

Den Transformator verstehen wie er funktioniert.

Schwierig zu verstehen ist die Wirkungsweise des Transformators wenn man es nur mit Berechnungs-Formeln versucht. Man kann sich damit nur schwer vorstellen wie der Trafo die Übertragung von Primär nach Sekundär erzeugt und wie er auf Netzanomalien oder beim Einschalten reagiert.

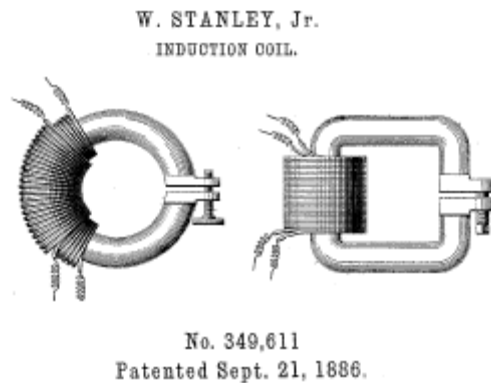
Berechnung dazu führen nur umständlich ans Ziel.

Die Wirkungsweise des Transformators ist viel leichter zu verstehen wenn man es mit anschaulichen Messungen versucht und dazu die Beeinflussung des Trafos mit Spannungszeitflächen verwendet.

Bild aus Wikipedia:

Der Transformator ist schon lange bekannt. Er wurde vor über 140 Jahren von Michael Faraday erfunden. Er benutzte dazu einen zerlegbaren Ringkern aus Weicheisen auf den er zwei elektrisch von einander getrennte Spulen übereinander wickelte. Haben beide Spulen die gleiche Windungszahl so zeigt die Zweite, die Sekundärspule, genau den Spannungsverlauf und Amplitude, der Spannung die an die Erste, die Primärspule angelegt wird. Das Eisen des Ringkernes diente dabei als Magnetflusskonzentrator. Siehe Bild unten, Quelle Wikipedia.

Bild 1.



Die Sekundärspule konnte dabei auch eine Last speisen, welche der Primärleistung entsprach. Ohne den Eisen-Ringkern als Koppler zwischen den Spulen war die Übertragung zwischen den beiden Spulen viel schwächer, es konnten mit den selben Spulen dann nur sehr kleine Spannungen übertragen werden und auch keine Lasten auf der Sekundärseite gespeist werden.

Die Fähigkeit des Transformators Spannungen zu transformieren, beruht auf der elektromagnetischen INDUKTION. Er ist heute in vielen kleinen und großen elektrischen Geräten und Anlagen unverzichtbar. Induktion bezeichnet die Fähigkeit mit Magnet- Feldern in Spulen eine elektrische Spannung zu erzeugen. Der Transformator ist genormt und in allen Größen und Ausführungen zu haben. Er wird zum Beispiel benötigt um Spannungen hoch oder runter zu transformieren, das heißt die Spannung an die Anforderungen an die Quelle oder die Last anzupassen. Seine Berechnung wird Fachleuten überlassen, weil es viele Parameter dabei zu beachten gibt.

Schüler und Studenten nehmen den Trafo im Physikunterricht und im Grundstudium durch und sollten verstehen wie er funktioniert. Studenten werden dabei mit umfangreichen Berechnungsformelwerken gefüttert, die oft nicht ganz verstanden werden können. Zum Beispiel dafür wird der Leerlaufstromverlauf oft falsch berechnet und dann in Diagrammen gezeichnet, anstatt wie er zum Beispiel bei einem Ringkerntrafo wirklich aussieht, siehe unten im **Bild 2**.

Anhand des Leerlaufstromverlaufes kann man von außen genau sehen was im Trafo gerade passiert, bzw. wo sich seine Magnetisierung auf der Magnetisierungskurve, (Hysteresekurve), im Verlauf über

die Zeit der angelegten Spannung, dem Spannungsverlauf, gerade befindet. Man kann quasi wie mit einer Lupe in den Trafo hinein blicken.

Der Leerlauf-Stromverlauf richtet sich nach dem zeitlichen Verlauf der an den Trafo angelegten Spannung, dem Trafo-Kernmaterial, der Kernbauform und weiteren Parametern.

Mit Formeln und Berechnungen kann man die Unterschiede im Leerlauf-Strom-Verhalten unterschiedlicher Trafos, wie EI-Kern, Schnittband-Kern, Ring-kern überhaupt nicht beschreiben. Denn mit Berechnungen werden manche Dinge, wie Leerlaufstromform, Blindstromform, Einschaltverhalten, Reaktion auf Spannungslücken, nicht wirklichkeitsgetreu erfasst.

Wie man einen zur Anforderung passenden Trafo konstruiert:

Die Windungszahl N für die Primärwicklung wird für eine sinusförmige Spannung und einen Kern ohne Luftspalt mit gleichmäßigem Querschnitt und geschlossenem Kern, folgendermaßen berechnet:

$$N = U * Myr / 4,44 * f * Ae * Bmax..$$

U in Volt peak, Myr in 5-50 Tausend, f in Hz, Ae in qcm für die Kernfläche, $Bmax.$ in Tesla.
 $1 \text{ Tesla} = 1 * 10^4 \text{ Vsec.} / 1 \text{ qcm.}$

$$N = B * l / My0 * Myr * I * N.$$

l = mittlere Länge des Magnetfeldlinien Weges im Eisen. I der Magnetisierungs-Strom $Imag.$

Die Spannungszeitfläche ist bekannt. Der Magnetisierungsstrom $Imag$ ist aber zunächst unbekannt. Auch ist das tatsächliche Myr , was für die Magnetische Leitfähigkeit des Trafokernes steht, ist meist nicht genau bekannt, denn es hängt nicht nur vom Kernmaterial sondern auch von der Kernlegetechnik und der kernbauform ab. Auch nimmt das Myr bei höherer Magnetisierung des Kernes sehr stark ab. (Deshalb ist die Hysteresekurve oben und unten abgeflacht.)

Auch die Trafo Leistung ist mit den obigen Formeln noch nicht zu berechnen.

Man muss dann also die Größe eines Trafos nach einer Tabelle aussuchen, in der die Kerngröße zur Trafo Leistung abzulesen ist und einen ersten Trafo mit einem bestimmten Kernmaterial und einer gewählten Kern-Form probeweise bauen.

Für das Wickelfenster des Spulenkörpers muss man die mögliche Windungszahl in Abhängigkeit des Drahtquerschnitts aller Wicklungen berechnen, was wiederum die Trafogröße beeinflusst.

Für diesen ersten Versuchstrafo kann man nun die weiteren Parameter wie Leerlaufstrom und auch den Wirkungsgrad heraus messen, weil sie wie gesagt von vorn herein nicht genau bestimmbar sind.

Man kann auch ein Trafo Berechnungsprogramm zu Hilfe nehmen. Diese Programme sagen aber auch nichts Genaues über den Leerlaufstromverlauf über eine Netzperiode und das Einschaltverhalten aus.

