auf der Wechselwirkung des Stromes mit den elektromagnetischen Feldern benachbarter Leiter. Insbesondere dann, wenn benachbarte Leiter entgegengesetzt gerichtete Ströme aufweisen, sorgt der Proximity-Effekt für eine verminderte effektive Querschnittsfläche des Leiters.⁶⁷

62 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DURCHFLUSSWANDLER](http://de.wikipedia.org/wiki/Durchflusswandler)

63 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HYSTERESE](http://de.wikipedia.org/wiki/Hysterese)

64 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SKIN-EFFEKT](http://de.wikipedia.org/wiki/Skin-Effekt)

65 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HOCHFREQUENZLITZE](http://de.wikipedia.org/wiki/Hochfrequenzlitze)

66 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PROXIMITY-EFFEKT](http://de.wikipedia.org/wiki/Proximity-Effekt)

67 [HTTP://WWW.TU-DRESDEN.DE/ETIEEH/LEHRE/VORLESUNGEN_EET/HOCHSPANNUNGSGERAETE/G7.PDF](http://www.tu-dresden.de/eti/lehre/vorlesungen_eet/hochspannungsgeraete/g7.pdf)
[^]{[HTTP://WWW.TU-DRESDEN.DE/ETIEEH/LEHRE/VORLESUNGEN_EET/HOCHSPANNUNGSGERAETE/G7.PDF](http://www.tu-dresden.de/eti/lehre/vorlesungen_eet/hochspannungsgeraete/g7.pdf)}

0.6 Betrieb mit einer Sinusspannung

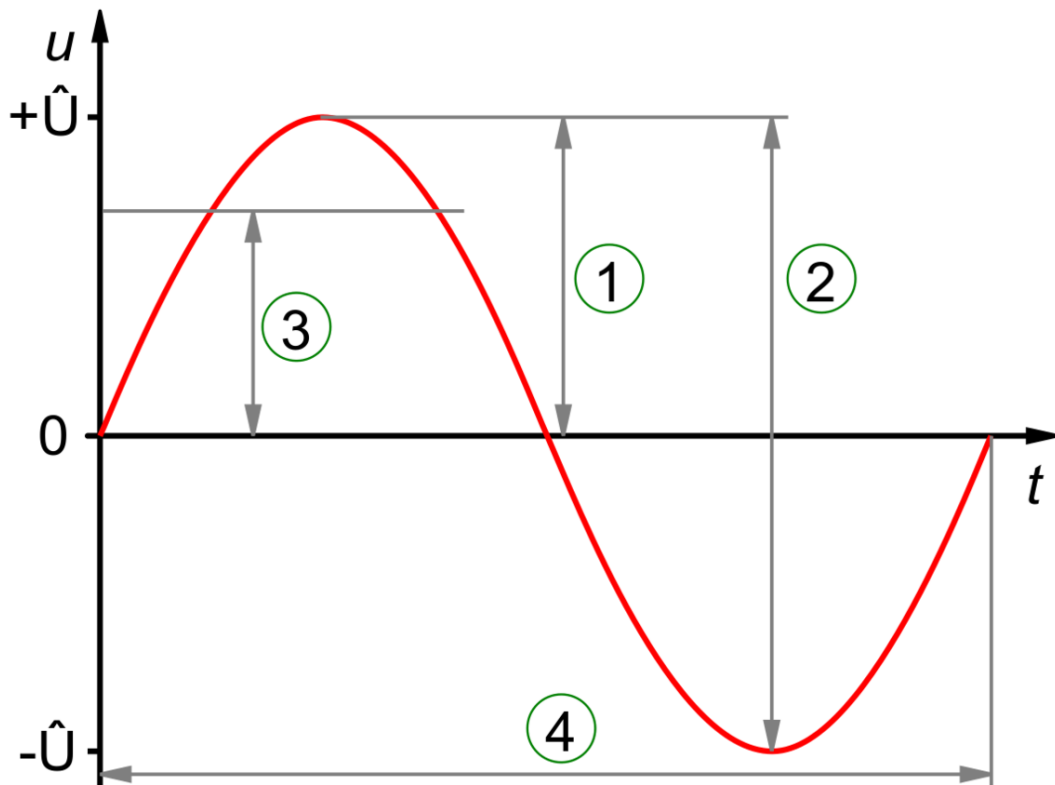


Abb. 13: Eine sinusförmige Wechselspannung.

- 1 = SCHEITELWERT^a,
 2 = SPITZE-SPITZE-WERT^b,
 3 = EFFEKTIVWERT^c,
 4 = PERIODENDAUER^d

^a [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SCHEITELWERT](http://de.wikipedia.org/wiki/Scheitelwert)

^b [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SPITZE-SPITZE-WERT](http://de.wikipedia.org/wiki/Spitze-Spitze-Wert)

^c [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/EFFEKTIVWERT](http://de.wikipedia.org/wiki/Effektivwert)

^d [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PERIODE%20%28PHYSIK%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Periode%20%28Physik%29)

Wird die Primärspule an eine sinusförmige Wechselspannung angeschlossen, werden die notwendigen Gleichungen komplizierter. Die Funktion eines Trafos kann (zu) einfach - **und falsch!** - so erklärt werden: Der durchfließende Wechselstrom $I_{\text{primär}}$ erzeugt im Inneren der Spule mit $N_{\text{primär}}$ Windungen und der Länge l folgende magnetische Flussdichte:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I$$

wobei μ_0 die MAGNETISCHE FELDKONSTANTE⁶⁸ und μ_r die PERMEABILITÄTSZAHL⁶⁹ sind. Dieses Magnetfeld ändert sich wie der Strom und induziert in der Sekundärspule eine Wechselspannung, die von der Windungszahl abhängt, wie weiter oben beschrieben.

Diese Erklärung hat einige Mängel: Sie berücksichtigt nicht, dass Trafos üblicherweise mit vorgegebener („eingepprägter“) *Spannung*, beispielsweise 230 V, betrieben werden und *nicht* mit vorgegebenem Strom I , den die Gleichung verlangt. Aus ihr folgt nicht, wieso bei tiefen Frequenzen ein Eisenkern erforderlich ist. Sie liefert weder einen Anhaltspunkt für den einfachen Zusammenhang $U_p/U_s = N_p/N_s$ noch für experimentellen Befund, dass sich der Primärstrom bei unterschiedlicher Belastung auf der Sekundärseite stark und fast proportional ändert.

