

**1.) Wie wird der Magnetfluss und wie das Magnetfeld im Eisenkern eines Transformators erzeugt?**

**2.) Wie entsteht die Selbstinduktionsspannung an der Primärspule?**

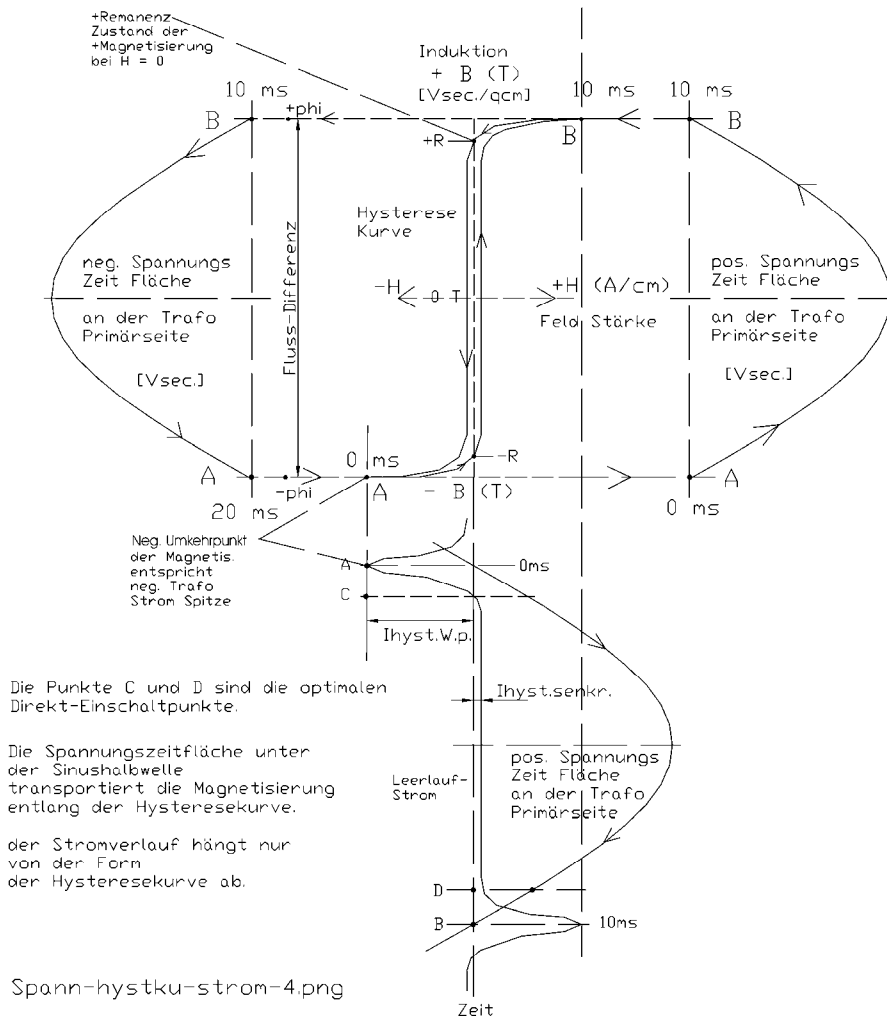
Zu 1.) Ist es die auf die Primär- Spule einwirkende Spannungszeitfläche oder der in die Spule eingespeiste Spulenstrom oder sind beide daran beteiligt?

Die Magnetisierung wird entlang der Hystereseurve durch die Spannungszeitflächen und dem Strom vorangetrieben. Das Magnetfeld wird dabei durch den Strom aufgebaut, der Magnetfluss durch die Spannungszeitflächen. Magnetfluss und Magnetfeld sind zweierlei Größen. Der Magnetfluss hat die Dimension [Vsec.] und ist der senkrechten Achse der Hystereseurve, mit der Flussdichte  $B$  zugeordnet. Das Magnetfeld hat die Dimension [A] und ist der waagerechten Achse der Hystereseurve als Feldstärke  $H$  mit der Dichte in A/cm zugeordnet.

Die Begriffe Magnetfluss und Magnetfeld sind also **nicht** dasselbe. Für das Magnetfeld wird auch der Begriff Magnetische Durchflutung oder Magnetische Spannung benutzt.

Es ist für die Bestimmung des Leerlaufstromes nur die Hystereseurve maßgebend. Sie zeigt, nach welcher Spannungszeitflächen Einwirkung welcher Strom fließt und umgekehrt.

# Zusammenhang von Spannung, Magnetisierung und Leerlaufstrom bei einem Ringkerntrafo



**Bild: Spann-hystku-strom-4.png**

Das obige Bild zeigt im unteren Teil, wie der Magnetisierungs-Strom mit konstanter Höhe verläuft, solange der Fluss im senkrechten Teil der Hysteresekurve bewegt wird. Am Ende der Hysteresekurve steigt der Strom steil an, weil das Eisen in eine Sättigung gerät. Die Messkurve wurde bei Überspannung aufgenommen, damit die Stromüberhöhung am Ende der Hysteresekurve und der Spannungshalbwelle deutlich wird. Der Scheitel der Stromüberhöhung liegt exakt im Spannungsnulldurchgang. Die in Leerbüchern zitierte Phasenverschiebung des Leerlaufstromes von 90 Grad entspricht damit nicht der Wahrheit, weil sich die Bestimmung der Phasenverschiebung an den Marken der Nulldurchgänge orientiert, der aber bei diesem schmalen Strompeak erst kurz vor dem Ende der Spannungshalbwelle und nicht wie üblich unter ihrem Scheitel liegt.

Diese Nulldurchgänge der Stromkurve liegen im waagerechten Stromverlauf gleich nach dem Spannungsnulldurchgang und damit bei 10-15 Grad. Wenn der Leerlaufstrom einen sinusförmigen Verlauf hätte, wie bei einer Spule mit Luftkern, wäre die Phasenverschiebung bei 90 Grad, egal ob sie auf die Nulldurchgänge oder die Scheitel bezogen würde. Richtet man sich nach dem größten Stromsichel so läge die Phasenverschiebung zur Spannung im Sichel bei 90 Grad. Der Ummagnetisierungsstrom enthält einen bedeutenden Wirkanteil, der vom Eisen durch die Ummagnetisierung verbraucht wird. Dieser Wirkanteil ist jedoch beim Ringkerntrafo sehr klein und beträgt ca. 0,3% vom Gesamt-Strom. Der Anteil des Stromes mit den Strompeaks wird wieder an das Stromnetz zurückgegeben, er ist ein echter Blindstrom.

Die Punkte C und D sind die idealen Direkteinschaltpunkte von der Maximalremanenz  $-R$  und  $+R$  aus.

