

6.) Übertrager

6.1) Bauweisen von Übertragern

Die folgenden Bilder zeigen den grundsätzlichen Aufbau eines Transformators mit Eisenkern und verschiedene gebräuchliche Kernformen.

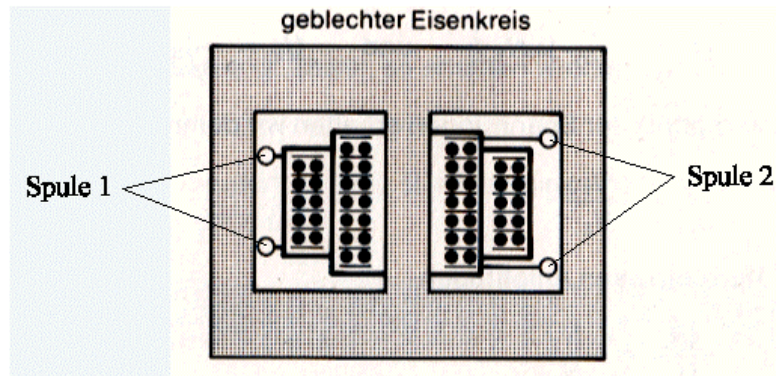


Bild 6.1 Beispiel zur Anordnung der Spulen im Transformator mit Eisenkreis (feste Kopplung)

Material		Anfangspermeabilität	Sättigungsinduktion	Frequenzbereich
A	Silizium-Eisen (Fe mit 3 ... 4 % Si)	500 ... 2000*)	1,5 ... 2 T	10 Hz ... 10 kHz
B	Nickel-Eisen (Fe mit 30 ... 50 % Ni)	2000 ... 10000**)	1,2 ... 1,5 T	10 Hz ... 50 kHz
C	Ferrit (Mn – Zn)	1000 ... 10000	0,4 T	1 kHz ... 1 MHz
D	Ferrit (Ni – Zn)	20 ... 200	0,2 T	1 MHz ... 100 MHz

Werkstoffe für Übertrager (Nanokristalline Materialien sind hier noch nicht berücksichtigt)

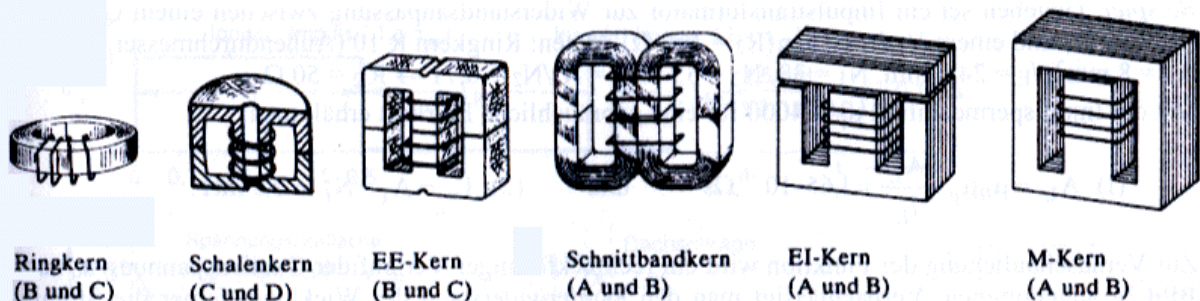


Bild 6.2 Bevorzugte Kernformen und Werkstoffe für Übertrager
 /aus Böhmer u.a., Elemente der angewandten Elektronik/

6.2) Der ideale verlustlose Übertrager

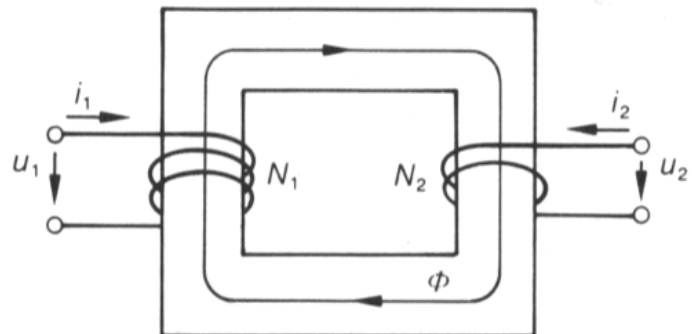


Bild 6.3 Zum Prinzip
 des idealen Transformators

Die Anschlüsse mit u_1, i_1 werden als „Primärseite“ bezeichnet und die Anschlüsse mit u_2, i_2 als „Sekundärseite“.