Diese belastungsabhängige Stromaufnahme liefert den Schlüssel für die korrekte Erklärung. Es *muss* einen Effekt geben, der dafür sorgt, dass der aufgenommene Strom immer geringer ist als der Maximalwert, der sich nach dem OHMSCHEN GESETZ⁷⁰ aus der angelegten Wechselspannung (230 V) und dem Widerstand der Primärspule eines zum Beispiel 100VA Trafos (etwa 5 Ω) ergibt. Im Leerlauf, also ohne sekundärseitige Belastung, kann der Primärstrom auf einige Prozent des Nennstromes von hier 0,43A sinken. Dieser Effekt wird durch die SELBSTINDUKTION⁷¹ verursacht, er soll hier nicht im Detail diskutiert werden. Kurz zusammengefasst geschieht *im eingeschwungenen Zustand*, also nicht in den ersten Augenblicken nach dem Einschalten, folgendes:

- Die angelegte Wechselspannung U_{Netz} lässt in der Primärspule einen Wechselstrom fließen, der im Eisenkern ein magnetisches Wechselfeld erzeugt.
- Dieses induziert in allen Spulen des Trafos, also *auch* in der Primärspule eine „Gegenspannung“ $U_{\text{induziert}}$, die fast so groß ist wie die angelegte Wechselspannung und diese weitgehend kompensiert (LENZSCHE REGEL⁷²). Als „Antriebsspannung“ für den Primärstrom steht nur die Differenzspannung $U_{\text{Netz}} - U_{\text{induziert}}$ zur Verfügung, die wenige Volt beträgt und am ohmschen Widerstand des Spulendrahtes abfällt. Deshalb ist der Primärstrom so gering.
- Wäre die Gegenspannung zu gering, würde die Differenzspannung $U_{\text{Netz}} - U_{\text{induziert}}$ sofort größer werden und höheren Primärstrom fließen lassen. Dadurch würde aber das Magnetfeld ansteigen und mehr Gegenspannung erzeugen. Dieses Verhalten nennt man dynamisches STABILES GLEICHGEWICHT⁷³. Es sorgt in jedem Moment dafür, dass die induzierte Spannung "parallel" zur angelegten Wechselspannung mitläuft.

Das ist auch die Begründung für die Gleichung

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

zur Berechnung der Windungszahlenverhältnisses, um die Sekundärspannung U_s zu erhalten. Wenn die „Gegenspannung“ $U_{\text{induziert}}$ in der Primärspule fast so groß ist wie die angelegte

68 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/MAGNETISCHE%20FELDKONSTANTE](http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische%20feldkonstante)

69 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PERMEABILIT%44TSZAHL](http://de.wikipedia.org/wiki/Permeabilit%C3%A4tswert)

70 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/OHMSCHES%20GESETZ](http://de.wikipedia.org/wiki/Ohmsches%20Gesetz)

71 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SELBSTINDUKTION](http://de.wikipedia.org/wiki/Selbstinduktion)

72 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LENZSCHE%20REGEL](http://de.wikipedia.org/wiki/Lenzsche%20regel)

73 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STABILES%20GLEICHGEWICHT](http://de.wikipedia.org/wiki/Stabiles%20gleichgewicht)

Wechselspannung U_p , gilt das genauso für die induzierte Spannung U_s in einem parallel mitgeführten Draht, der nun Sekundärspule genannt wird. Das ändert sich auch nicht, wenn die Drähte nicht exakt nebeneinander liegen, sie können sogar in merklicher Entfernung montiert werden, solange sie vom gleichen Magnetfeld durchflossen werden. Und wenn man die Windungszahl halbiert, erhält man auch nur die halbe Spannung. Mit der Gleichung

$$U_p = N_p \cdot \frac{dB}{dt} \cdot A$$

aus dem vorhergehenden Absatz und der maximalen Flussdichte $B = 1,7 \text{ T}$ für kornorientiertes DYNAMOBLECH⁷⁴ kann man die induzierte Spannung pro Windung abschätzen. Da sich die NETZSPANNUNG⁷⁵ in $dt = 5 \text{ ms}$ von Null bis zum Maximalwert U_{max} ändert, gilt für einen Eisenkern der Querschnittsfläche 10 cm^2 mit guter Näherung

$$U_{eff} = 1 \cdot \frac{1,7 \text{ T}}{0,005 \text{ s}} \cdot 10 \text{ cm}^2 = 0,34 \text{ V}$$

Das Ergebnis ist nicht ganz exakt, weil bei dieser Gleichung nicht die Sinusform der Netzspannung berücksichtigt ist. Die genaue Gleichung findet man HIER⁷⁶.

0.7 Der Eisenkern

Die Verwendung eines EISENKERNS⁷⁷ verringert zwar die Anzahl der notwendigen Windungen in beiden Spulen, bringt aber auch Nachteile mit: Der Eisenkern kann magnetisch GESÄTTIGT⁷⁸ werden, dann wird die transformierte Wechselspannung verzerrt. Ferner entstehen im Eisen Wirbelstromverluste. Je tiefer die zu übertragende Frequenz ist, desto zwingender ist aber die Verwendung eines Eisenkerns. Das wird am Beispiel eines 50 Hz-Trafos erläutert.

0.7.1 Netztrafo ohne Eisenkern

Der Eisen- oder Ferritkern im Trafo ist überflüssig, wenn

1. der INDUKTIVE WIDERSTAND⁷⁹ $Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ der Primärspule bei der Betriebsfrequenz f so hoch ist, dass ein akzeptabler, das heißt nur geringer Leerlaufstrom fließt und
2. der ohmsche Widerstand der Spule so gering ist, dass der Draht auch bei Höchstlast des Trafos, also bei maximalem Primärstrom, nicht überhitzt wird.

74 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DYNAMOBLECH](http://de.wikipedia.org/wiki/DYNAMOBLECH)

75 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/NETZSPANNUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/NETZSPANNUNG)

76 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/NETZTRANSFORMATOR%20MITTELFREQUENZ-TRANSFORMATOREN](http://de.wikipedia.org/wiki/Netztransformator%20Mittelfrequenz-Transformatoren)

77 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/EISENKERN](http://de.wikipedia.org/wiki/EISENKERN)

78 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FERROMAGNETISMUS%20S.C3.A4TTIGUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Ferromagnetismus%20S.C3.A4ttigung)

79 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/IMPEDANZ](http://de.wikipedia.org/wiki/IMPEDANZ)

Bei Frequenzen über 1 MHz genügen meist weniger als 100 Windungen, um beide Forderungen zu erfüllen. Bei tiefer Frequenz treten unüberwindbare Probleme auf, wie folgendes Beispiel für einen Netztrafo von 100 W und bescheidener Qualität zeigt: Für einen Leerlaufstrom von 100 mA muss $Z_L = 2300 \Omega$ und $L = 7,3 \text{ H}$ sein. Die erforderliche Windungszahl N der Primärspule kann man mit der GLEICHUNG⁸⁰

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_r A}{l}$$

abschätzen und erhält *ohne Eisenkern* etwa 31000 Windungen mit einer Drahtlänge von 10 km und einem Maximalwiderstand von 40 Ω . Der notwendige Kupferdraht müsste einen Querschnitt von 4,3 MM^{281} haben, der bei 31000 Windungen einen Wicklungsquerschnitt von 1300 cm^2 einnimmt. In diese Primärspule müsste eine etwa gleich massive Sekundärspule „eingewoben“ werden, um eine gute magnetische Kopplung zu erzielen. Insgesamt ergibt sich ein Gesamtvolumen von etwa einem Kubikmeter bei 9000 kg Masse.