Das variable Verhältnis von dem Magnetfluss zum Magnetfeld ist in der Hysteresekurve zu sehen. Im senkrechten Teil der Kurve, ist bei steigendem Magnetfluss das Magnetfeld konstant, obwohl der Magnetfluss, von der Spannungszeitfläche getrieben, zunimmt. Erst wenn sich der Arbeitspunkt auf dem sich zur waagerechten neigenden Ast der Hysteresekurve befindet, steigt der Strom entsprechend der Form der Hysteresekurve. Der Strom kann durch die Senkrechte Projektion auf die H- Achse und der Feldlinienlänge ermittelt werden.

Bei einem Ringkerntrafo ist die Hysteresekurve fast rechteckformig ausgebildet. Siehe Bild unten, TSEhyst1.

# Hysteresekurve

bei Ringkern-Trafos  
(Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz

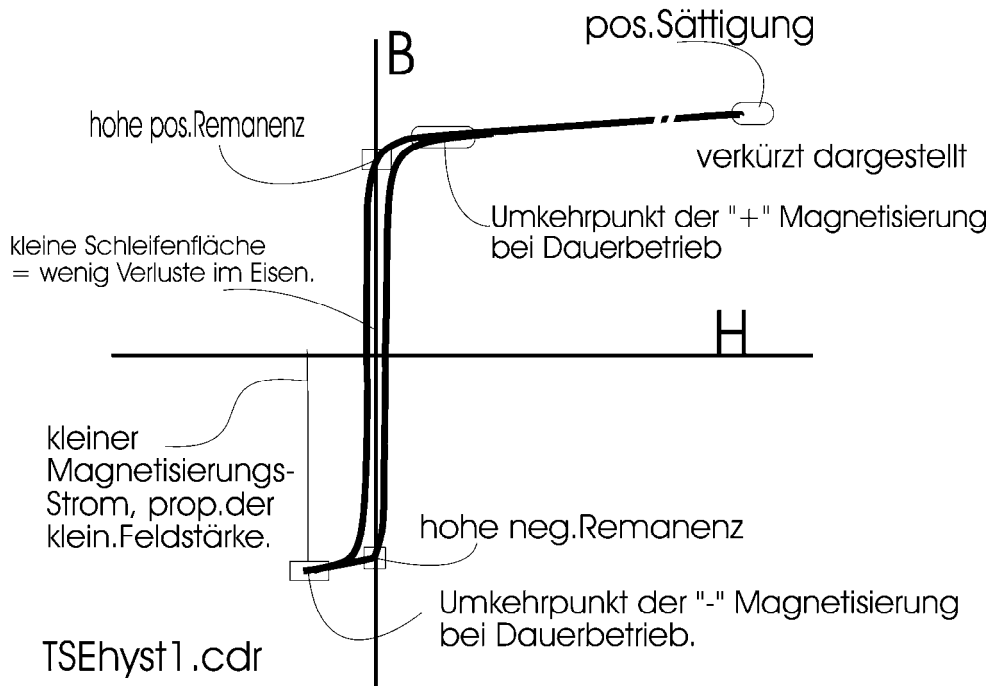
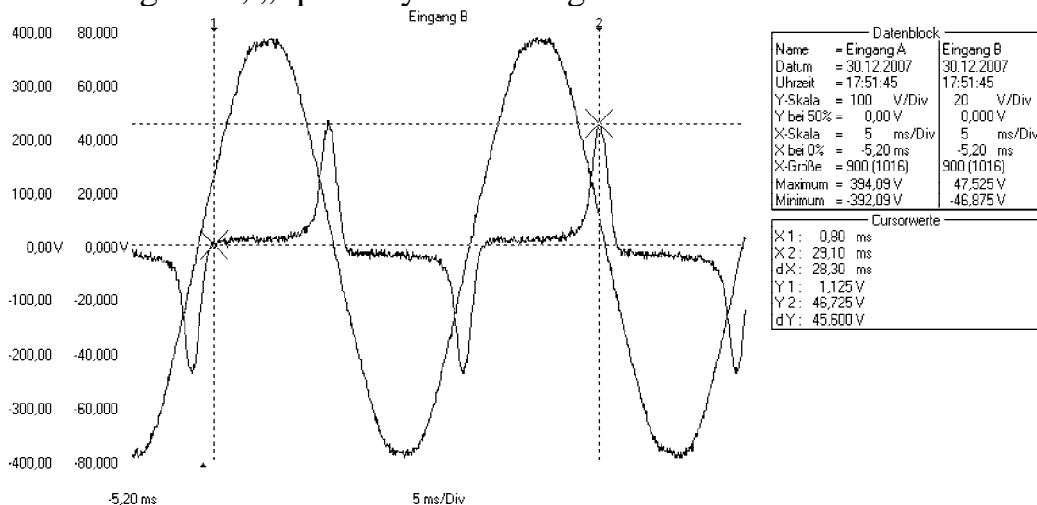


Bild: TSEhyst1.png

Der Zusammenhang von Induktion und Feldstärke ist sehr nichtlinear, wenn man den ganzen Durchlauf betrachtet. Im Vergleich mit Hysteresekurven von anderen Trafotypen ist die Breite im Senkrechten Teil der Kurve hier noch viel zu breit dargestellt, wie es auch der unten gemessene kleine und schmale Strompeak zeigt.

Bild: Trafo-grundlagen-35.bmp, als Beleg zu den Details in der Zeichnung oben, „Spann-hystku-2.dwg“



Trafo-grundlagen-35.bmp, 1kVA, 230V Ringkerntrafo, an 277Veff über 100  $\Omega$  hm Vorwiderstand als Strommesshant im Leerlauf. A= U netz, B=U an Rv.

Der Leerlaufstromsichel liegt im Spannungs-Nulldurchgang, und entsteht am Ende der Hysteresekurve, nachdem sie fast waagrecht verläuft. Der Sichel des Leerlaufstromes liegt genau an den Spitzen der Hysteresekurve. Der waagerechte Stromverlauf entspricht dem Flussanstieg innerhalb dem senkrechten Ast der Hysteresekurve, siehe oben, Bild: TSEhyst1.png|. Ein Lot durch das Ende des steilen negativen Stromanstiegs, (Kursorkreuz), schneidet die Spannungskurve im optimalen Direkt-Einschaltzeitpunkt von der negativen Maximal-Remanenz aus. (Die Spannungszeitfläche des entsprechenden pos. Spannungsabschnitts entspricht der optimalen Vormagnetisierungs-Spannungszeitfläche für das TSR-Einschaltverfahren. Siehe „Trafoschaltrelais“. Siehe unten, Bild: TSEme012.png)

In Spulen ohne Kern also nur mit Luft, siehe unten das Bild magnetisluft.png, herrscht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Magnetfluss und dem Magnetfeld, dort gibt es keine Hysteresekurve mit unterschiedlichen Wegen für den Hin und Rücklauf und keine Sättigungserscheinung oder Remanenz.