Der **ideale** Transformator hat folgende Eigenschaften:

- Der magnetische Widerstand des Eisenkerns ist immer $R_m = 0$. Daraus folgt weiter:
- es gibt keine Streuung des magnetischen Flusses Φ ,
- die beiden Wicklungen sind zu 100% magnetisch verkoppelt, Koppelfaktor $k = 1$
- die Eigeninduktivitäten der Wicklungen sind unendlich groß,
- die magnetische Flussdichte B kann beliebig hoch werden, es gibt keine nichtlinearen Effekte und keine Hysterese
- Außerdem haben die Wicklungen keinen elektrischen Widerstand.

Für die „Spannungsübersetzung“ erhält man damit

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u} \quad , \text{ gültig für jeden Augenblick} \quad (1)$$

und bei sinusförmigen Spannungen mit den komplexen Amplituden

$$\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u} \quad (2)$$

\ddot{u} heißt „Übersetzungsverhältnis“. Die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen.

Für die „Stromübersetzung“ erhält man - mit den Zählpfeilen nach Bild 4.3 -

$$-\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}} \quad , \text{ gültig für jeden Augenblick} \quad (3)$$

und bei sinusförmigen Strömen mit den komplexen Amplituden

$$-\frac{\hat{i}_1}{\hat{i}_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}} \quad (4)$$

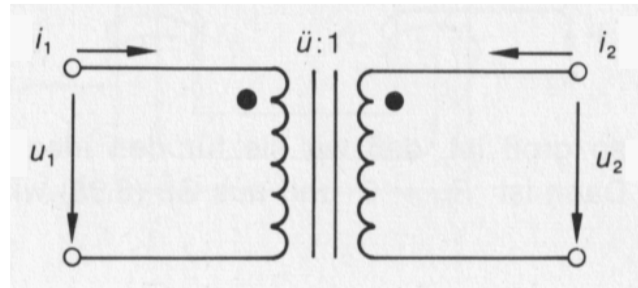
Die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen.

„Leistungsbilanz“

Da der ideale Transformator keine Verluste hat, wird die auf der Primärseite zugeführte Leistung vollständig an der Sekundärseite wieder abgegeben und zu keinem Zeitpunkt wird Energie gespeichert. In jedem Augenblick gilt

$$u_1 \cdot i_1 = - u_2 \cdot i_2 \quad \text{oder} \quad p_1(t) = - p_2(t) \quad (5)$$

Bild 6.4 Schaltsymbol für den idealen Transformator.



Der Doppelstrich zwischen den Wicklungen ist ein Symbol für die feste Kopplung. Die Punkte auf derselben Seite geben gleichen Wicklungssinn bezogen auf Bild 6.3 an. Die Versetzung eines Punktes von oben nach unten gibt einen entgegengesetzten Wicklungssinn an.

„Widerstandstransformation“

Der ideale Transformator transformiert Impedanzen mit dem Quadrat seines Übersetzungsverhältnisses