0.7.2 Netztrafo mit Eisenkern

Dieser ohne Eisenkern kaum realisierbare Trafo lässt sich mit einem ausreichend großen Kern aus DYNAMOBLECH⁸² auf handliche Werte verkleinern. Wegen der sehr hohen PERMEABILITÄTSZAHL⁸³ $\mu_r \approx 2000$ genügen nun 700 Windungen für die Primärspule. Dadurch sinkt die Drahtlänge der Primärwicklung bei üblichen Baugrößen auf etwa 100 m und der Drahtquerschnitt darf ebenfalls deutlich reduziert werden, um den geforderten Widerstand von 40 Ω zu unterschreiten. Dieses Ergebnis lässt sich nur *mit* Eisenkern erzielen und genügt jahrzehntelang allen Ansprüchen. Erst in den letzten Jahren konnten diese Werte für Maße und Gewicht durch Frequenzerhöhung in Schaltreglern drastisch reduziert werden.

An Stelle eines massiven Eisenkerns *muss* ein aus dünnem Trafo**blech** zusammengesetzter „geschichteter“ Eisenkern eingesetzt werden, um die WIRBELSTRÖME⁸⁴ im Kern gering zu halten. Die Frage ist nur, wie klein der Eisenkern bei einem funktionsfähigen Trafo gemacht werden darf, um Gewicht einzusparen. Wählt man für den 100 W-Trafo einen (zu) großen Eisenkern von beispielsweise 10 kg, gibt es kein Problem mit der SÄTTIGUNGSMAGNETISIERUNG⁸⁵. Je kleiner und leichter aber der Eisenkern sein soll, desto weniger WEISS-BEZIRKE⁸⁶ enthält er.

Diese werden aber bereits bei geringeren Magnetfeldern komplett ausgerichtet - Sättigung ist erreicht. Das erzeugt eine Reihe von neuartigen Problemen: VERZERRUNGEN⁸⁷ der Sinusform

80 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIVIT%23INDUKTIVIT%20EINER%20ZYLINDERSPULE](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktivit%23Induktivit%20einer%20Zylinderspule)

81 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ELEKTRISCHER%20WIDERSTAND%23BERECHNUNG%20DES%20WIDERSTANDS%20EINES%20LEITERS](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer%20Widerstand%23Berechnung%20des%20Widerstands%20eines%20Leiters)

82 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DYNAMOBLECH](http://de.wikipedia.org/wiki/Dynamoblech)

83 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PERMEABILIT%23ZAHLE](http://de.wikipedia.org/wiki/Permeabilit%23zahl)

84 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/WIRBELSTROM](http://de.wikipedia.org/wiki/Wirbelstrom)

85 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/S%23TTIGUNGSMAGNETISIERUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/S%23ttigungsmagnetisierung)

86 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/WEISS-BEZIRK](http://de.wikipedia.org/wiki/Weiss-bezirk)

87 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/VERZERRUNGEN](http://de.wikipedia.org/wiki/Verzerrungen)

des Leerlaufstromes, schlechterer Wirkungsgrad, zusätzliche Wärme und massive Stromspitzen beim Einschalten.



Abb. 14: Ausschnitt der Hysteresekurve mit unterschiedlichen Stromdifferenzen bei konstanter Φ -Änderung an einem großen Trafo

Der Reihe nach: Bei Induktion dreht sich alles um die Gleichung $U = d\Phi/dt$ mit dem „Magnetfluss“ $\Phi = B \cdot A$. Bei jedem Trafo ist die Spulenfläche A konstant, deshalb muss das Magnetfeld B geändert werden. B wird von der Primärspule erzeugt, dafür gilt die Gleichung

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{N_{\text{prim}} \cdot J_{\text{prim}}}{l}$$

Das Magnetfeld B sollte proportional zum Strom J_{prim} mit dem Faktor μ_r zunehmen, das wäre eine steigende Gerade. Im Experiment gilt das nur für kleine Ströme, bei großen Strömen biegt die Gerade nach rechts ab und verläuft schließlich fast horizontal. μ_r ist leider *nicht* konstant, sondern wird mit steigendem Strom J immer kleiner, sinkt bis zum Wert 1. Im nebenstehenden Bild sieht man, dass man nicht immer den *gleichen* Stromzuwachs dJ benötigt, um den Magnetfluss Φ um den gleichen Betrag $d\Phi$ zu vergrößern. Genügt anfangs ein Stromzuwachs von 0,5 A für eine gewisse Flussänderung, benötigt man bei höherem Gesamtstrom bereits 3 A oder mehr, um die gleiche Flussänderung zu erzielen.

An dieser Stelle gibt es natürliche Grenzen: Jedes Stück Eisen besteht aus endlich vielen Atomen, die nur eine gewisse Anzahl Weiss-Bezirke bilden können. Deren Orientierung zeigt *ohne* externes Magnetfeld - statistisch verteilt - in alle Richtungen, das Eisen ist

ENTMAGNETISIERT⁸⁸. Mit zunehmendem Strom durch die Primärspule werden immer noch mehr Bezirke parallel zur Spulenchse ausgerichtet und die Kurve steigt steil an. Wenn aber fast alle orientiert sind, hilft auch kein weiterer Stromanstieg, um noch mehr in diese Richtung zu zwingen, denn es sind ja keine mehr da. Der Magnetfluss kann kaum noch steigen, die Kurve wird flacher. Bei kornorientiertem DYNAMOBLECH⁸⁹ geht man bis zu Flussdichten $B = 1,6 \dots 1,75 \text{ T}$; Sättigung tritt ein ab $2,03 \text{ TESLA}$ ⁹⁰.

Für den Primärstrom hat das katastrophale Folgen: Sobald die Hysteresekurve flach wird, kann Φ kaum noch ansteigen, die Änderung $d\Phi$ wird Null. Deshalb verschwindet auch die Gegenspannung $U_{\text{induziert}}$ und der Primärstrom steigt auf extreme Werte (EINSCHALTEN DES TRANSFORMATORS⁹¹), bis die Sicherung abschaltet. Ein gesättigter Kern hat die gleiche Wirkung wie Luft, nämlich keine. Der Strom wird dann nur durch den ohmschen Widerstand der Primärspule begrenzt.

Was ist Magnetisierung?