Magnetische Flußdichte in Luft über der Feldstärke aufgetragen.  $1\text{ T} = 800\text{ A/cm}$

magnetische Flußdichte, B, Vsec./qcm,  $1\text{ T} = 10\text{ exp.-5 VS/qcm}$

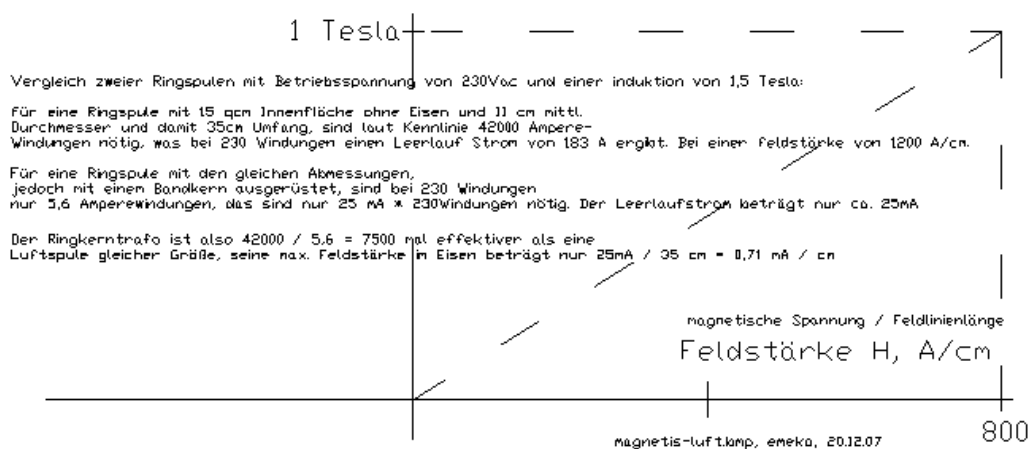


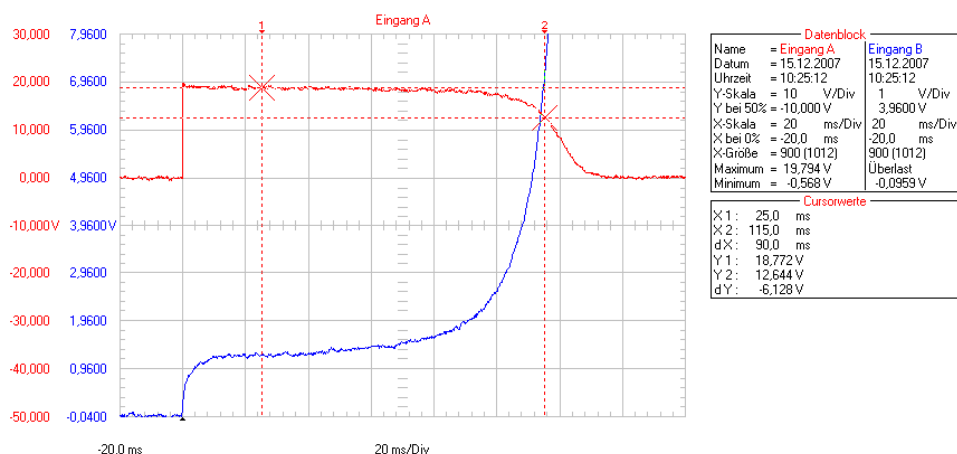
Bild: Magnetis-luft-1.png

Man ist beim Ringkerntrafo wegen dem geringen Magnetisierungsstrom geneigt zu vermuten, dass er fast ein idealer Trafo ist und dass für den Aufbau des Magnetflusses nur die Spannungszeitflächen ursächlich sind, ohne einen Strom zu benötigen und weil dieser Strom sehr gering und nahezu konstant ist während der Ummagnetisierungsphase. Diese Einschätzung ist jedoch nur eingeschränkt richtig. Auch der Ringkerntrafo braucht den Strom zum Aufbau der Feldstärke im Eisenkern, auch wenn es nur 24 mA eff. sind wie im Beispiel oben beschrieben ist. Um die technischen Vorgänge wie richtiges Einschalten, Vormagnetisieren, Sättigung, Überspannung, Unterfrequenz usw. zu erklären, erweist sich die

Spannungszeitflächen Theorie jedoch als sehr übersichtlich und einfach, wie auch die folgenden Messungen es belegen.  
 (--Im Bild: Trafo-grundlagen-35.bmp ist der waagrecht verlaufende Strom von ca.33 mA größer, weil wegen der höheren Netzspannung eine breitere Hysteresekurve durchlaufen wird.--)

### Messung mit Beaufschlagung einer Spannungszeitfläche.

Messung an einem 1kVA, 230V Ringkern Trafo, mit einem DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm an die vorher umgepolte Primärspule gelegt, also von der neg. Remanenz aus gemessen. Die Hysteresekurve wird fast voll durchfahren.

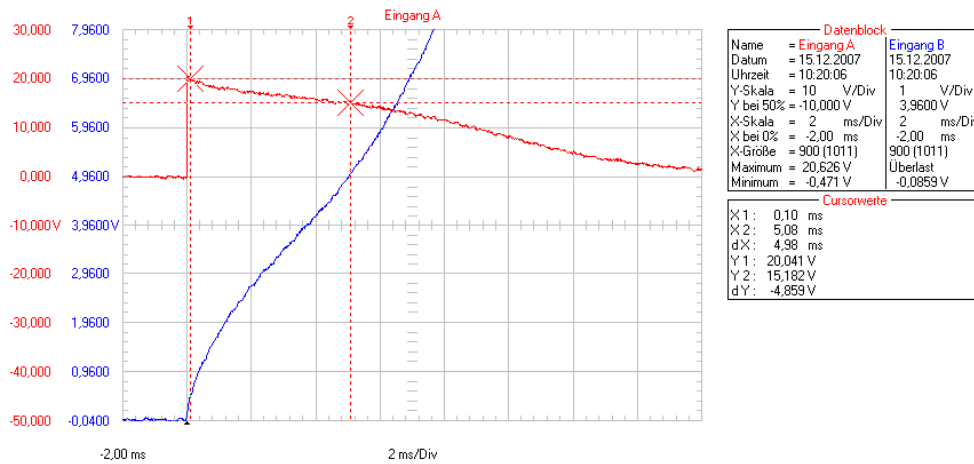


Trafo-grundlagen-17.bmp, Ringkerntrafo 1kva, von neg. Remanenz aus mit p os.kleinem Sprung. A=Utreib, B= U an Rv mit 100 Ohm, also 10mA/div

Bild: Trafo-grundlagen-17.png

Kanal A zeigt die Spannung an der Primärspule, Kanal B zeigt die Spannung am Vorwiderstand und damit den Strom in die Primärspule. Hier sieht man den Magnetisierungsstrom mit seiner langen waagerechten Phase von ca. 80 msc.. Nach 120 ms, was ca. 2,2 Vs. entspricht, ist der Nenn-Betriebs-Umkehrpunkt der Hysteresekurve , mit ca. 65 mA peak schon überfahren. Diese Spannungszeitfläche unter der roten Kurve von Kanal A drückt die Auslegung des Trafos auf Spannung und Frequenz, also die Spannungszeitfläche für eine 230 V Sinushalbwellen bei 50 Hz aus, die ungefähr einer Spannungszeitfläche von 2,1 Vs entspricht.