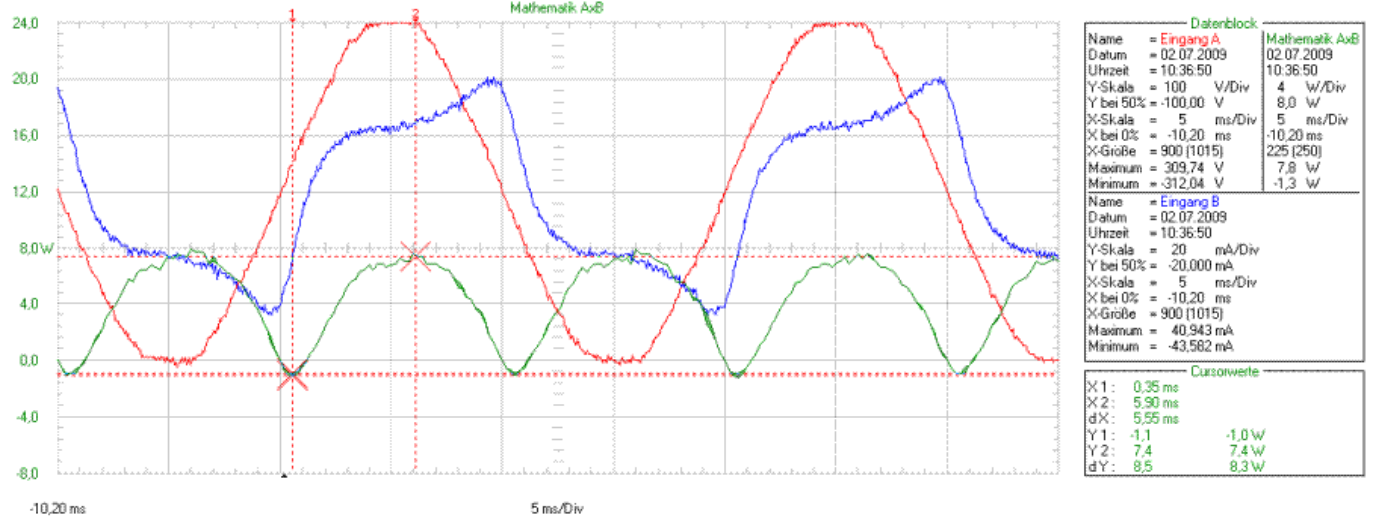
Zur Bestimmung des Leerlauf-Stromverlaufs, der die Magnetisierung abbildet, ist der folgende Messaufbau dafür ganz einfach vorzunehmen.

Der Ausgang einer Spannungsquelle, üblicherweise die 230V Netzspannung, wird dabei an die Primärwicklung des Versuchstrafos gelegt und auf Kanal 1 von einem Zweistrahl Oszilloskop, dann im zeitlichen Verlauf angezeigt. Auf Kanal 2 wird der Primärstrom gemessen, der entweder potentialfrei mit einer Stromzange oder einem niederohmigen Strommess-Shunt in Reihe zu einem Anschluss der Primärspule gemessen wird. Zweckmäßigerweise liegt der Shunt im Null, Mp , Anschluss der Primärspule.

Ein Zweistrahl Oscilloscop bildet die Verläufe beider Kanäle zeitgleich zueinander ab, wenn im Dauerbetrieb gemessen wird.

Mit den im **Bild 2** zu sehenden Messkurven wird das Leerlaufstrom-Verhalten eines Ringkern Trafos und weiter unten von unterschiedlicher Trafo-Bauarten genau abgebildet.

Bild 2, Hier die Grafik der Netz **Spannungs-(rot)** und Leerlauf **Strommessung-(blau)** an einem 1kVA Ringkerntrafo im Leerlauf. Die **grüne Kurve** zeigt die **Magnetisierungsleistung**, die aus der **Multiplikation von Spannung und Strom vom Oscilloscop berechnet und angezeigt wird**. Die Fläche unter der grünen Kurve entspricht der Magnetisierungsarbeit.

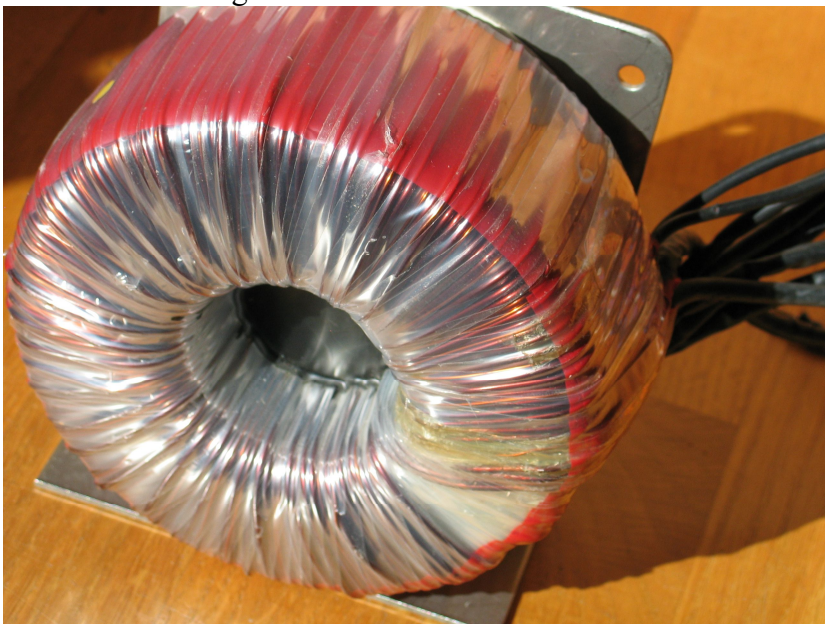


Trafomess-1kvaKTR-Leerl-4.bmp, 221Veff,; 26,6mAeff, wie 1

Der unbelastete 1kVA Ringkerntrafo, ohne störenden Luftspalt im Kern, zeigt mit seiner Stromantwort am besten was im zeitlichen Verlauf der Netzspannung im Eisenkern passiert.

Man beachte den sehr geringen Leerlaufstrom, **blaue Kurve**, von nur ca. 40mA Peak, was bei einem 1kVA Trafo sehr wenig ist, im Vergleich zu einem 1 kVA Trafo mit einem eckigen Kern, der immer Restluftspalte beinhaltet und einen bis zu 10 Mal größeren Leerlaufstrom hat.

Bild 3: 1kVA Ringkerntrafo.



Man beachte auch vor Allem den entgegen der Lehrmeinung gar nicht sinusförmigen Verlauf und die Phasenlage des Stromes, der während dem Ummagnetisieren fast in Phase zur Primärspannung liegt und entgegen der Lehrmeinung nicht um 90 Grad zur Spannung Phasen verschoben ist.

Die grüne Kurve, die Ummagnetisierungs-Wirkleistung, $U \cdot I_{\text{mag}}$, wurde vom Oszilloskop selbst berechnet und angezeigt.

Es existiert wie schon oben gesagt eine einfache Betrachtungsweise der Vorgänge im Transformator, die sich der **Spannungszeitflächen** bedient. Diese bestehen durch die angelegte Spannung die eine bestimmte Zeit auf den Trafo einwirkt. Im Bild oben entspricht sie der Fläche unter der roten Spannungskurve.

Die einfache Formel für die induzierte Spannung lautet: $U_{\text{ind}} = dB \cdot A / dt$. (je schneller sich das B ändert und je größer die Kernfläche ist, desto höher ist die induzierte Spannung.)