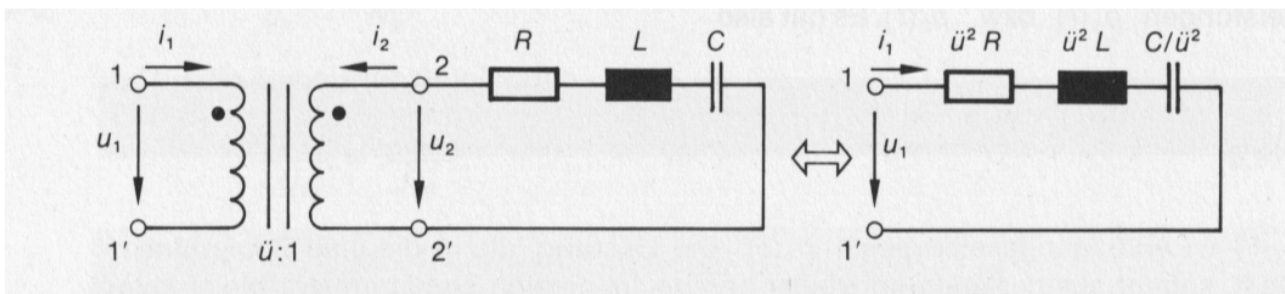


Bild 6.5 Zur Widerstandstransformation durch den idealen Transformator

In Bezug auf die Primärseite ist die angeschlossene Impedanz im rechten Bild genauso wie im linken. Eine an die Klemmen 1-1' angeschlossene Quelle wird durch die Schaltelemente auf der Sekundärseite so belastet, als ob der Widerstand R und die Induktivität L mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} vergrößert bzw. die Kapazität C mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} verkleinert direkt an 1-1' angeschlossen wären. Die primären Größen Spannung und Strom sind in beiden Darstellungen die gleichen. Diese Transformationseigenschaften werden in der Nachrichtentechnik u.a. verwendet, um eine Last an eine Quelle optimal anzupassen (Leistungsanpassung).

6.3) Der reale Übertrager

Für den wirklichen Transformator gibt es einige Abweichungen von dem Idealfall nach 6.2.

1.) Der magnetische Widerstand des Eisenkerns ist nicht beliebig klein. Darum sind die Eigeninduktivitäten und die Gegeninduktivität nicht unendlich groß, zwischen den Anschlussklemmen liegt also eine endliche Induktivität. Sie wird in den Ersatzschaltbildern durch die Hauptinduktivität L_{h1} parallel zum idealen Transformator dargestellt, siehe Bilder 6.7 und 6.8.

2.) Der magnetische Fluss Φ ist nicht in beiden Wicklungen genau derselbe, weil immer ein Teil aus dem Eisenkern austritt und als sog. Streufluss durch die Luft verläuft, siehe Bild 6.6. Der Streufluss, der von der linken Wicklung stammt, erreicht nicht die rechte Wicklung und umgekehrt. Dadurch wird die in der Gegenwicklung nutzbare induzierte Spannung geringer. Die geringste Streuung haben Ringkerne, siehe Bild 6.2.

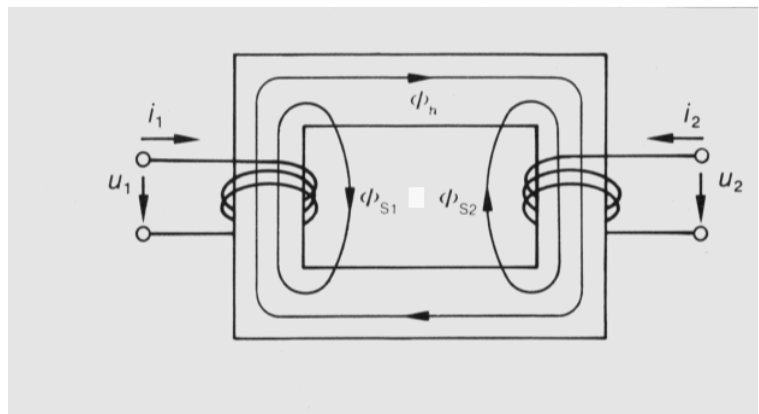


Bild 6.6 Realer Transformator mit Streufluss

In den Ersatzschaltbildern wird die Streuung durch die Verminderung der Hauptinduktivität L_{h1} und zusätzliche Streuinduktivitäten L_{S1} und L_{S2} dargestellt.

3.) Die Drähte der Wicklungen haben eine endliche Leitfähigkeit, so dass sich ein elektrischer Widerstand ergibt, in dem Verluste auftreten. Durch diese Verluste wird die nutzbare induzierte Spannung ebenfalls vermindert. Die Wicklungswiderstände werden in den Ersatzschaltbildern durch die Widerstände R_1 und R_2 dargestellt.