Messung an einem 1kVA, 230V Ringkern Trafo, mit einem DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm bei nicht umgepolter Primärspule, also von der pos. Remanenz aus gemessen.



Trafo-grundlagen-14.bmp, 1kva Ringkerntr, von pos.Remanenz aus mit pos k  
leinem Sprung. A=Utreib, B=Uan Rv mit 100ohm also 10mA/div

Bild: Trafo-grundlagen-14.png

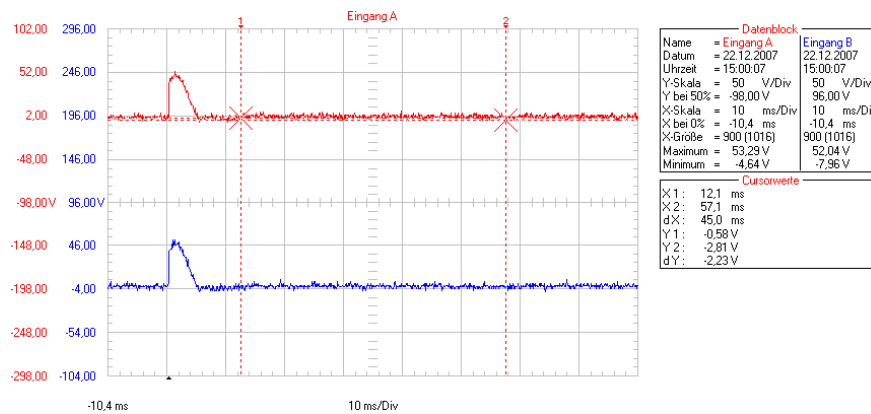
Achtung 10 mal kürzerer Zeitmaßstab als bei der Messung von der neg. Remanenz aus.

Kanal A zeigt die Spannung an der Primärspule, Kanal B zeigt die Spannung am Vorwiderstand und damit den Strom in die Primärspule.

Auch hier wird der kleine Magnetisierungsstrom als Spannung am 100 Ohm Vorwiderstand gemessen. Es fällt auf, dass hier sofort und relativ zum Umpolfall, siehe oben Bild 17, ein großer Strom fließt der sofort steigt und keine waagerechte Phase hat. (Zum aufmagnetisieren der letzten Weisschen Bezirke ist mehr Energie nötig als zum ummagnetisieren der Weisschen Bezirke die im senkrechten Teil der Hysteresekurve ummagnetisiert werden.) Die Messung zeigt auch, dass die Remanenz hoch ist und fast bei der Induktion für den Umkehrpunkt in der Hysteresekurve liegt.

**Im Gegensatz zu den bisherigen Messungen** wird ist bei der folgenden Messungen der gleiche Trafo nicht mehr mit Konstantspannung, sondern mit Konstantstrom beaufschlagt.

Messung an einem 1 kVA, 230 V Ringkern Trafo, bei nicht umgepolter Primärspule, also von der pos. Remanenz aus gemessen, mit pos. Konstantstrom von 12,4mA parallel zur Diode siehe Bild Trafo-grundl-1.png, eingespeist.



Trafo-grundlagen-32.png, 1kva Ringkerntr, 230V, mit  $I = \text{const} = +12,4\text{mA}$ , mit 80V Bürde von pos. Rem.Punkt aus, übr 100 Ohm am oberen Spuleneende gespeist.

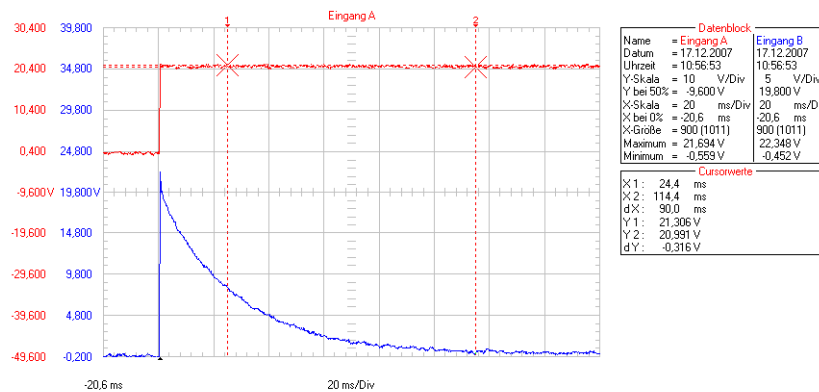
Bild: Trafo-grundlagen-32.png

Kanal A = U angelegt, Kanal B = U treib. An der zuerst großen Induktivität erzeugt der Strom einen hohen Spannungsabfall, der am Ende zu Null wird, weil die Induktivität sehr klein wurde, nachdem alle Weisschen Bezirke ummagnetisiert sind. Die Spannungszeitfläche unter U treib, Kanal B, ist mit  $0,15\text{Vsec.}$  genau so groß wie im Bild Trafo-grundlagen-14.

Es ist für den Aufbau der Induktion oder des Magnetfeldes also egal wie die Trafoprimärspule gespeist wird, mit Konstantspannung oder Konstantstrom um eine bestimmte Magnetisierung im Kern der Spule zu erreichen. Das Ergebnis ist das gleiche. Es entsteht bei Konstantspannungs-Speisung ein dazugehöriger Strom und bei Konstantstrom-Speisung eine dazugehörige Spannungszeitfläche, wobei bei beiden Verfahren die Mess-Werte gleich sind. Durch die Hysteresekurve sind Spannungszeitfläche und Strom zu jedem Zeitpunkt mit einander verknüpft. Da unser Stromnetz jedoch mit Konstantspannung betrieben wird, ist es sehr sinnvoll, bei der Erhöhung des Magnetflusses im Trafoeisenkern die Spannungszeitflächen als verursachende Größe zu benutzen. Auch ist es anschaulich und wie in der Elektrotechnik allgemein üblich, zuerst eine Spannung an eine Last zu legen und dann den sich einstellenden Strom zu messen, will sagen die Spannung ist die Ursache des Stromes, wie der Druck in der Wasserleitung die Wassermenge fließen lässt.

Messung an einem 1 kVA, 230V Trafo mit geschweißtem Kern, mit einem DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm an die vorher umgepolte Primärspule gelegt, bei umgepolter Primärspule, also von der negativen Remanenz aus gemessen.