Mit der Spannungszeitfläche zusammen mit der Form der Hysteresekurve, die in Datenblättern vom Kern zu sehen ist, kommt man nur mit wenigen Formeln aus und versteht auf der anderen Seite die Formelwerke zur Berechnung von Transformatoren besser.

Wenn man nun beachtet, dass jede Spannungshalbwelle der Netzperiode das Trafoeisen komplett ummagnetisiert, und zwar von einem Umkehrpunkt zum anderen auf der Hysteresekurve, dann hat man das Wirkprinzip des Trafos, die permanente Induktions- Änderung, die durch die Einwirkung der Spannungszeitflächen entsteht, schon verstanden.

Ohne die Spannungszeitflächen-Einwirkung verändert sich die Induktion im Kern nicht.

Das klingt revolutionär ist es aber nicht, da schon Michael Faraday bei der Untersuchung der elektromagnetischen Induktion die Spannungszeitflächen als Spannungsstoß beschrieben hat. Diese Betrachtungsweise geriet scheinbar in Vergessenheit.

Weshalb wird diese einfache Betrachtungsweise nur selten angewendet? An Hochschulen bedient man sich lieber der Berechnung von zum Beispiel Induktiven Widerständen von Spulen, wozu auch Transformatoren gehören, mit Hilfe der komplexen Rechnung, wobei Ströme um 90 Grad zur Spannung verschoben sein müssen.

Dabei wird aber die Nichtlinearität der Magnetisierung bei der Ummagnetisierung des Trafokerns und damit die Nichtlinearität des induktiven Widerstandes des Trafos, der sich während jeder Netzspannungshalbwelle entlang der Hysteresekurve verändert, völlig außer Acht gelassen.

Ist das vielleicht der Grund weshalb der Autor 120 Jahre nach der Erfindung des Trafos, den ersten physikalisch richtig funktionierenden Trafosanfeinschalter, der den Einschaltstrom nicht nur begrenzt, sondern ganz vermeidet, erfunden und inzwischen erfolgreich vermarktet hat?

Es wird bisher in der Lehre, wie schon oben ausgeführt, der Magnetisierungsstrom als ein reiner sinusförmiger Blindstrom angenommen, der angeblich der Spannung immer um eine Halbe Halb-Periodendauer, 90 Grad, bei 50 Hz dann 5 Msec. nacheilt.

Der große Blindstrom, den man bei Motoren messen kann, rührt von dem Magnetfeldaufbau im Luftspalt her, den Motoren konstruktionsbedingt immer haben, weil der Anker zum Stator ja einen Abstand braucht damit er sich im Stator drehen kann. Bei Trafos kommen Luftspalte jedoch in viel geringerem Umfang bis gar nicht vor und ist eigentlich unerwünscht, aber nicht immer vermeidbar.

Bei Übersteuerung der Magnetisierung des Trafoeisens gerät dieses in Sättigung, was sich dann so äußert, als wenn der Trafo nun dynamische, nur zeitweise auftretende, Aussteuerungs-abhängige Luftspalte besitzt.

Der positive Ummagnetisierungsstrom im **Bild 2** beginnt beim Trafo kurz nach dem Nulldurchgang der Spannung in Richtung Positiver Beträge und beschreibt zusammen mit der Spannung und der Zeit die Ummagnetisierungsarbeit im Eisenkern. Siehe die grüne Kurve im Bild 2.

Beim Motor hat der Blindstrom seinen Scheitel jedoch erst gegen Ende einer Spannungshalbwelle und trägt zur mechanischen Arbeit des Motors wenig bei, weshalb er zu Recht Blindstrom heißt. Nur mit dem um 90 Grad zur Spannung Phasen verschobenen Blindstrom kann man sehr gut mit komplexen Zahlen rechnen.

Dabei werden, bei Trafos und bei Motoren dann die kleineren Ummagnetisierungsströme für den Eisenkern, die immer fast in Phase zur Spannung liegen und die größeren, echten Blindströme, die durch die unvermeidlichen oder absichtlich eingebauten Luftspalte entstehen, **nicht von einander getrennt betrachtet**, sondern in einen Topf geworfen und eben vereinfachend in der Summe als Blindstrom bezeichnet, weil man so einfacher damit den Trafo berechnen kann. Die Berechnung liegt damit aber immer neben dem Optimum und ist dem Verständnis des Trafos abträglich .

Wir haben das lernen müssen, als wir an einem Fraunhofer Institut der Ursache der Trafo Einschaltstromstöße finden wollten, die besonders bei Ringkerntrafos manchmal aber nicht immer auftreten, was uns zu Anfang sehr wunderte.

Der Verfasser dieses Artikels hat selber viele Jahre seines Berufslebens **ohne die einfache Betrachtungsweise des Transformators mittels den Spannungszeitflächen** auskommen müssen, obwohl im Nachhinein betrachtet, es viele Ansatzpunkte gegeben hätte, womit seine Aufgaben schneller erledigt worden wären. Sei es bei der Berechnung von Elektromagneten und deren Ansteuerung oder von Netzteilen und Treiberstufen für Schrittmotore.

Durch intensive Untersuchungen an Transformatoren im Rahmen einer Entwicklung eines Trafo- Sanft-Einschalters, an einem Fraunhofer Institut, stieß der Autor 1989 auf die sogenannten **Spannungszeitflächen, hat sie quasi neu entdeckt und hat erkannt, dass die Vorgänge im Transformator damit viel einfacher als bisher beschrieben werden können, will man zum Beispiel den Einschaltfall oder das Trafoverhalten bei Netzanomalien oder bei der Speisung mit Phasenanschnitt-Spannungen, genau verstehen.**

Einige Jahre später hatte der Autor das Bedürfnis diese Sichtweise einem breiten Technik- Publikum mitzuteilen und beteiligte sich deshalb seit 2012 als Technik Autor im Wikipedia. Aber kaum, dass er erste Ergänzungen im Artikel zum Transformator ausgeführt hatte, hob ein Sturm der Entrüstung an unter den verschiedenen Mitautoren.

Die meisten Gegner der Betrachtungsweise mittels Spannungszeitflächen wollen nach wie vor die physikalischen Wirkungen im Transformator allein mittels der Wirkung des Stromes erklären, der mit dem Aufbau des Magnetfeldes im Inneren des Trafoeisenskernes einhergeht.

Viele Diskussionsteilnehmer, oft promovierte Physiker, hatten völlig andere Vorstellungen darüber was im Trafo passiert und löschten die Änderungen des Autors immer wieder im Transformator Artikel des Wikipedia. Sie beriefen sich dabei immer auf die Lehrbücher in denen nichts von der Wirkung der Spannungs-Zeitflächen stand.

Im Verständnis der Funktionweise des Trafos ergeben sich wie gesagt große Vorteile das *Pferd* der Induktionsdichte B im Transformator nicht von hinten, über den Strom, sondern von vorne über die Spannungszeitfläche aufzuzäumen.

Die Induktionsformel lautet: $U_{\text{ind}} = d\Phi / dt$, $U_{\text{ind}} = dB * A / dt$.

B ist die Induktionsdichte in Vsec / qcm; A ist die Eisenkernfläche in qcm und t ist die Zeit der Spannungseinwirkung in sec.

Die Spannungstransformation läuft also ausschließlich über die Veränderung des B, Induktionsdichte oder Flussdichte genannt, von der Primär zu der Sekundärspule.