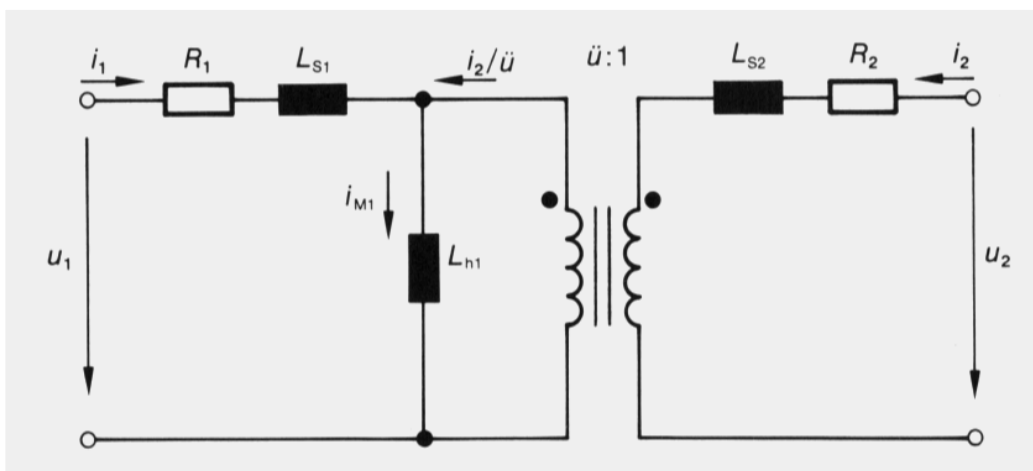


Bild 6.7 Ersatzschaltbild des realen Transformators mit Hauptinduktivität L_{h1} , Streuinduktivitäten L_{S1} und L_{S2} und Wicklungswiderständen R_1 und R_2

4.) Die Windungen der Transformatorspulen haben gegeneinander eine geringe Kapazität, die Wicklungskapazität C_W . Sie ist in Bild 6.8 durch die Kapazität parallel zur Hauptinduktivität L_{h1} dargestellt. Der kapazitive Leitwert wird mit steigender Frequenz größer. Daher leitet die Wicklungskapazität bei höheren Frequenzen immer mehr Strom ab, der dem Weg über den idealen Transformator (der allein für die Spannungsübertragung sorgt) verlorenggeht.

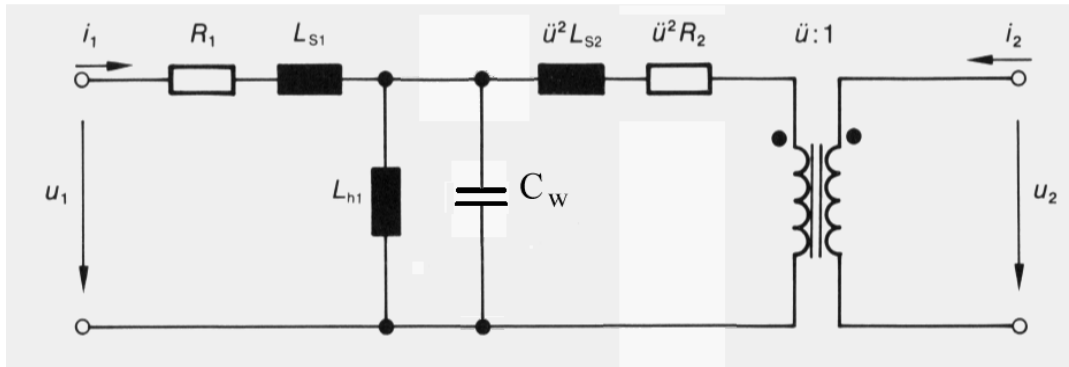


Bild 6.8 Ersatzschaltbild des realen Transformators mit zusätzlicher Wicklungskapazität C_W und auf die Primärseite transformierten Sekundärelementen L_{S2} und R_2

Das Ersatzschaltbild nach Bild 6.8 ist eine häufig verwendete Darstellung des realen Transformators; sie fasst alle Elemente auf der Primärseite des idealen Transformatorschaltelementes zusammen. Wenn man sich nur für die elektrischen Größen auf der Primärseite interessiert, können auch noch die weiteren an der Sekundärseite angeschlossenen Schaltelemente auf die Primärseite umgerechnet und der ideale Transformator aus dem Schaltbild weggelassen werden.

6.4 Betriebsverhalten eines Breitbandübertragers

Die Eigenschaften des realen Transformators, wie sie im vorangehenden Abschnitt dargestellt sind, haben zur Folge, dass ein Transformator nicht für die Übertragung von Signalen in einem beliebig großen Frequenzbereich geeignet sein kann. Man kann den Betriebsfrequenzbereich eines Übertragers in drei Abschnitte unterteilen:

1.) Bereich tiefer Frequenzen mit unterer Grenzfrequenz

Die Streuinduktivitäten verlieren gegenüber den Wicklungswiderständen und dem Lastwiderstand an Bedeutung, die Wicklungskapazität wird ebenfalls vernachlässigbar.