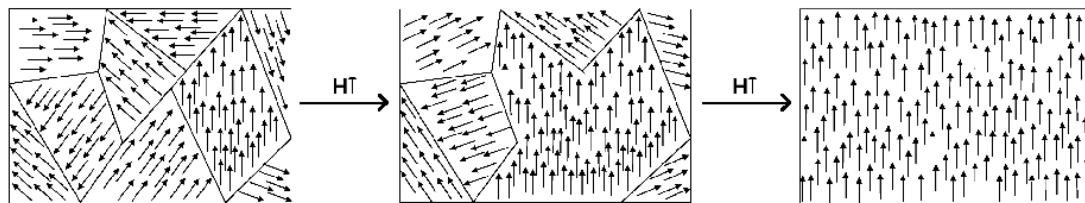


Abb. 15: Vergrößerung der Weiss-Bezirk durch die Ausrichtung mehrerer Domänen über ein externes stärker werdendes magnetisches Feld

Ein Stück Eisenblech besteht aus einer Unmenge von etwa $1 \mu\text{m}$ großen Eisenkristallen unterschiedlicher Form und Größe, die als *Domänen* bezeichnet werden. Jede enthält viele Millionen Eisenatome, deren magnetische Achsen aus quantenmechanischen Gründen parallel ausgerichtet sind. Das macht jede Domäne zu einem perfekten Permanentmagneten. Diesen Zustand nenne man auch *gesättigt*, denn es gibt in einer Domäne keine weiteren Eisenatome mehr, die man noch besser ausrichten könnte.

Die magnetischen Richtungen in einem größeren Eisenstück sind herstellungsbedingt durcheinander gewürfelt und zeigen in irgendwelche Richtungen. Bei den vielen Milliarden Domänen kompensieren sich die Einzelbeiträge und das Eisen erscheint unmagnetisch.

Befindet sich dieses Eisenstück in die Nähe eines starken Magneten oder in einer stromdurchflossenen Spule, orientieren sich einige Domänen um, es entstehen größere Bezirke, in denen die Eisenatome einheitlich orientiert sind. Das bezeichnet man als Weiss-Bezirk. Wird das externe Magnetfeld immer stärker, sind irgendwann *alle* Eisenatome magnetisch parallel orientiert, dann ist das Eisen „magnetisch gesättigt“.

88 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ENTMAGNETISIERUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Entmagnetisierung)

89 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DYNAMOBLECH](http://de.wikipedia.org/wiki/Dynamoblech)

90 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/TESLA%20%28EINHEIT%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Tesla%20%28Einheit%29)

91 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/EINSCHALTEN%20DES%20TRANSFORMATORS](http://de.wikipedia.org/wiki/Einschalten%20des%20Transformators)

Magnetisch weich oder hart?

Magnetische oder magnetisierbare Materialien enthalten meist viel Eisen, aber andere beigemengte Materialien bestimmen die magnetische Härte.

0.7.3 Der Magnetisierungsstrom

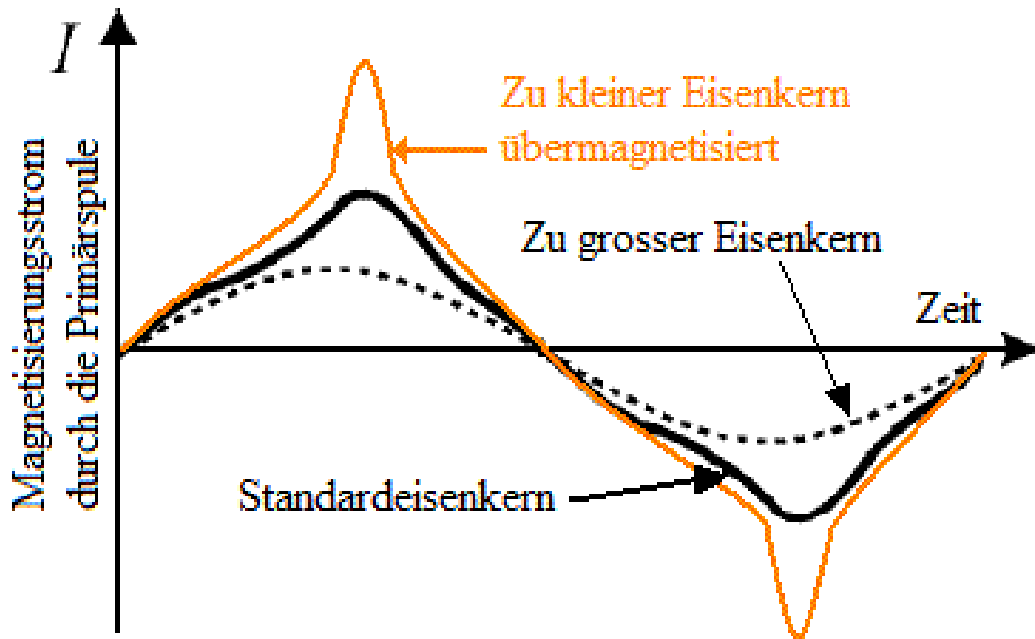


Abb. 16: Verlauf des Magnetisierungsstromes bei unterschiedlichen Eisenkerngrößen, desselben Kerntyps bei gegebenem Magnetfluss

Der Querschnitt A des Eisenkerns ist ein Maß dafür, wie viele Weiss-Bezirke vom gegebenen Magnetfeld der Primärspule ausgerichtet werden können. Der Kern wird im Bild verkleinert oder vergrößert. Sind alle Weiss-Bezirke parallel zur Spulenachse orientiert (MAGNETISCHE SÄTTIGUNG⁹²), kann sich Φ nicht mehr ändern, die SELBSTINDUKTION⁹³ kann keine Gegenspannung mehr induzieren und der Strom durch die Primärspule steigt steil an (rote Kurve im Bild). Gleichzeitig strebt die Spannung in der Sekundärspule gegen Null - das ist unerwünscht! In diesem Moment wird besonders viel Energie aus dem Stromnetz entnommen und wenig an die Sekundärspule übertragen. Als Folge kann die Primärspule durchbrennen.

Übliche Gegenmittel: Entweder den Eisenkern vergrößern oder die Frequenz erhöhen oder beides oder mehr Windungen draufpacken. Wer jemals einen 300 W-Netztrafo gehoben und mit dem Gewicht eines COMPUTERNETZTEILS⁹⁴ gleicher Leistung verglichen hat, weiß, was man

92 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FERROMAGNETISMUS%20S.C3.A4TTIGUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Ferromagnetismus%20S.C3.A4ttigung)

93 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SELBSTINDUKTION](http://de.wikipedia.org/wiki/Selbstinduktion)

94 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%20GETAKTETE%20NETZTEILE%20SCHALTNETZTEIL](http://de.wikibooks.org/wiki/%20Getaktete%20Netzteile%20Schaltnetzteil)

mit ausreichend hoher Frequenz von etwa 50 kHz erreichen kann. Die Begründung steckt wieder in der Gleichung für die Windungsspannung.

$$U_{\text{ind}} = \frac{dB}{dt} \cdot A = \frac{dB \cdot A}{dt} = \frac{dB \cdot 0,1 \cdot A}{0,1 \cdot dt} = \frac{dB \cdot A_1}{dt_1}$$