Der Magnetisierungsstrom ist dabei nur indirekt beteiligt. Er fließt nur in der Primärspule.

Auch bei der Übertragung von elektrischer Leistung im Trafo ist der Magnetisierungsstrom nicht beteiligt, denn die Leistung fließt nicht über den Trafo-Kern, sondern die induktiv verkoppelten Spulen.

In Umformung der einfachen Induktions-Formel entsteht das sich verändernde B durch das Anlegen der Spannung mal deren Einwirkungszeit pro Kernfläche: $B = U * t / A$.

Solange sich das B im linearen Teil der Hysteresekurve bewegt, (beim Ringkerntrafo im senkrechten Ast,) bleibt der Magnetisierungsstrom quasi konstant. Das ist erklärbar und nachmessbar, weil der Strom proportional zur Feldstärke H ist. Und wenn bei einer senkrechten Hysteresekurve das H konstant ist, bleibt auch der Strom konstant. Er ist dann auch überhaupt nicht sinusförmig.

Wird die Magnetisierung durch Übersteuerung des Trafos in Richtung des Waagerechten Astes der Hysteresekurve bewegt, so ändert sich das B kaum noch, auch wenn die Spannungszeitfläche weiter zunimmt.

Der Strom nimmt jedoch ab diesem Zeitpunkt dabei stark zu. Was klar ist, weil das Magnetfeld dann auch ohne den Anstieg des B zunimmt. Also besteht hier eine starke Nichtlinearität der Induktion. Der Magnetisierungsstrom ändert sich dann aber plötzlich sehr stark und nimmt dann auch nichtlinear zu. Solche Übersteuerungen geschehen durch verschiedene Ereignisse: Periodisch durch eine zu niedere Frequenz oder durch eine zu hohe Spannung oder durch falsche Trafodimensionierung.

Auch beim einschalten des Trafos zu einem ungünstigen Zeitpunkt wird das Trafoeisen stark in die Sättigung getrieben. Er antwortet dann mit einem hohen Einschaltstrom, der nur noch durch den Widerstand der Primärwicklung und den Innenwiderstand der Netzspannungsquelle begrenzt wird.

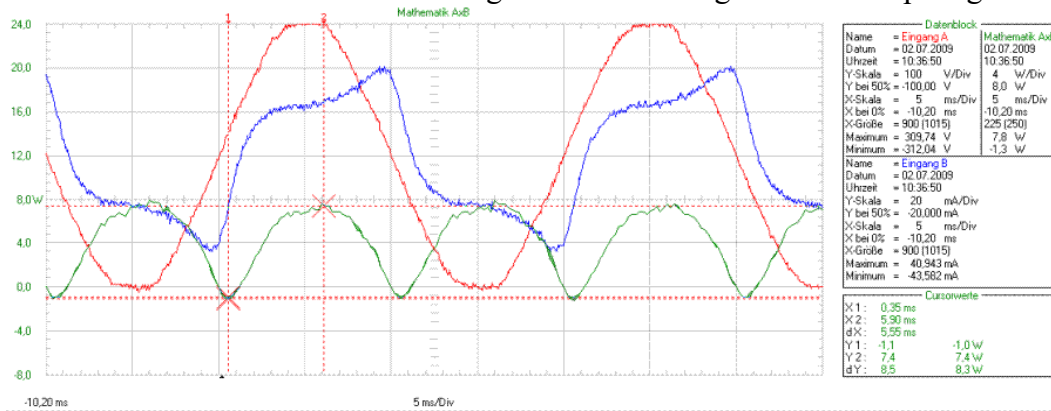
Warum Spannungszeitflächen:

Der Strom, mit der Dimension Ampere, kommt nun in der Induktionsformel für B, die für die Induktion im Trafo maßgebend ist, überhaupt nicht vor.

Es ist also umständlich die Induktionswirkung im Trafo über die nichtlineare Stromwirkung, und gar des Blindstromes zu erklären, wo der Trafo in erster Linie zum linearen Transformieren von Spannungen dient. Ebenso zeigen die untenstehenden Messkurven welchen Verlauf der Magnetisierungsstrom bei verschiedenen Trafotypen während einer Spannungshalbwelle hat, was auch wieder zu heftigen Protesten im Wikipedia geführt hat, denn die Gegner der Spannungszeitflächen gehen davon aus, dass der Induktionsstrom, Leerlaufstrom oder Magnetisierungsstrom genannt, wie gesagt immer einen sinusförmigen Verlauf hat und immer um 90 Grad zur Spannung nacheilt. Und wenn manche Teilnehmer dann meine Messkurven vom Ringkerntrafo sahen, protestierten sie laut dagegen.

Hier im Bild 4 noch einmal die Grafik der Netz **Spannungs-(rot)** und Leerlauf **Strommessung-(blau)** an einem 1kVA Ringkerntrafo im Leerlauf.
Die **grüne Kurve** zeigt die **Magnetisierungsleistung**.

Bild 4 ist gleich Bild 2, Die **Netzspannung** wird bei allen Messungen auf die Primärspule gegeben, der **Primärstrom** wird mit einer Stromzange in der Zuleitung zur Primär-Spule gemessen.



Trafomess-1kvaRkTR-Leerl-4.bmp, 221Veff, ; 26,6mAeff, wie 1

Der Ringkerntrafo oben, weil konstruktionsbedingt ohne Luftspalt im Kern, zeigt die Trafophysik, die Abhängigkeit des Leerlaufstromes von der Primärspannung am besten.

Man beachte bitte den sehr geringen Leerlaufstrom von nur ca. 40mA Peak bei einem 1kVA Trafo und seinen, entgegen der Lehrmeinung gar nicht sinusförmigen Verlauf und seiner Phasenlage die nicht um 90 Grad zur Spannung, nacheilend verschoben ist.

(Die Lehrmeinung sagt: Bei Induktivitäten sind alle Magnetisierungsströme um 90 Grad, eine halbe Halbperiode, zur Spannung nacheilend.)

Der Magnetisierungsstrom setzt sich hierbei aus dem Ummagnetisierungs-Strom und dem Strom zum Ende der Hysteresekurve, bei der leichten Sättigung, zusammen. Er zeigt also nur gegen Ende der Spannungshalbwelle einen geringen Blindstrom-Anteil.

Die nächsten Bilder zeigen Messungen an einem Schnittbandkerntrafo, dessen Kern genau wie der Ringkerntrafo auch aus kornorientiertem Blech gebaut ist.

Ein großer Unterschied besteht aber im Luftspalt der zwischen den Stößen der beiden Kernhälften besteht.

Bild 5, Bild eines 1kVASchnittbandkerntrafos, dessen Messkurven in der Grafik unten gezeigt werden. Der Messaufbau ist der gleiche wie oben und im Bild 21 beschrieben.