Der Leitwert der Hauptinduktivität nimmt mit fallender Frequenz zu. Dadurch wird immer mehr Strom an dem idealen Transformator und damit an dem (transformierten) Lastwiderstand vorbeigeleitet, die sekundäre Spannung u_2 an der Last nimmt ab; es ergibt sich ein typisches Hochpassverhalten. Die Hauptinduktivität begrenzt damit den Anwendungsbereich des Übertragers zu tiefen Frequenzen hin, sie bestimmt die untere Grenzfrequenz; eine niedrige untere Grenzfrequenz erfordert eine große Hauptinduktivität und damit gewöhnlich große Abmessungen.

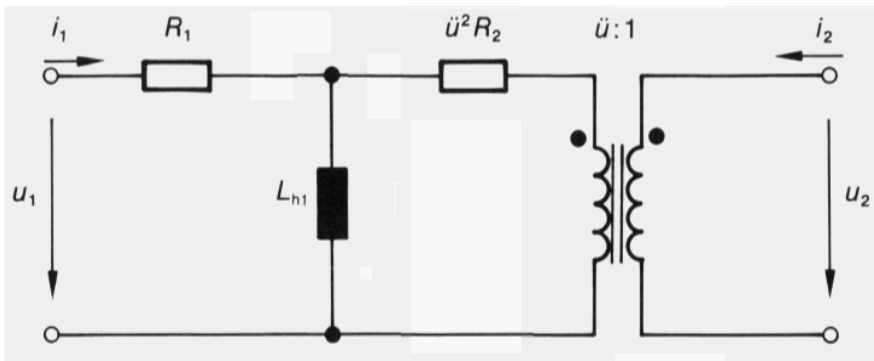


Bild 6.9 Ersatzschaltbild des realen Übertragers bei tiefen Frequenzen

2.) Bereich mittlerer Frequenzen - der eigentliche Arbeitsbereich

Der Frequenzbereich, in dem der Übertrager normalerweise angewendet werden soll, ist durch Bild 6.10 gekennzeichnet. Die Hauptinduktivität ist jetzt so groß, dass ihr Strom vernachlässigbar ist, sie ist daher in der Ersatzschaltung nicht mehr vertreten. Der Strom durch die Wicklungskapazität ist noch nicht hoch genug, so dass sie auch keine Rolle spielt.

Bei entsprechender Bauweise des Übertragers ist die Streuung gering genug, so dass sie die Spannung u_2 an der Last nur wenig vermindert. Ähnliches gilt für die Wicklungswiderstände, je nach ihrer Größe ergibt sich eine Spannungsteilung zwischen den Wicklungswiderständen und dem mit \ddot{u}^2 transformierten Lastwiderstand (auf der Primärseite des idealen Übertragers). Diese Spannungsteilung hat eine gleichbleibende Verminderung der Nutzspannung u_2 zur Folge, solange bis sich die Streuinduktivitäten und die Wicklungskapazität bemerkbar machen. Damit endet der eigentliche Arbeitsbereich des Übertragers.

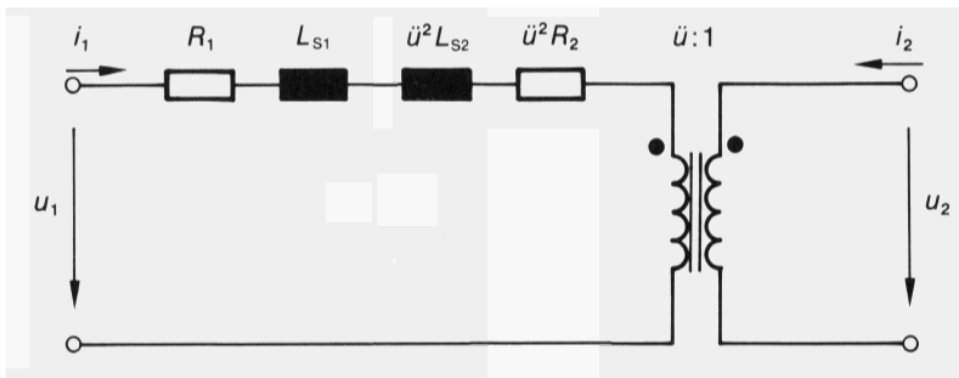


Bild 6.10 Ersatzschaltbild des realen Übertragers bei mittleren Frequenzen

Der Bereich hoher Frequenzen ist dadurch gekennzeichnet, dass die Streuinduktivitäten und die Wicklungskapazität das Verhalten bestimmen. Es ergibt sich schließlich nach Bild 6.11 ein Tiefpass 2. Ordnung.