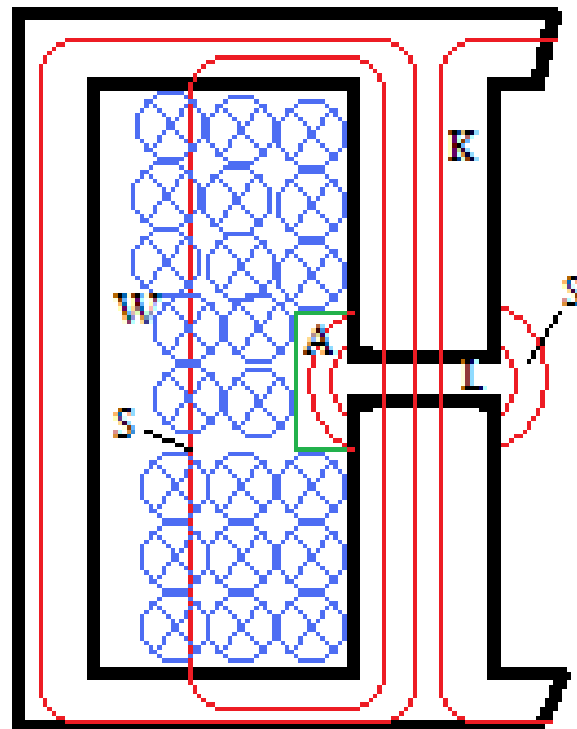
Wird die Frequenz verzehnfacht, dauert eine Schwingung nur noch $0,1 \cdot dt$. Verringert man die Spulenfläche A ebenfalls um den Faktor 10 auf A_1 , entsteht die gleiche Induktionsspannung. Wenn aber die Eisenfläche auf 10 % verringert wird, schrumpfen bei Einhaltung der Proportionen alle Abmessungen und sowohl Volumen als auch Masse des Trafos verringern sich auf 3,2 % des ursprünglichen Wertes. Aus diesem Grund wurde für das Bordnetz von Flugzeugen die Frequenz 400 Hz gewählt. Umgekehrt benötigen Trafos für BAHNSTROM⁹⁵ bei der Frequenz 16,7 Hz die dreifache Eisenfläche und die 5,2-fache Masse im Vergleich zum Betrieb mit 50 Hz.

Zu speziellen Problemen beim Einschalten von Transformatoren siehe EINSCHALTEN DES TRANSFORMATORS⁹⁶

⁹⁵ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/BAHNSTROM](http://de.wikipedia.org/wiki/Bahnstrom)

⁹⁶ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/EINSCHALTEN%20DES%20TRANSFORMATORS](http://de.wikipedia.org/wiki/Einschalten%20des%20Transformators)