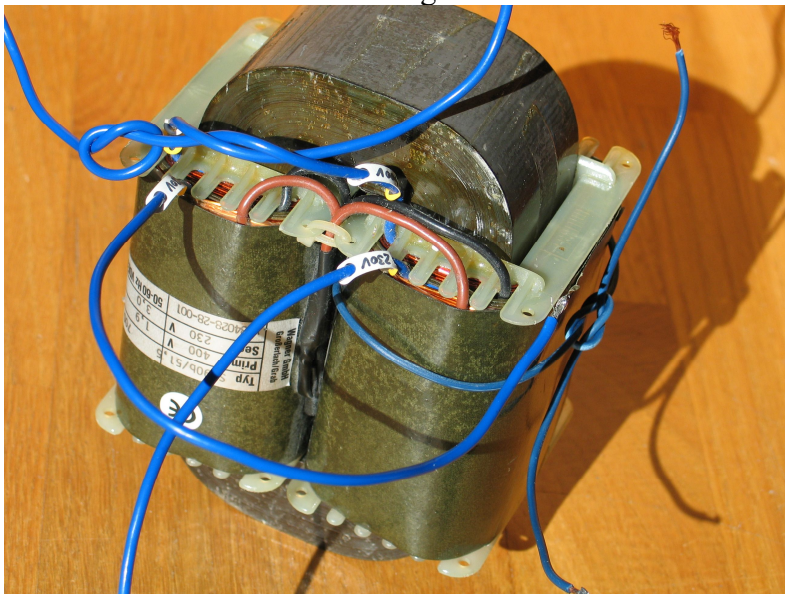
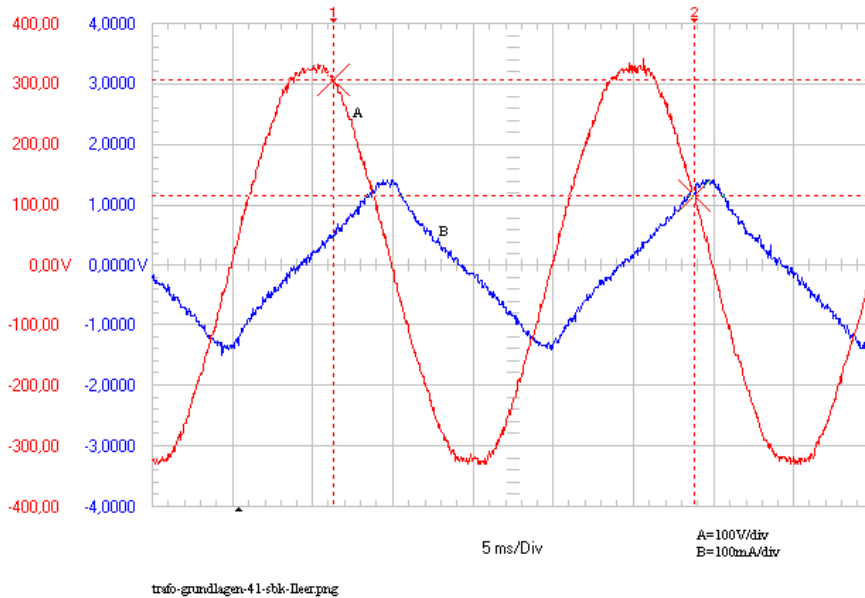


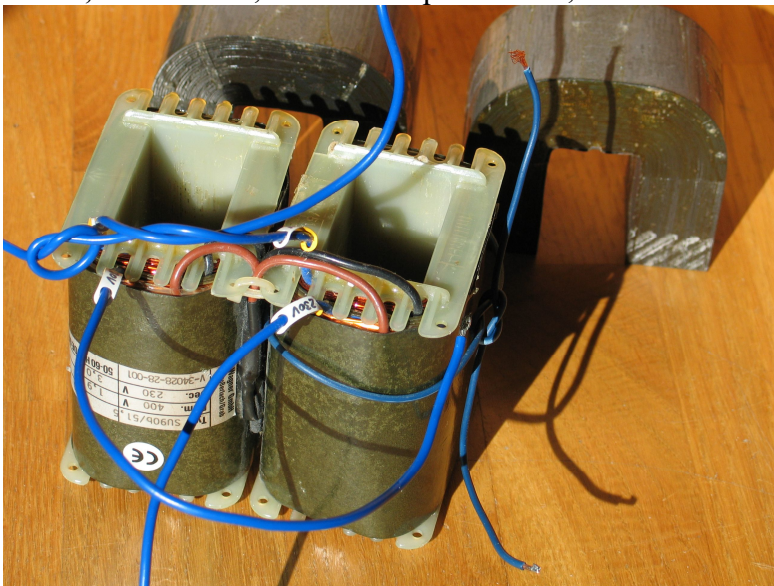
Bild 6, Hier die Grafik einer Netz **Spannungsmessung-(rot)** und Leerlauf **Strommessung-(blau)** an einem 1kVA Schnittbandkern Trafo mit vergrößertem Luftspalt im Leerlauf.



Der Stromverlauf, **blaue Kurve**, zeigt ein völlig anderes Verhalten als beim Ringkerntrafo, obwohl das Kernmaterial genau das gleiche ist bei beiden Trafos.

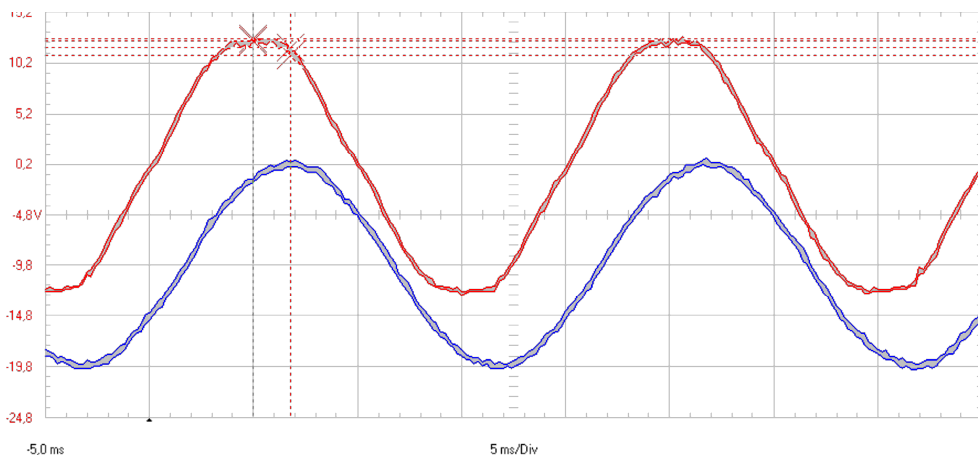
Der Stromverlauf ist fast linear dreieckig, was nur durch den Luftspalt, den ein Schnittbandkern immer besitzt, kommen kann, da sich die beiden Transformatoren nur dadurch unterscheiden. (Ein Ringkerntrafo besitzt dagegen naturgemäß **keinen** Luftspalt im Kern.) Die Stromhöhe beim Schnittbandkerntrafo beträgt im Peak ca. 140mA, ist also ca. 3 mal so groß wie beim Ringkerntrafo, weil der Luftspalt eine größere Magnetisierungs- Feldstärke braucht als das Eisen um den ganzen Kern gleichstark zu magnetisieren, wie es bei jedem Trafo der Fall ist. (Der Magnetische Spannungsabfall ist stromproportional. Im Kern und im Luftspalt ist er unterschiedlich, im Luftspalt ist er größer. Das B ist im Kern und im Luftspalt gleich groß, bei konstanten Kernflächen.)

Bild 7, Bild eines 0,7 kVA Luftspulentrafos, dessen Messkurve im nächsten Bild gezeigt wird.



Die 2 Schnittbandkernhälften sind entfernt, die Spulen sind die gleichen wie beim Schnittbandkerntrafo.