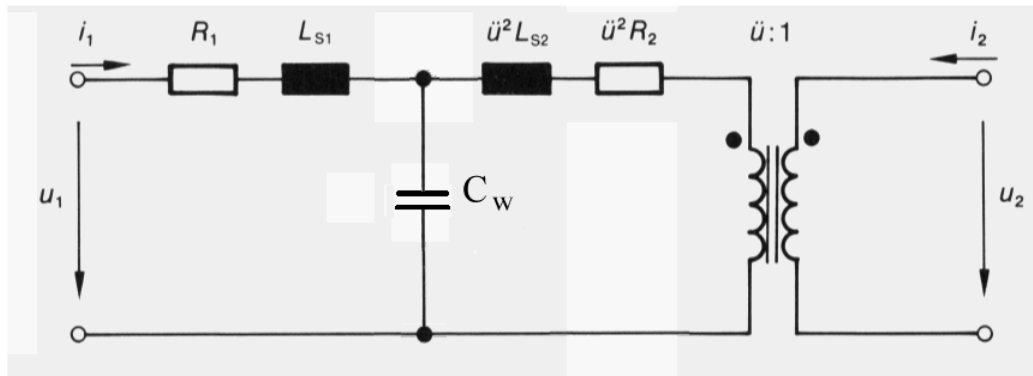


Bild 6.11 Ersatzschaltbild des realen Übertragers bei hohen Frequenzen

Je nach Größe der Streuinduktivitäten und der Wicklungskapazität kann noch vor Erreichen der oberen Grenzfrequenz eine Resonanzstelle durch die Hauptinduktivität und die Wicklungskapazität auftreten. Dadurch kann sich eine mehr oder weniger deutliche Erhöhung der Ausgangsspannung u_2 ergeben; die Erhöhung hängt von der Größe des Lastwiderstandes ab.

Eine hohe obere Grenzfrequenz erfordert niedrige Streuung und eine kleine Wicklungskapazität.

6.5) Übertrager mit Eisenkern

Weitere Eigenschaften des realen Transformators mit Eisenkern

Die oben in 6.1 bis 6.3 angegebene Beschreibung des Transformators gilt genau genommen nur für den Kleinsignalbetrieb, d.h. relativ kleine Ströme, Spannungen und magnetische Flüsse. Wird der magnetische Fluss zu groß, so macht sich das nichtlineare Verhalten des Eisenkerns bemerkbar: der magnetische Widerstand des Kerns ist nicht konstant, er nimmt bei Erreichen der Sättigung schnell zu.

Für die Ersatzschaltbilder bedeutet dies, dass die induktiven Schaltelemente in ihren Werten von der Größe der Ströme und Spannungen abhängen.

Für analoge Signale hat dieses nichtlineare Verhalten Verzerrungen zur Folge. Es entstehen Oberwellen, ein merklicher Klirrfaktor und evtl. unerwünschte Mischprodukte.

Ein zweiter Effekt, der von dem verwendeten Kernmaterial abhängt, ist die Hysterese. Darunter versteht man bei einem Transformator, dass die Magnetisierung (der magnetische Fluss Φ) dem Wicklungsstrom verzögert folgt, speziell nicht wieder verschwindet, wenn der Strom zu null geworden ist. Der Eisenkern kann damit dauerhaft magnetisch sein (sog. magnetisch hartes Material).

Dieser Effekt wird für die Speicherung von digitalen Informationen (Festplatte) und die Aufzeichnung von analogen Signalen (Tonband) genutzt. Bei der Übertragung von analogen Signalen und in der Energietechnik ist er unerwünscht.