Trafo-grundlagen-25.bmp, geschweißter 1kVA Trafo von neg. Rem. aus mit p os. 20V Sprung, sonst wie Bild 18

Bild: Trafo-grundlagen-25.png

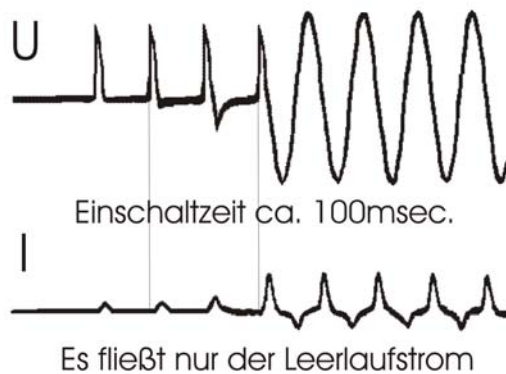
Kanal A zeigt die Spannung vor dem Vorwiderstand und Kanal B zeigt die Spannung direkt an der Primärspule. Es gibt bei der Spannung an der Primärspule überhaupt keine waagerechte Phase, weil durch die gescherte, unter 45 Grad Winkel liegende Hysteresekurve, sofort ein zunehmender Strom fließt, der die Spannung hinter dem Vorwiderstand sofort zusammenbrechen lässt.

Die Fläche unter Utreib im Bild 25 ist nur etwas größer als die Fläche unter Utreib, wenn von der positiven Remanenz aus gemessen wird, was darauf schließen lässt, dass der Unterschied zwischen positiver und negativer Remanenz gering ist, die Remanenzen also nahe null liegen. Die Ursache dafür ist ein großer Luftspalt im EI förmigen Eisenkern, was durch die Messungen hier beweisbar ist.

Da bei der Netzspannungs-Stromversorgung die Spannung und nicht der Strom eingepreßt ist, ist es richtig, die Spannungszeitflächen als die Verursachende Größe für den Magnetfluss anzusehen, was das Verständnis der Trafo Reaktionen auf Überspannung, Frequenzänderung, Spannungsaussetzer und das Einschalten erleichtert. Siehe unten das Bild TSEme012, welches die Wirkung von Spannungszeitflächen bei einem besonderen Sanfteinschaltverfahren zeigt.

Eine weitere Form der Beeinflussung durch Spannungszeitflächen wird zum Sanfteinschalten angewendet.

leerlaufender  
1kVA geschachtelter UI Trafo, mit  
TSR Verfahren eingeschaltet.



TSEme012.cdr

Bild: TSEme012.png

Die unipolaren Vormagnetisier-Spannungszeitflächen transportieren die Induktion mit jedem Spannungszeitflächen Stück, Schritt für Schritt in den oberen positiven Umkehrpunkt der Hystereseurve, worauf im Anschluss sofort voll eingeschaltet wird. Dass es nur der Leerlaufstrom ist der dann fließt, ist an seiner typischen Form erkennbar. Dieses Einschaltverfahren beweist ebenfalls die Wirkung der Spannungszeitflächen.

Was damit auch beweist: Da alle Transformatoren die zur Energieübertragung dienen, nur mit Konstantspannung betrieben werden, sind immer die Spannungszeitflächen die verursachende Größe, welche die Magnetisierung erhöht.

**Messaufbau zur Untersuchung der Reaktionen einer Spule mit und ohne Eisenkern, auf das Anlegen einer Gleichspannung. Bild 0.**

Messung der die Induktion treibenden Spannung,  $U_{\text{Treib}}$ , der Ohmschen Spannung,  $U_{\text{r}}$ , der Sekundärspannung  $U_{\text{sek}}$  und des Eingangsstromes, als Sprungantwort auf die angelegte Spannung  $U$  angelegt.

Die Selbstinduktionsspannung,  $U_{\text{i}}$ , welche für das Aufmagnetisieren zuständig sein soll, kann nicht gemessen werden.

Auffallend ist jedoch

Bei einem Trafo mit Kern sehen die Messkurven total anders aus als beim gleichen Trafo ohne Kern. Mit Kern läuft die  $U_{\text{Treib}}$  abhängig vom Startpunkt, längere Zeit annähernd waagrecht, bevor sie dann steil nach unten geht. Erklärung dazu: Solange die Magnetisierung noch nicht in Sättigung gelangt, ist die Kurve noch annähernd waagrecht.

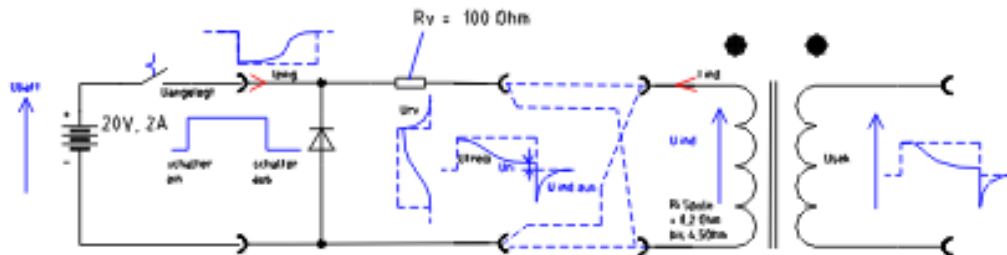
Es wurde der Kern umgepolt, und nicht umgepolt gemessen und damit von einer gegenpoligen und gleichpoligen Remanenz aus aufmagnetisiert.

Bei dem gleichen Trafo ohne Kern gibt es keine annähernd waagerechte Kurve für  $U_{\text{Treib}}$ . Die Spannung beginnt sofort zu fallen, weil die Magnetisierung keiner Hysteresekurve folgen muß, sondern vom Nullpunkt aus, fast linear ansteigt.

Außerdem ist die Kurve ca. 500 mal kürzer als beim Trafo mit Kern.

Die hier eingezeichneten Messkurven sehen im Detail anders aus als sie hier gezeichnet sind. Siehe separaten Text mit den zu den Trafos gehörigen Messkurven

- Trafos: 1) Geschachtelter EI-Trafo 230 V zu 230V, 1kVA.  
 2) Schnittbandkerntrafo, 230V, 0,7kVA.  
 3) Ringkerntrafo, 230V, 1kVA.  
 4) geschweißter Trafo, 230V, 1kVA



Ergebnis: Die  $U_{\text{Treib}}$  läuft synchron mit  $U$  angelegt, ist aber vermindert um  $U_{\text{r}}$ . Eine Selbstinduktionsspannung ist erst beim Ausschalten messbar.

Die Differenz von  $I_{\text{eing}}$  und  $I_{\text{ind}}$  ist der Magnetisierungsstrom.