Bild 8, Hier die Grafik einer **Spannungsmessung-(rot)** und Leerlauf **Strommessung-(blau)** an einer Luftspule, der Spule vom 0,7 kVA Schnittbandkerntrafo ohne die Kerne, natürlich im Leerlauf gemessen. Die Primär- und die Sekundärspulen sind auf beiden Spulenkörpern je zur Hälfte vorhanden.



Luftspule aus 350VA, 200V Trafospule an 9,25Veff., bei 50Hz, $R_{sp.} = 2,6 \text{ Ohm}$
rot=Spannung an Spule, blau = Strom in Spule = 2,85Aeff. Strom eilt der Spannung um 1,8msec. nach.

Die Spule in Bild 7 und 8 ist die gleiche wie die vom Schnittbandkerntrafo in Bild 5 oben. (An einer Luft-Spule mit viel geringerem Ohmschen Widerstand oder mit einer höheren Spannungsfrequenz, wäre die Phasenverschiebung des Stromes zur Spannung exakt 90 Grad. Die Netzfrequenz war für diese Messung zu gering, damit 90 Grad Phasenverschiebung entsteht.)

In Lehrbüchern steht leider noch häufig, dass bei allen Arten von Transformatoren die Phasennacheilung des Magnetisierungs-Stromes zur Spannung immer 90 Grad beträgt. Obige Messungen der Trafos mit einem Eisenkern, zeigen das Gegenteil.

Deshalb mache ich mir die Mühe auch die Sichtweise der Professoren zu ändern, damit die Studierenden es zukünftig leichter haben, wenn sie genau wissen wollen wie sich Trafos verhalten.

Die Kontroversen zum Thema Spannungszeitfläche zeigen am Ende des Aufsatzes einige Zitate der Gegner und Fürsprecher, wo die Unterschiede der beiden Sichtweisen, Spannungszeitfläche oder herkömmliche Berechnung, liegen.

Fragen:

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

1a.) Wie hängen das Magnetfeld und der Magnetfluss voneinander ab.

2.) Wie entsteht die Selbstinduktionsspannung an der Primärspule?

Zu 1.) Frage: Ist die auf die Primär- Spule einwirkende Spannungszeitfläche die ursächliche Größe oder ist der in die Spule fließende Spulenstrom ursächlich für den Magnetfluss Φ ?

Erkenntnisse, die nicht neu sind, aber noch selten so entschlossen postuliert wurden:

- Die Magnetisierung wird entlang der Hysteresekurve durch die Spannungszeitflächen vorangetrieben, sofern der Trafo an der Netzspannung betrieben wird, die im Allgemeinen eingepreist ist also bei Belastung nicht einbricht. Auch bei Ansteuerung durch

Gleichspannungspulse, werden Schaltnetzteil Übertrage heute mit Spannungszeitflächen berechnet.

- Die Hysteresekurve kennzeichnet die Eigenschaften des Trafos bei der Magnetisierung.
- Der zum Magnetfeldaufbau nötige Strom stellt sich von selber ein, entsprechend dem Verlauf der Hysteresekurve und ist sehr stark abhängig vom Kernmaterial und der Kernbauform. **Er ist als Antwort des Trafos auf die Beeinflussung mit Spannungszeitflächen anzusehen. Natürlich sei darauf hingewiesen, dass Spannung und Strom immer gleichzeitig auftreten, beide Größen also die jeweils andere voraussetzen.**
- Die Hysteresekurve ist in Ihrer Charakteristik , wie Steigung, Breite, Remanenzlage, B_{max} . Höhe, durch Kernmaterial und Kernbauform und (Rest) Luftspalte, bestimmt.
- Eine Luftspule hat eine Gerade als Magnetisierungskurve, als Induktionsdichte B über der Feldstärke H , und keine Hysterese. Dabei entsprechen 1 Tesla Induktion = 8000A/cm Feldstärke. Neukurve ist gleich Magnetisierungskurve. Die Remanez ist gleich 0.
- Das Magnetfeld H wird bei der Magnetisierung durch den Magnetisierungs Strom aufgebaut, Dimension Ampere/cm, der Magnetfluss Φ durch die Spannungszeitflächen, Dimension Voltsekunden.
- Magnetfluss und Magnetfeld sind also zweierlei Größen und stets miteinander verkoppelt.
- Der Magnetfluss Φ hat die Dimension [Vsec.]. Er hat die Flussdichte B , [Vsec./qcm] und ist der senkrechten Achse der Hysteresekurve zugeordnet.
- Das Magnetfeld hat die Dimension [A pro cm], Ampere pro cm Feldlinienlänge, Stromstärke oder auch Magnetisierungsstrom genannt und ist der waagerechten Achse der Hysteresekurve als Feldstärke H als Magnetfelddichte in A/cm, Ampere pro Zentimeter Feldlinienlänge im jeweiligen Medium zugeordnet. Achtung damit ist nur der Leerlauf- oder Magnetisierungsstrom gemeint, der fast völlig unbeeinflusst vom übertragenen Wirkstrom des Trafos ist. Bei Spulen gilt nicht alleine der gemessene Magnetisierungsstrom sondern seine Multiplikation mit der Windungszahl, die Amperewindungen, (A_w).
- Für das Magnetfeld wird auch der Begriff Magnetische Durchflutung oder Magnetische Spannung, (nicht Magnetfluss), benutzt. Die Dimension ist Amperewindungen. (Die magnetischen Spannungen von zum Beispiel mehreren im Magnetfluss liegenden Luftspalten und Eisenwegen addieren sich.) Wenn Luftspalte vorhanden sind, dann fällt die Magnetische Spannung hauptsächlich an diesen ab, weil das Weicheisen den Magnetfluss um das Myr, also je nach Aussteuerungsgrad ca. 5000- 50000 Mal und mehr, besser leitet. Also ist es fast so wie beim elektrischen Strom, mit Spannung, Widerstand und Strom, nur eben mit umgekehrten Größen, weil der Magnetfluss nicht in Ampere, sondern in Vsec. Gemessen wird. Usw.
- Es ist für die Bestimmung des Leerlaufstromes nur die Hysteresekurve maßgebend.
- Sie zeigt im eingeschwungenen Zustand, also wenn der Trafo längere Zeit an der Netzspannung liegt und der Magnetisierungsstrom sich nach dem Einschalten nicht mehr ändert, nach welcher Spannungszeitflächen Einwirkung in einer Netzhalfperiode, welcher momentane Magnetisierungs-Strom fließt.
- Der Leerlaufstrom setzt sich aus dem Eisen-Ummagnetisierungsstrom und dem Luftspaltaufladestrom zusammen. Der Ummagnetisierungsstrom, mit „Ihyst-senkr“ in der Grafik Bild 11 unten bezeichnet, entsteht schon während der Ummagnetisierung und ist weitgehend in Phase mit der Spannung und verändert sich kaum in der Amplitude oder über die Zeit. Der Luftspaltaufladestrom, unten in der Grafik nicht sichtbar, weil kein Luftspalt vorhanden ist, steigt bei zunehmender Magnetisierung linear an und hat am Ende der Spannungshalbwelle seinen Scheitel. Er ist der eigentliche und zur Spannung um 90 Grad

Phasen verschobene Blindstrom, „hyst.W.p.“ in der Grafik im Bild 11 unten, der auch im luftspaltlosen Kern dann entsteht wenn das Eisen weitgehend ummagnetisiert ist. Er verursacht hier im Ringkerntrafo Beispiel als Sättigungsstrom, wegen seiner Größe an den ohmschen Leitern der Primärspule merkliche Verluste, wogegen der meist viel kleinere Ummagnetisierungsstrom hauptsächlich die Verluste im Eisen füttert.