Bild 6.12 Hystereseschleife $B=f(H)$
 eines Eisenkerns

N: Neukurve
 B_r : Remanenzinduktion
 H_r : Koerzitivfeldstärke

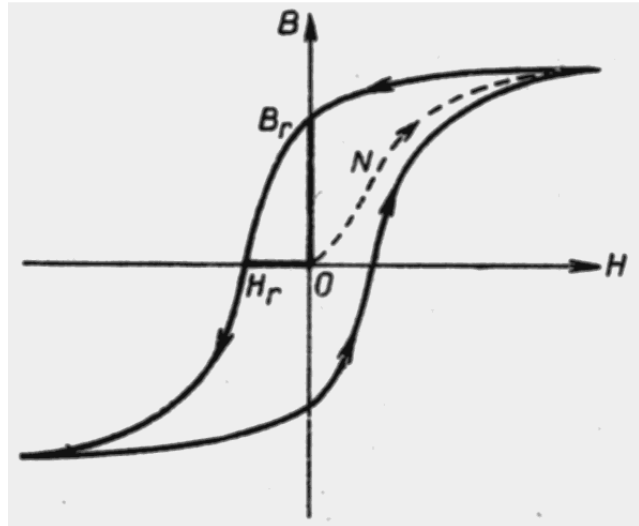
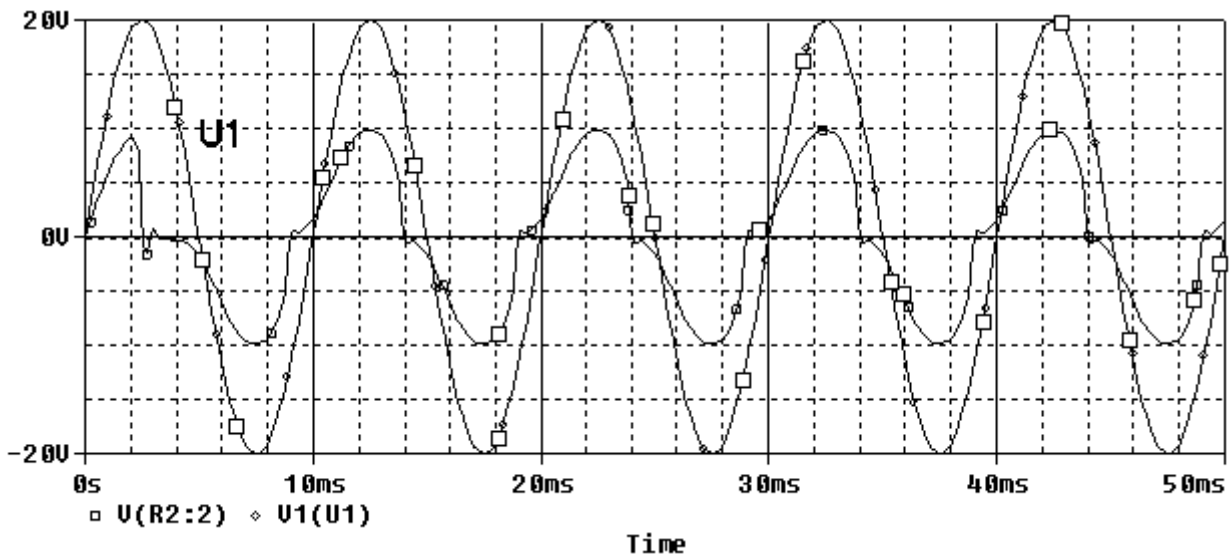
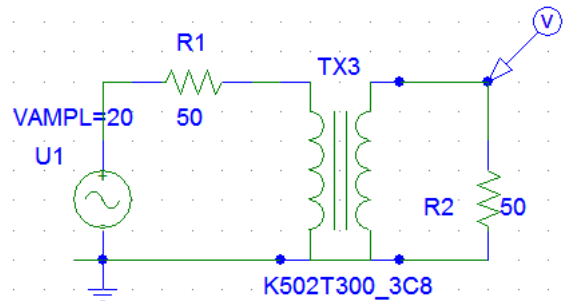


Bild 6.13

Verzerrung eines sinusförmigen Quellensignals
 durch einen Übertrager mit Eisenkern
 bei großer Signalamplitude $V1(U1)$



Einfluss der übertragenen Leistung

Wie in dem Punkt „Weitere Eigenschaften des realen Transformators mit Eisenkern“ angedeutet, wirkt sich ein großer magnetischer Fluss auf die Hauptinduktivität aus. Um die untere Grenzfrequenz zu halten und bei tiefen Frequenzen keine Verzerrungen aufkommen zu lassen, muss der Eisenquerschnitt umso größer sein, je größer die übertragene Leistung sein soll. Da der Übertrager durch seinen Eisenkern ein nichtlineares Bauelement wird, ist die maximale Leistung von Bedeutung für die Baugröße.