Trafo-grundl-1.dwg, EMEKO Ing. Büro,  
 Freiburg den 17.12.87

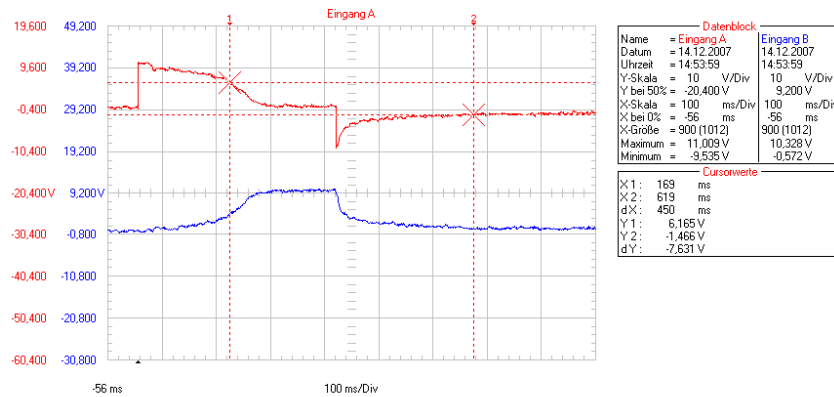
Bild: Trafo-grundl-1.png

Die im Schaltbild eingezeichnet Messkurven stammen von der Messung an einem 1kVA, 230V zu 230V geschachtelten EI Trafo, bei nicht umgepolter Primärspule, also immer von der pos. Remanenz aus gemessen.

Mit dieser Messanordnung wurden die oben gezeigten Bilder, Trafo-grundlagen-25.png, Trafo-grundlagen-14.png und Trafo-grundlagen-17.png, gemessen.

### Was der Eisenkern bewirkt:

Messung an einem 0,7kVA, 400V zu 230V Schnittbandkern Trafo, mit einem DC Spannungspuls von +10V über 56 Ohm, bei nicht umgepolter Primärspule, also von der pos. Remanenz aus gemessen.

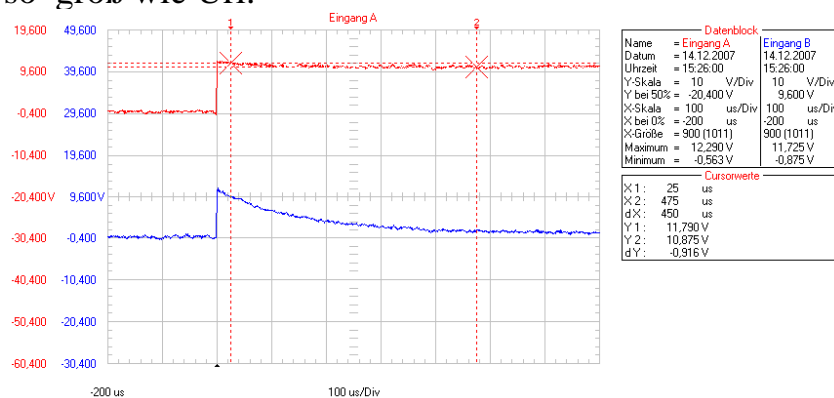


Trafo-grundl-6.bmp, wie 4 aber A=Utreib, B=Uri prop Iin

Bild: Trafo-grundl-6.png

Kanal B = Urv, nicht Uri. Mit 56 Ohm Vorwiderstand gemessen. Beim Wendepunkt der Spannungskurve, fließen ungefähr 100mA peak. Durch den Luftspalt im Schnittbandkern ist die Hysteresekurve geneigt und es verläuft deshalb der Strom am Anfang nur in einer kurzen waagerechten Phase.

Messung an einem 0,7kVA, 400V zu 230V Schnittbandkern Trafo, mit einem DC Spannungspuls von +10V über 56 Ohm, aber ohne Eisenkern gemessen. Die Utreib ist schon nach 500Mysec. Nur noch so groß wie Uri.



Trafo-grundl-7.bmp, schnittbandkern entfernt, nur an spulen gemessen, so nst wie Versuch 4-6, A=Uangelegt, B= Utreib, die Ind. ist viel geringer!

Bild: Trafo-grundl-7.png

Man beachte den gegenüber Bild 6 um Faktor 1000 kürzeren Zeitmaßstab von 100 Microsekunden pro Div. Beim Vorhandensein des Eisenkerns würde U treib zu erst waagerecht laufen um dann in einer langen, absteigenden E-Funktion abzuklingen, die dann in eine kurze auslaufende e Funktion übergeht, **was hier nicht der Fall ist**. Die Induktivität der Spule ist ohne Eisenkern ca. 1000 mal geringer als mit Eisenkern. Es gibt hier überhaupt keine waagerechte Phase der Utreib oder des I eing., weil kein Eisen ummagnetisiert werden muß. Die Spannungszeitfläche zum aufbauen des Magnetflusses ist hier auch um Faktor ca. 1000 mal kleiner.

### **Vorteile des Ringkerntrafos:**

Beim Ringkerntrafo ist im Bild: Trafo-grundlagen-17.png, sehr schön die waagerechte Phase des Stromverlaufs mit einem Anfangsstrom von ca. 12 mA zu sehen, während dessen der Senkrechte Teil der Hystereseurve durchlaufen wird. Bei **keinem** anderen Transformator ist das so deutlich ausgeprägt. Da dieser Trafo Kern kaum Streu- und andere Verluste hat, kann daraus geschlossen werden, dass die Induktivität während der Aufmagnetisierung innerhalb der maximalen Remanenzgrenzen nahezu konstant bleibt, weil der Strom sich während der Aufmagnetisierung nicht erhöht.

Dieser Strom steigt bei anderen Trafotypen, beim Aufmagnetisieren umso steiler, je mehr Verluste das Trafoeisen verursacht und ist umso größer im Anfangswert, je größer die Summe der Luftspalte im Kern ist.

Beim Schnittbandkerntrafo ohne eingelegtem Schnittbandkern dagegen, also den Spulen alleine ohne Kern, ist überhaupt keine Waagerechte Phase von  $U$  treib oder  $I$  eing zu sehen. Es fließt nach dem Angelegen von  $U$  angelegt sofort ein Strom in die Spule hinein der solange zunimmt bis er durch den  $R_v$  und das  $R_i$  vollkommen begrenzt wird. Beim Ringkerntrafo dagegen, ist der zu anfangs fließende Strom viel geringer und bleibt auch anfänglich auf einem niederen Wert mit einer waagerechten Phase, deren Dauer vom Weg in der Hystereseurve abhängt, also ob von neg. oder pos. Remanenz aus, der Sprung auf die Spule gegeben wird. Ein Anfangs- Strom ist aber auch hierbei sofort festzustellen. Die lange waagerechte Phase der  $U$  treib und des kleinen Eingangstromes beim Ringkerntrafo zeigt wie mit wenig Energie der Magnetfluß von neg. zu pos. Werten transportiert wird, was elektrisch gesehen eine hohen dynamischen Induktivität entspricht, was diesen Trafo so effektiv macht. Denn für die Übertragung der Energie ist der Leerlaufstrom überhaupt nicht maßgebend. Dieser ist nur die Folge der Induktion des Trafoeisenkernes und ein Sekundäreffekt. Der Magnetfluss sieht die Last nicht.