Bild 11, Kurvenkonstruktion zur Veranschaulichung der Zusammenhänge im Ringkerntrafo Kern.

Zusammenhang von Spannung, Magnetisierung und Leerlaufstrom bei einem Ringkerntrafo

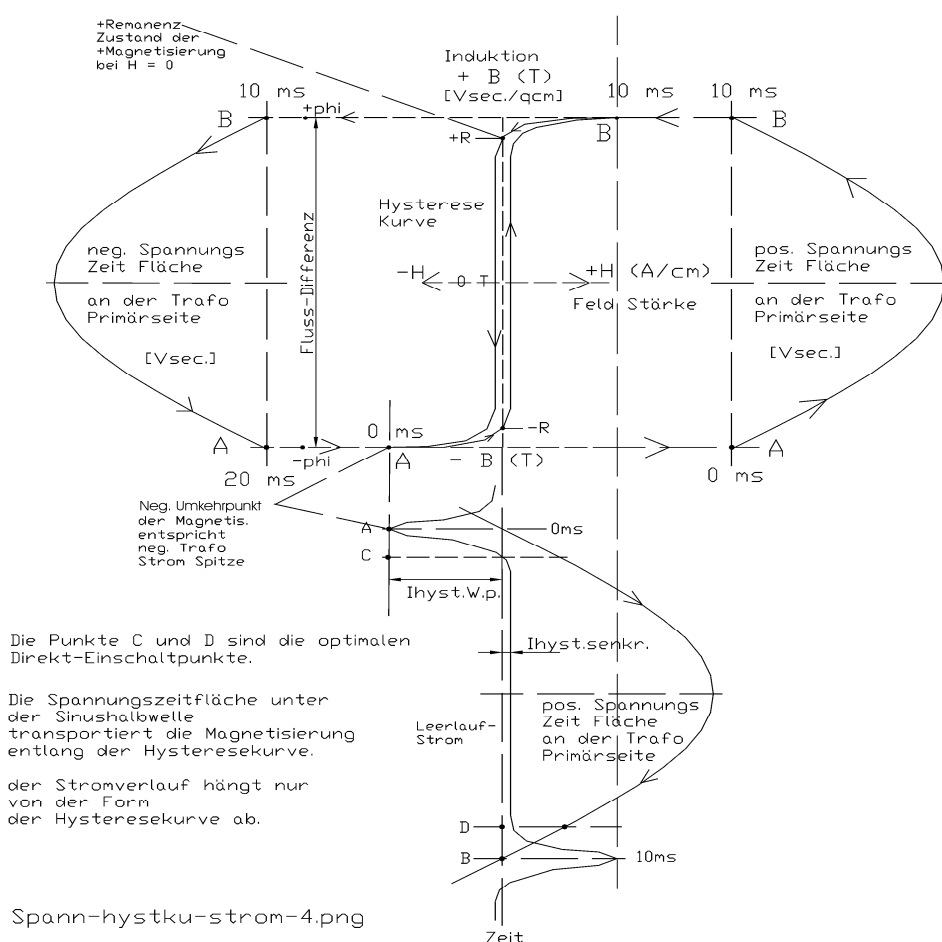


Bild: Spann-hystku-strom-4.png, Konstruktion von „EMEKO“-Ing.Büro.
Siehe auch das Datenblatt von einem „Rechteckkern“ auf Seite 14.

Über den Verlauf der Spannungshalbwelle, ist für einen bestimmten Kern mit einer bestimmten Spule darauf, über die Hysteresekurve der Stromverlauf gleichsam „synchronisiert“. Die Spannungshalbwelle ist einmal über der Hysteresekurve aufgetragen und im unteren Bildteil über den Leerlaufstrom aufgetragen. Den Verlauf im unteren Bildteil kann man mit einem 2 Kanal Oszilloscop nachmessen. Was in diesem Bericht mehrfach gezeigt wird.

Der Verlauf im Oberen Bild 11 ergibt sich aus der Kurve des Magnetflusses, der Induktion zur Feldstärke im Eisen und der Ursächlichen Spannungszeitfläche.

Das Bild zeigt im unteren Teil wie der Magnetisierungs-Strom, um 90 Grad nach rechts geklappt, (Zeitachse läuft jetzt nach unten), mit konstanter Höhe verläuft, solange der Fluss im senkrechten Teil der Hysteresekurve bewegt wird. Das ist der Ummagnetisierungsstrom. Am Ende der Hysteresekurve steigt der Strom steil an, weil das Eisen in eine leichte Sättigung gerät.

Das ist der eigentliche Blindstrom. Die Messkurve wurde bei Überspannung von 20% aufgenommen, damit die Blind-Stromüberhöhung deutlich wird.

Leider werden in der Literatur meist beide Ströme in einen Topf geworfen. Dort wird auch behauptet, dass der Magnetisierungsstrom immer um 90 Grad der Spannung nacheilt. Was für den Ummagnetisierungsstrom überhaupt nicht zutrifft, wie es hier leicht zu sehen ist.

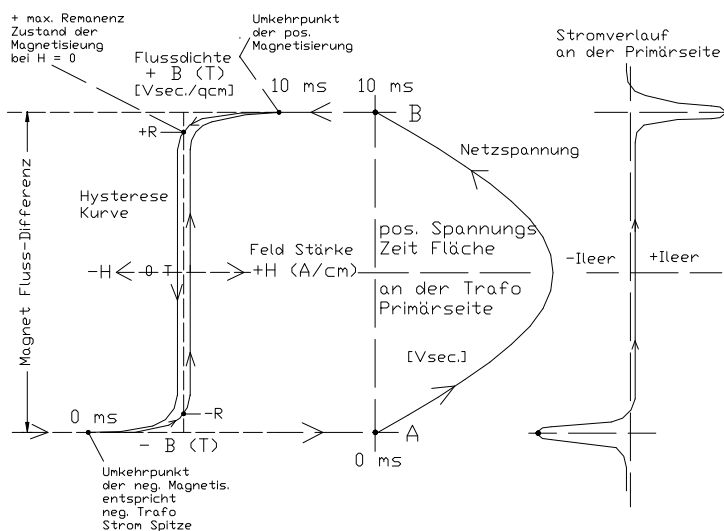
Der Scheitel der Stromüberhöhung des Sättigungsstromes liegt exakt im Spannungsnulldurchgang also bei 180 Grad, wo der Magnetfluss Phi sein Maximum hat. Die in Leerbüchern zitierte Phasenverschiebung eines „sinusförmigen“ Leerlaufstromes zur Spannung, von 90 Grad entspricht damit **nicht** der Wahrheit. (Sie gilt nur für rein Sinusförmige Leerlaufstromverläufe, die nur bei Kernen mit großen Luftspalten auftreten. **Dieser falsche Sinusförmigen Stromverlauf wird aber beim Berechnen von Trafos mit Formeln nahezu immer verwendet, weil man die Nichtlinearität mit Formeln nicht fassen kann.**

Außer beim Trafo mit großen Luftspalten, die aber bei Trafos außer bei Sonderformen, nicht gebräuchlich sind, sind die Leerlaufströme also niemals sinusförmig. Welchen Betrag der Stromkurve im Bild 11 oben soll man auch benutzen für die Bestimmung der Phasenverschiebung zur Spannung? Punkt C oder D oder andere?)