0.7.4 Streufluss



- W Wicklung
- S Streuflüsse
- K Kern
- A Aufpolsterung
- L Luftspalt

Abb. 17: Linker Teil eines aufgeschnittenen Streufeldtrafos

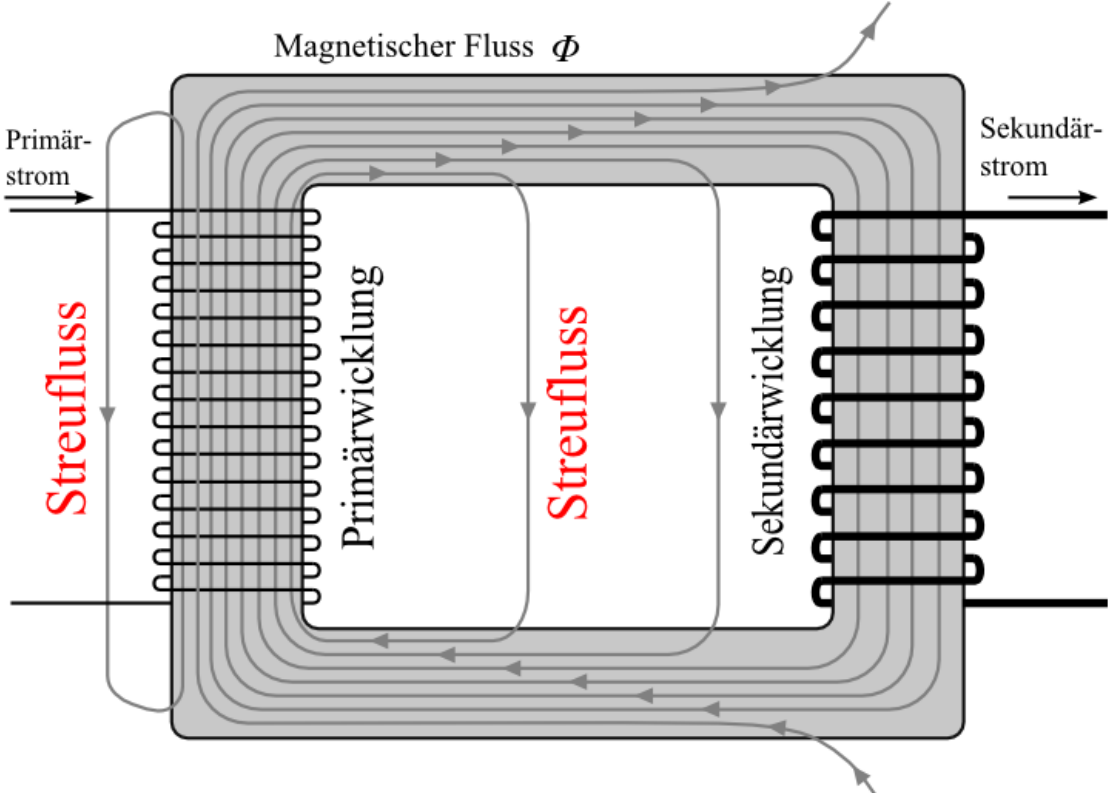


Abb. 18: Streufuss eines Trafokerns

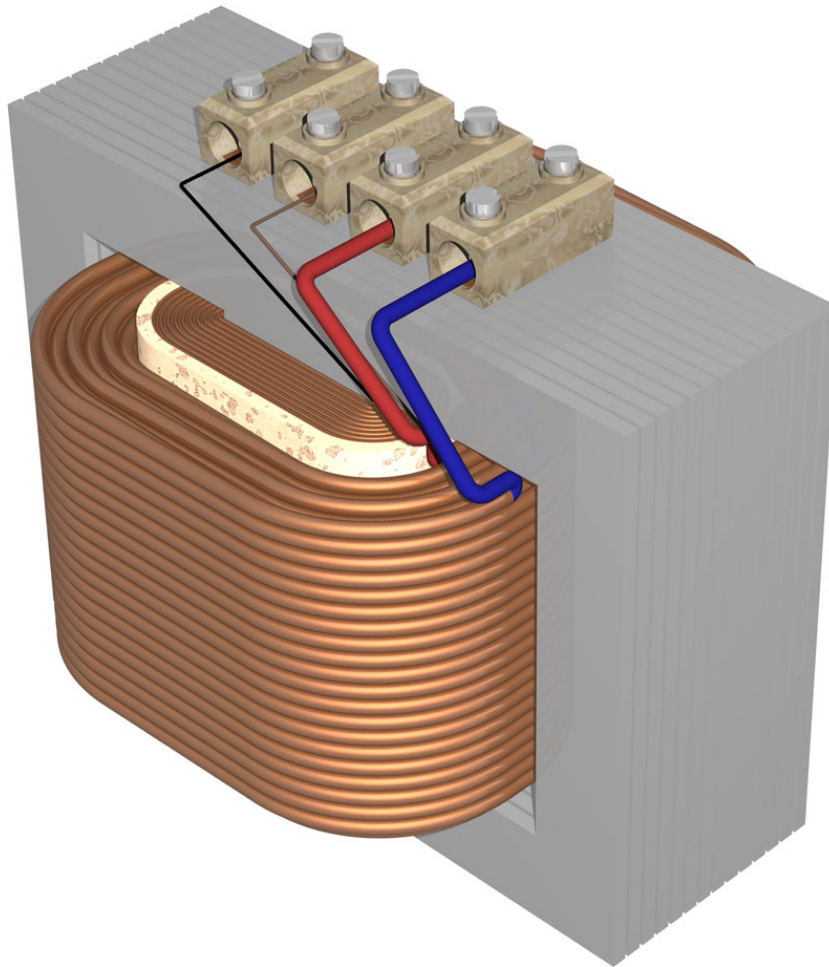


Abb. 19: Übereinander gewickelte Primär- und Sekundärspule verringern den Streufluss

Bei einem idealen Transformator würden alle Linien des Magnetflusses, die von der Primärspule erzeugt werden, auch durch die Sekundärspule laufen. Bei einem REALEN TRAF⁹⁷ schlagen einige Magnetfeldlinien andere Wege ein, insbesondere bei geringer PERMEABILITÄT⁹⁸ des Magnetwerkstoffes und hoher Belastung „weichen“ sie der Sekundärwicklung aus. Das erzeugt unerwünschte Magnetfelder in der Umgebung, die in manchen Geräten wie OSZILLOSKOPEN⁹⁹ sehr störend sein können und besondere ABSCHIRMUNGEN¹⁰⁰ verlangen. Außerdem verringern sie den Wirkungsgrad des Trafos und sorgen dafür, dass die Gleichung $N_p/N_s=U_p/U_s$ nicht genau gilt. Abhilfe sind geringe Abstände zwischen Wicklung und Eisenkern sowie Vermeiden von räumlich getrennten Spulen.

97 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/THEORIE%20IDEALER%20DCBERTRAGER%23REALE%20TRANSFORMATOREN](http://de.wikipedia.org/wiki/Theorie%20idealer%20DCBertrager%23Reale%20Transformatoren)

98 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PERMEABILIT%C3%A4T%20MAGNETISMUS](http://de.wikipedia.org/wiki/Permeabilit%C3%A4t%20Magnetismus)

99 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/OSZILLOSKOP](http://de.wikipedia.org/wiki/Oszilloskop)

100 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ABSCHIRMUNG%20ELEKTROTECHNIK%29%23TECHNISCHE%20MA%DFNAHMEN%20ZUR%20ABSCHIRMUNG%20NIEDERFREQUENTER%20MAGNETFELDER](http://de.wikipedia.org/wiki/Abschirmung%20Elektrotechnik%29%23Technische%20Ma%DFnahmen%20zur%20Abschirmung%20niederfrequenter%20Magnetfelder)

Es gibt aber Einsatzbereiche, bei denen das Streufeld erwünscht ist, wie STREUFELDTRANSFORMATOREN¹⁰¹ beim SCHWEISSEN¹⁰² oder als VORSCHALTGERÄTE¹⁰³ für LEUCHTSTOFFRÖHREN¹⁰⁴. In diesen Fällen werden gezielt Luftspalte eingebaut, wie im nebenstehenden Bild zu sehen ist. Der Streufeldtransformator vereint die Funktion eines Transformators (Spannungstransformation und galvanische Trennung) und einer strombegrenzenden Drossel in einem Bauteil.

0.7.5 Laminierte Blechpakete

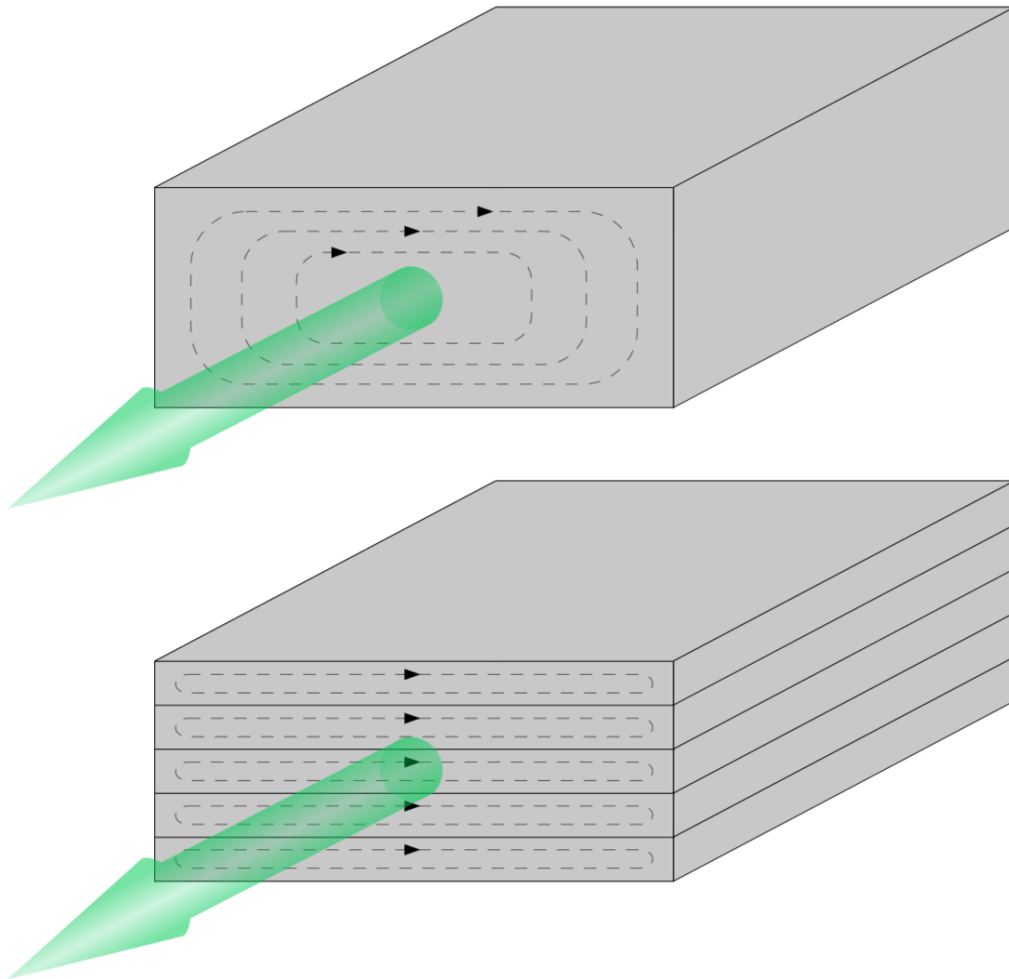


Abb. 20: Wirbelströme im Eisenblock (oben) und in laminierten Blechen (unten)