### **Welche Aufgabe hat das Eisen im Transformator?**

Eine einfache Erklärung über den Zweck und die Wirkung des Eisens in einem Netz- Transformator, (es gibt auch Luftspulen- Transformatoren ohne Eisen), ist die Tatsache, dass man durch das Eisen einen bis zu 10000 mal kleineren Magnetisierungsstrom braucht als es ohne Eisen der Fall wäre. Siehe Bild Trafo-grundl-1.png. Denn der Magnetisierungsstrom fließt auch dann in die Primärspule hinein, wenn gar keine Leistung auf der Trafosekundärseite abgenommen wird. Und wenn der Trafo dann eben durch den Einbau des Eisens viel kleiner sein kann, denn die Wärme des großen Luftspulen- Magnetisierungsstromes müsste ja abgeführt werden, was ein großes

Volumen mit großer Oberfläche erfordert, bringt der Eisenkern eben einen großen technischen Vorteil. Man ist deshalb bestrebt, immer bessere Eisen Kerne zu entwickeln, welche immer geringere Magnetisierungsströme benötigen. Der Ringkerntransformator ist ein gutes Beispiel dafür.

### **Trafoauslegung:**

Trafos werden bei der Berechnung so ausgelegt dass keine nennenswerte Sättigung im Eisen beim Nennbetrieb entsteht. (Das Eisen soll möglichst nur im linearen Teil der Hysteresekurve ummagnetisiert werden, damit keine großen Leerlaufströme fließen.) Die Spannung  $U_1$ , an der Primärspule, lässt sich mit folgender Formel berechnen.

$$U_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot A \cdot B_{\max}$$

$f$  = Frequenz,  $N$  = Windungszahl,  $A$  = Eisenquerschnittsfläche,  $B_{\max}$  = Max. Induktion (üblicherweise je nach Blech Material ca. 1 bis ca. 1,7 Tesla)

Werden ca. 1,7 Tesla überschritten, so wird die Magnetisierung nichtlinear, der Kern beginnt gesättigt zu sein, bei ca. 2,2 Tesla ist die volle Sättigung erreicht.

Man sieht in obiger Formel ebenfalls: Je größer die Eisenkernfläche die senkrecht zum Magnetfluss steht und je größer die Induktion ist, desto weniger Windungen sind für eine bestimmte Betriebs-Spannung nötig. Damit ein Trafo kostengünstig wird nutzt man die mögliche Induktion je nach Kern-Bauform, von 1,4 - 1,7 Tesla deshalb voll aus, weil man damit Eisen und indirekt, weil die Windungsumläufe kürzer und in der Anzahl weniger werden, auch Kupfer spart.

**Über die Leistung eines Trafos**, sagt die obige Formel jedoch noch nichts aus, weil der Strom darin nicht vorkommt. Hier muss man die mittlere Stromdichte von ca. 2-4 A pro qmm für den zu übertragenden Strom bei gegebener Wärmeabfuhr im Kupferlackdraht und der ganzen Spule berücksichtigen.

Je größer also der Strom und damit die zu übertragende Leistung sein soll, desto größer muß deshalb auch der Drahtquerschnitt sein, was bei den geforderten Windungen einer Spule, über die Amperewindungen, dann deren Größe bestimmt.

Beim Auslegen eines Trafos bewegt man sich also immer in den Grenzen zwischen der für die Leistung nötigen Spulengröße und für den Magnetfluß nötigen Kerngröße, auf dem die benötigten Spule unterzubringen ist.

**Wie groß ist die Spannungszeitfläche einer Sinushalbschwingung?**

Die Spannungszeitfläche einer 230V, 50Hz Sinushalbschwingung beträgt ca. 2,1 Vs. Man kann es als Integral unter der Sinusspannung ausrechnen oder man kann es auch aus dem Bild 14 und Bild 17 vom Ringkerntrafo herauslesen. Der Strom von 30mA peak entsteht in Bild 14 nach 2 millisec. wenn vom pos. Remanenzpunkt aus der +20V Sprung gegeben wird. Der Strom von 30ma peak entsteht in Bild 17 nach 108 millisec. Wenn vom neg. Remanenzpunkt aus der +20V Sprung gegeben wird. Das ergibt zusammen ca. 110msec. mal 20V = 2,20V sec. Mit einer Sinusschwingung die 2,20Vsec. für jede Halbwelle hat, wird eine Hysteresekurve durchlaufen, welche nicht oben und unten abgeflacht ist, bei diesem Ringkerntrafo, also fast im senkrechten Teil der Hysteresekurve verbleibt.

### **Zu 2.)Wie entsteht die Selbstinduktionsspannung an der Primärspule?**

Man kann natürlich nur mit der **Maschenregel** argumentieren und sagen, die Summe aller Spannungen ist gleich null in einem Stromkreis. Will sagen, die angelegte Spannung ist gleich der ohmschen Spannungsabfälle plus der Selbstinduktionsspannung. Was aber die Selbstinduktionsspannung einfach als vorhanden voraussetzt. Aber verstehen kann man die Selbstinduktion besser wenn man das weiter unten geschriebene mit dem Lenzschen Gesetz liest.

**Wie erklärt man am anschaulichsten, weshalb die Primärspule** eines Transformators mit Eisenkern im Leerlauf, bei Speisung mit einem eingepprägten Spannungsimpuls, am Pulsanfang nur wenig Strom aufnimmt, also hochohmig ist? Siehe Bild: Trafo-grundl-1.png. Oder anders gefragt, weshalb ist der Leerlaufstrom bei Transformatoren viel geringer als der Laststrom?

Ist die Selbstinduktion an der anfänglichen Hochohmigkeit der Primärspule schuld, die dann auftritt wenn man eine Spule an eine Spannung legt, sie sich also selber induziert? Wobei diese Selbstinduktions-Spannung dabei aber von außen nicht messbar ist! Es fällt dem Elektrotechnischen Praktiker schwer, sich vorzustellen, dass eine an eine Spule von außen angelegte Spannung, in dieser Spule gleichzeitig eine Spannung induziert, welche die gleiche Richtung wie die treibende Spannung hat, also zur treibenden Spannung eine Zwillingspannung darstellt die nicht von der treibenden Spannung zu unterscheiden ist.