101 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STREUFELDTRANSFORMATOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Streufeldtransformator)

102 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SCHWEI%DFEN](http://de.wikipedia.org/wiki/Schwei%DFEN)

103 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/VORSCHALTGER%E4T](http://de.wikipedia.org/wiki/Vorschaltger%E4T)

104 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LEUCHTSTOFFR%F6HRE](http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtstoffr%F6HRE)

Ein massiver Eisenkern wie oben im Bild würde in der Primärwicklung wie eine kurzgeschlossene Windung wirken, in der ein großer Strom induziert wird. Obwohl die LEITFÄHIGKEIT¹⁰⁵ von Eisen nicht besonders gut ist, würde darin sehr viel WÄRMEENERGIE¹⁰⁶ entstehen. Das ist beim INDUKTIONSKOCHFELD¹⁰⁷ und INDUKTIONSOFFEN¹⁰⁸ erwünscht, muss aber beim Trafo vermieden werden. Aus diesem Grund wird der Kern eines Trafos aus dünnen, voneinander isolierten DYNAMOBLECHEN¹⁰⁹ zusammengesetzt, damit die Fläche A jedes einzelnen Bleches quer zum Magnetfluss Φ gering wird. Die Heizleistung eines Blechstreifens berechnet sich nach der Formel

$$P = \frac{U_{\text{ind}}^2}{R}$$

Wegen der geringen Dicke des Bleches bleiben Umfang und Widerstand R entlang des Umfanges etwa konstant. Der einzige Weg, die Verluste zu verringern, ist eine Reduktion der induzierten Spannung. Aus der Induktionsformel

$$U_{\text{ind}} = A \cdot \frac{dB}{dt}$$

folgt, dass der Querschnitt A klein werden muss. Eine Halbierung der Blechdicke bei sonst unveränderten Bedingungen verringert die Heizleistung P auf 25 %.

Bei hoher Frequenz wird die Zeit dt für eine Schwingung immer kleiner. Verdoppelt man die Betriebsfrequenz des Trafos bei unverändertem Blechquerschnitt A , verdoppelt sich auch U_{ind} und die Heizleistung steigt um den Faktor vier. Dieser enorme Anstieg lässt sich nur durch dünneres Blech kompensieren. Kerne von NF-Trafos, wie sie beispielsweise in RÖHRENVERSTÄRKERN¹¹⁰ benötigt werden, sind deshalb immer aus besonders dünnen Eisen-„Folien“ aufgebaut. Das reicht bei noch höheren Frequenzen nicht aus, dort geht man zu FERRITKERNEN¹¹¹ oder RINGKERNEN¹¹² aus gepresstem Eisenpulver über. Dadurch wird zwar die Querschnittsfläche A jedes KRISTALLITS¹¹³ sehr klein, der gegenseitige Abstand verkleinert aber auch den Maximalwert von B . Das begrenzt die übertragbare Leistung des Transformators.

105 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LEITF%E4HIGKEIT](http://de.wikipedia.org/wiki/Leitf%C3%A4higkeit)

106 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/W%E4RME](http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rme)

107 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIONSKOCHFELD](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktionskochfeld)

108 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INDUKTIONSOFFEN](http://de.wikipedia.org/wiki/Induktionsofen)

109 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DYNAMOBLECH](http://de.wikipedia.org/wiki/Dynamoblech)

110 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/R%E4RRENVERST%E4RKER](http://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%B6hrenverst%C3%A4rker)

111 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FERRITKERN](http://de.wikipedia.org/wiki/Ferritkern)

112 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/RINGKERN](http://de.wikipedia.org/wiki/Ringkern)

113 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/KRISTALLIT](http://de.wikipedia.org/wiki/Kristallit)

0.8 Widerstandstransformation

Bei LEISTUNGSANPASSUNG¹¹⁴ muss der Belastungswiderstand den gleichen Wert haben wie der INNENWIDERSTAND¹¹⁵ der Stromquelle. Bei unterschiedlichen Werten kann - bei Wechselstrom - ein Transformator zur Widerstands Anpassung verwendet werden. Zur Herleitung des Zusammenhangs multipliziert man die beiden linken Seiten und die rechten Seiten der Formeln

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \text{und} \quad \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

und erhält

$$\frac{U_p}{U_s} \cdot \frac{I_s}{I_p} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2$$

Zusammen mit dem ohmschen Gesetz $R = U/I$ folgt daraus

$$\frac{R_p}{R_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2$$

Durch ein Windungszahlverhältnis von 1:2 wird eine Widerstandstransformation von 1:4 erreicht. Beispiele:

- Die sehr geringe Spannung eines BÄNDCHENMIKROFONS¹¹⁶ mit dem INNENWIDERSTAND¹¹⁷ von nur $0,2 \Omega$ muss auf 180Ω angehoben werden, damit das Signal störungsarm übertragen werden kann. Aus dem Widerstandsverhältnis 900 folgt ein Übersetzungsverhältnis von 30 für den Trafo. Dadurch wird auch die induzierte Spannung des Mikrofons um den Faktor 30 heraufgesetzt.
- Ein Lautsprecher mit $R = 4 \Omega$ soll an eine Röhrenendstufe der Impedanz von 2000Ω angepasst werden. Dann muss der Trafo ein Übersetzungsverhältnis von

$$a = \sqrt{\frac{2000}{4}} = 22$$

haben. Die Verwendung eines Trafos hat den erwünschten Nebeneffekt, dass durch den Lautsprecher kein Gleichstrom fließen kann.