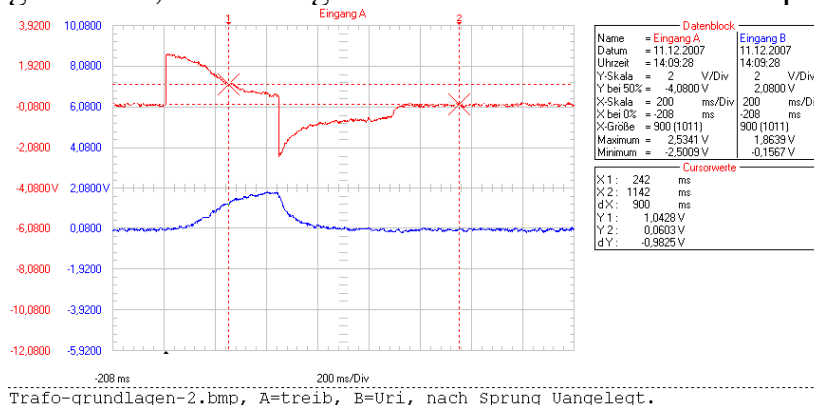
Wirkt also das Lenzsche Gesetz, das besagt, dass ein von der induzierten Spannung erzeugter Strom die durch die Spannungszeitflächen Beaufschlagung der Spule erfolgende Magnetfluss- Änderung zu verhindern sucht? Oder kürzer ausgedrückt: Der Induktionsstrom wirkt seiner Entstehungsursache entgegen, wirkt also dem Strom der von der treibenden Spannung

ausgeht entgegen.

### Detaillierte Erklärung der Selbstinduktion, die das Lenzsche Gesetz benutzt:

Die induzierte Spannung tritt im gleichen Moment auf wie die von außen angelegte induzierende Spannung. Wobei man diese Gegeninduktionsspannung, also die induzierte Spannung dabei jedoch nicht messen kann, da sie dieselbe Polarität und (fast) dieselbe Größe hat wie die treibende Spannung. (Sie muß aber etwas kleiner sein, sonst würde sich die Induktion, der Fluss, nicht ändern, siehe unten.) Die Gegen- oder Selbst-Induktionsspannung schickt jedoch einen Strom in Richtung der speisenden, angelegten Spannungsquelle, der dem Strom dieser Spannungsquelle entgegen steht, sich also von diesem subtrahiert, weshalb nur ein minimaler (Rest) Strom von der Spannungsquelle ausgehend übrig bleibt, eben der Leerlaufstrom, der zum Beispiel bei einem Ringkerntrafo nahezu konstant fließt solange sich die Induktion ändert, also der Kern noch nicht in Sättigung ist. Das Lenzsche Gesetz lautet auch: Der den Magnetfluß verursachende Strom will weiter fließen und will die Änderung des Magnetflusses verhindern. Das gilt in dieser Form auch für den Abschaltfall, siehe dort in Bild 2 erklärt. Beim Abschaltfall ändert sich die die Magnetisierungsrichtung und deshalb dreht sich dann die Spannung um.

Messung an einem 1kVA, 230V zu 230V geschachtelten EI Trafo, bei nicht umgepolter Primärspule, also immer von der pos. Remanenz aus gemessen, Ein- und gleich wieder ausschalten der Spule.



Kanal B zeigt die Spannung am Vorwiderstand  $R_v$ , nicht am echten  $R_i$ .

Nach dem Ausschalten der Angelegten Spannung tritt sofort die Selbstinduktionsspannung mit negativem Vorzeichen auf, durch die nun umgekehrte Richtung der Änderung des Magnetflusses, (Abbau und nicht Aufbau.) Wie in Bild 2 und Schaltplan Trafo-grundl-1 zu sehen ist, polt sich die Abschalt- Induktionsspannung um, was an der Utreib zu sehen ist. Der plus Spannungspfeil ist im Schaltbild Trafo-



grundl-1 nun unten, drückt damit weiter über die Diode und den Rv einen positiven Strom, im Kreis herum, am oberen Spulen Ende in die Spule hinein, weshalb sich der Spannungsabfall am Rv nicht umdreht oder sofort ändert, sondern sich nur mit einer abklingenden E-Funktion verkleinert. Hier ist das Lenzsche Gesetz klar erkennbar, was besagt, dass der vor dem Abschalten fließende Strom nach dem Abschalten (in der gleichen Richtung) weiter fließen will um der Magnetfluss Änderung entgegenzuwirken und sich die induzierte Spannung deshalb umdreht in der Richtung, damit sie diesen Strom treiben kann.

### **Eine Weitere Erklärung für die Hochohmigkeit der Kupferwicklung einer Trafoprimärspule während der Induktionsänderung:**

Ist der Ummagnetisierungsvorgang im Eisenkern daran schuld, dass die Primärspule, deren Kern noch nicht in Eisenkernsättigung ist, eine hohe Induktivität hat, weil die Weisschen Bezirke zuerst ausgerichtet werden müssen, wofür nur geringe Ströme zusammen mit den Spannungszeitflächen nötig sind, wie aus der Hysteresekurve ersichtlich ist?

### **Erklärung die mehr an der Wirkung orientiert ist:**

Unter Zuhilfenahme der Messungen der Ummagnetisierungsströme, abhängig von den Induzierenden Spannungszeitflächen, siehe die Messkurven unten und unter Beachtung der Hysteresekurven der verschiedenen Transformatortypen, kann man den momentanen, sich verändernden Induktiven Widerstand aus den Momentanwerten der Spannung und des Stromes ausrechnen und sich auch eine zweite Erklärung vorstellen. Man stellt dabei fest, dass sich die Induktivität während dem Durchlaufen der Hysteresekurve am Ende stark verändert, weil sich das  $\mu_r$  ändert. Im senkrechten Teil der Hysterese-Kurve ist die Induktivität groß, im fast waagrecht verlaufenden Teil ist sie gering. An dieser unterschiedlich großen Induktivität  $L$ , wird deshalb, beim Anlegen einer Spannung, ein unterschiedlich großer Strom fließen, beim Durchlaufen der Hysteresekurve.

Das Berechnen der Induktivität „ $L_{\text{groß}}$ “ mit der untenstehenden Formel führt weiter, weil diese die große Induktivität, entsprechend dem senkrechten Teil der Hysteresekurve beschreibt.

$L = N * N * \mu_0 * \mu_r * \text{Kernfläche} / 2 * \pi * \text{mittl. Kern Radius.}$   
 $N = \text{Anzahl der Windungen.}$

Das Berechnen der Induktivität „L<sub>klein</sub>“ mit der untenstehenden Formel führt weiter, weil diese die kleine Induktivität, entsprechend dem waagerechten Teil der Hystereseurve beschreibt.

$L = N * N * \mu_0 * \text{Kernfläche} / 2 * \pi * \text{mittl. Kern Radius.}$

N= Anzahl der Windungen. (  $\mu_r$  ist gleich 1 gesetzt worden wegen der Sättigung.)

Man sieht am hohen  $\mu_r$  von ca. 5000, dass die Induktivität L innerhalb des Magnetisierens im senkrechten Ast groß ist und im waagerechten Ast =1 also 5000 mal kleiner ist.

Ende, Korrigierte Version vom 09.02.08 emeko