114 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LEISTUNGSANPASSUNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Leistungsanpassung)

115 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INNENWIDERSTAND](http://de.wikipedia.org/wiki/Innenwiderstand)

116 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DYNAMISCHES%20MIKROFON%23B%E4NDCHENMIKROFON](http://de.wikipedia.org/wiki/Dynamisches%20Mikrofon%23B%E4ndchenmikrofon)

117 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INNENWIDERSTAND](http://de.wikipedia.org/wiki/Innenwiderstand)

0.9 Einzelnachweise

0.10 Siehe auch

- W:RESONANZTRANSFORMATOR¹¹⁸
- W:STREUFELDTRANSFORMATOR¹¹⁹

0.11 Weblinks

- VERSUCHE UND AUFGABEN ZUM TRANSFORMATOR¹²⁰
- KATEGORIE:BUCH¹²¹

¹¹⁸ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/RESONANZTRANSFORMATOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Resonanztransformator)

¹¹⁹ [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STREUFELDTRANSFORMATOR](http://de.wikipedia.org/wiki/Streifeldtransformator)

¹²⁰ [HTTP://WWW.PHYSIK.UNI-MUENCHEN.DE/LEIFIPHYSIK/WEB_PH10/MATERIALSEITEN/M12_TRANSFORMATOR.HTM](http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph10/materialseiten/m12_transformator.htm)

¹²¹ [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/KATEGORIE%3ABUCH](http://de.wikibooks.org/wiki/Kategorie%3ABuch)

1 Autoren

Edits	User
4	AKA ¹
1	BOEHM ²
1	BÜCHERWÜRMLEIN ³
2	CEPHEIDEN ⁴
2	EMEKO ⁵
47	HERBERTWEIDNER ⁶
1	KLAUS EIFERT ⁷
5	MICHAELFREY ⁸
1	MR.CHECKER ⁹
2	NEON02 ¹⁰
1	PITTIMANN ¹¹
1	RESEKA ¹²
2	SCHLURCHER ¹³
3	WDWD ¹⁴

1 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:AKA](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:AKA)
2 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:BOEHM](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:BOEHM)
3 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:B%C3%BCCHERW%C3%BCRMLEIN](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:B%C3%BCCHERW%C3%BCRMLEIN)
4 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:CEPHEIDEN](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:CEPHEIDEN)
5 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:EMEKO](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:EMEKO)
6 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:HERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:HERBERTWEIDNER)
7 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:KLAUS_EIFERT](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:KLAUS_EIFERT)
8 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:MICHAELFREY](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:MICHAELFREY)
9 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:MR.CHECKER](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:MR.CHECKER)
10 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:NEON02](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:NEON02)
11 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:PITTIMANN](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:PITTIMANN)
12 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:RESEKA](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:RESEKA)
13 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:SCHLURCHER](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:SCHLURCHER)
14 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=BENUTZER:WDWD](http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=BENUTZER:WDWD)

Abbildungsverzeichnis

- GFDL: Gnu Free Documentation License. <http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>
- cc-by-sa-3.0: Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
- cc-by-sa-2.5: Creative Commons Attribution ShareAlike 2.5 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>
- cc-by-sa-2.0: Creative Commons Attribution ShareAlike 2.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>
- cc-by-sa-1.0: Creative Commons Attribution ShareAlike 1.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/>
- cc-by-2.0: Creative Commons Attribution 2.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>
- cc-by-2.0: Creative Commons Attribution 2.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>
- cc-by-2.5: Creative Commons Attribution 2.5 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/deed.en>
- cc-by-3.0: Creative Commons Attribution 3.0 License. <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.en>
- GPL: GNU General Public License. <http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.txt>
- PD: This image is in the public domain.
- ATTR: The copyright holder of this file allows anyone to use it for any purpose, provided that the copyright holder is properly attributed. Redistribution, derivative work, commercial use, and all other use is permitted.
- EURO: This is the common (reverse) face of a euro coin. The copyright on the design of the common face of the euro coins belongs to the European Commission. Authorised is reproduction in a format without relief (drawings, paintings, films) provided they are not detrimental to the image of the euro.
- LFK: Lizenz Freie Kunst. <http://artlibre.org/licence/lal/de>
- CFR: Copyright free use.
- EPL: Eclipse Public License. <http://www.eclipse.org/org/documents/epl-v10.php>

1		
2	HERBERTWEIDNER ¹⁵ Date = 2009-06-02	GFDL
3		PD
4	BIEZL ¹⁶	cc-by-sa-3.0
5	BIEZL ¹⁷	cc-by-sa-3.0
6	HERBERTWEIDNER ¹⁸ at DE.WIKIPEDIA ¹⁹	PD
7	HERBERTWEIDNER ²⁰ at DE.WIKIPEDIA ²¹	PD
8	HENRIK ²²	GFDL
9		PD
10	HERBERTWEIDNER ²³ at DE.WIKIPEDIA ²⁴	PD
11	WDWD ²⁵	cc-by-sa-3.0
12	MATTHIASDD ²⁶	GFDL
13	MATTHIAS KRÜGER ²⁷	PD
0	Loremus Ipsum	None
15	Original uploader was 4LEX ²⁸ at ES.WIKIPEDIA ²⁹	GFDL
16	HERBERTWEIDNER ³⁰ at DE.WIKIPEDIA ³¹	PD
17	NorbertR.	PD
18	HERBERTWEIDNER ³² at DE.WIKIPEDIA ³³ . Later version(s) were uploaded by RAINALD62 ³⁴ at DE.WIKIPEDIA ³⁵ .	PD
19	MTODOROV 69 ³⁶	GFDL
20	BILLC ³⁷	cc-by-sa-2.5

-
- 15 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3AHERBERTWEIDNER1](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3AHerbertweidner1)
 - 16 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3ABIEZL](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3ABiezl)
 - 17 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3ABIEZL](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3ABiezl)
 - 18 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Ade%3Auser%3AHERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Ade%3Auser%3AHerbertweidner)
 - 19 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG](http://de.wikipedia.org)
 - 20 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Ade%3Auser%3AHERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Ade%3Auser%3AHerbertweidner)
 - 21 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG](http://de.wikipedia.org)
 - 22 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3AHENRIK](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3AHenrik)
 - 23 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Ade%3Auser%3AHERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Ade%3Auser%3AHerbertweidner)
 - 24 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG](http://de.wikipedia.org)
 - 25 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3AWDWD](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3AWdwd)
 - 26 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3AMATTHIASDD](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3AMatthiasDD)
 - 27 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3AMATTHIASDD](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3AMatthiasDD)
 - 28 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Aes%3Auser%3A4LEX](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Aes%3Auser%3A4lex)
 - 29 [HTTP://ES.WIKIPEDIA.ORG](http://es.wikipedia.org)
 - 30 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Ade%3Auser%3AHERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Ade%3Auser%3AHerbertweidner)
 - 31 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG](http://de.wikipedia.org)
 - 32 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Ade%3Auser%3AHERBERTWEIDNER](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Ade%3Auser%3AHerbertweidner)
 - 33 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG](http://de.wikipedia.org)
 - 34 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/%3Ade%3Auser%3ARAINALD62](http://de.wikibooks.org/wiki/%3Ade%3Auser%3ARainald62)
 - 35 [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG](http://de.wikipedia.org)
 - 36 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3AMTODOROV%2069](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3AMtodorov%2069)
 - 37 [HTTP://DE.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/USER%3ABILLC](http://de.wikibooks.org/wiki/User%3ABillC)