(Die Punkte C und D im Bild 11 oben sind die idealen Direkteinschaltpunkte von der Maximalremanenz -R oder +R aus, mit dem entsprechenden Spannungsanschnitt.)

Bild 12,

Zusammengehörigkeit von:
Hysteresekurve, Spannungsverlauf
und Leerlaufstrom bei einem Ringkerntrafo



Spann-hystku-strom-3.dwg, emeko, 01.01.09

Im Bild 12 oben ist die Strom-Wirkung von einer Spannungshalbwelle am Ringkerntrafo zu sehen. Links unten an der Hysteresekurve beginnend, bei 0 msec., beginnt die pos. Spannungszeitfläche im Punkt A größer zu werden. Sie läuft hier von unten nach oben. Sie transportiert die Flussdichte „B“ auf der Hysteresekurve bis zum pos. Umkehrpunkt der am Punkt B am Ende der pos. Halbwelle erreicht ist.

Kurz zuvor entsteht auch der pos. gepolte Leerlaufstrompeak. Anschliessend transportiert die negativ gepolte Halbwelle das B wieder zurück in den negativ gepolten Umkehrpunkt auf der Hystereseurve.

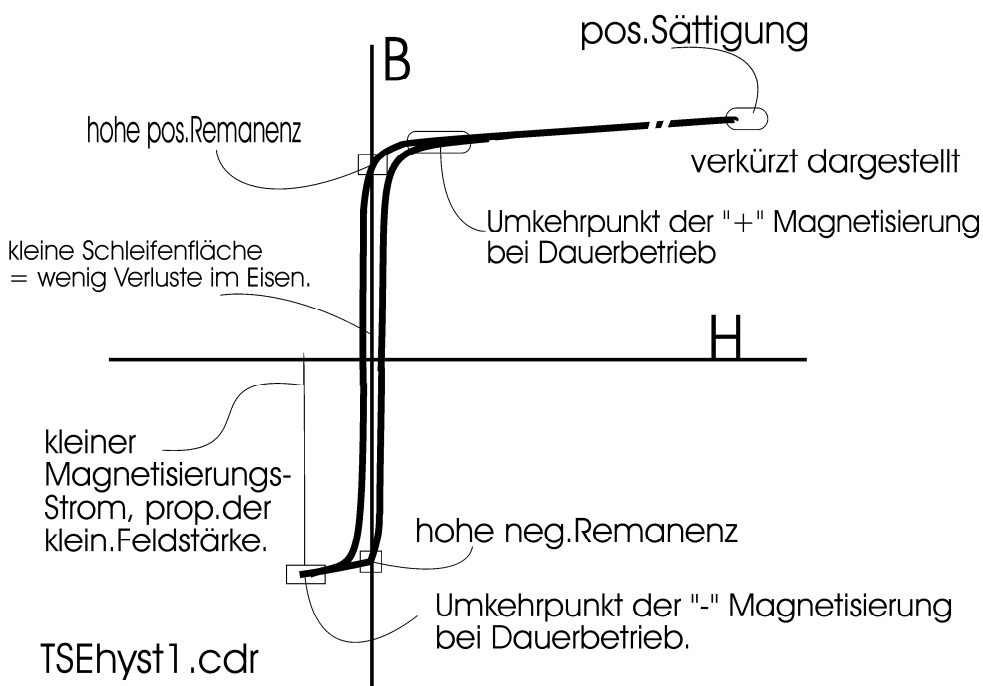
Das variable Verhältnis von dem Magnetfluss zum Magnetfeld ist in der Hystereseurve zu sehen. Im senkrechten Teil der Kurve, ist bei steigendem Magnetfluss das Magnetfeld und damit der Strom konstant, obwohl der Magnetfluss, von der Spannungszeitfläche getrieben, laufend zunimmt. Erst wenn sich der Magnetisierungsspunkt auf den sich zur Waagerechten neigenden Ast der

Hystereseurve läuft, steigt der Strom entsprechend der Form der Hystereseurve an. Der Strom kann durch die Senkrechte Projektion auf die H- Achse und der Windungszahl ermittelt werden. Bei einem Ringkerntrafo ist die Hystereseurve fast rechteckförmig ausgebildet. Im Fachjargon benutzt man den Begriff: Rechteckkerne. Nicht zu verwechseln mit den auch harte Kerne genannten Dauermagneten.

Bild 13, Siehe Bild TSEhyst1.

Hystereseurve

bei Ringkern-Trafos
(Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz



Der Zusammenhang von Induktion und Feldstärke ist sehr **nichtlinear**, wenn man den ganzen Durchlauf von einem zum anderen Umkehrpunkt betrachtet. Im Vergleich mit Hystereseurven von anderen Trafotypen mit verlustreicheren Kernblechen ist die Breite im Senkrechten Teil der Kurve, hier aufgrund der Eisen-Verlustarmut der hier verwendeten Bleche hier im Maßstab sogar noch zu breit dargestellt.

Siehe das Datenblatt von AlliedSignal auf der nächsten Seite.

Bild 14,

Das Datenblatt zeigt die Hysteresekurve eines Rechteckkernes wie er in Trafos verwendet wird.

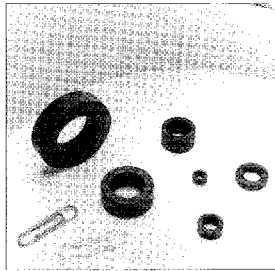


MES
MANZ ELECTRONIC SYSTEME
Repräsentant/Distributor
Ellwanger Straße 18
D-71640 Ludwigsburg



Technical Bulletin METGLAS® High Frequency Cores

MICROLITE™
Toroidal Choke Cores



MICROLITE™ Toroidal Choke Cores from AlliedSignal are manufactured with iron-based METGLAS® amorphous Alloy-SA1. They offer a unique combination of high saturation induction, high permeability and the lowest core loss available for high frequency choke cores,

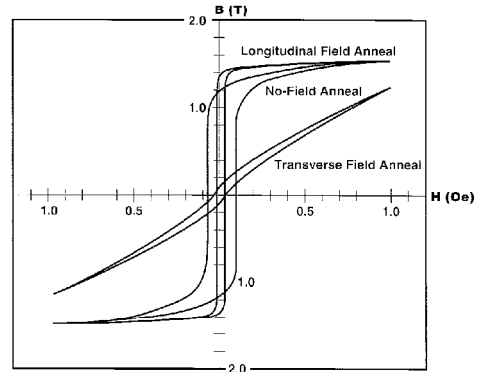
allowing the use of significantly smaller sizes than possible with conventional materials.

METGLAS MICROLITE choke cores are ideally suited for a diverse range of applications such as:

APPLICATIONS

- dc output inductors
- Flyback transformers
- Differential mode input chokes

TYPICAL dc HYSTERESIS LOOP METGLAS ALLOY-SA1



METGLAS MICROLITE toroidal choke cores are specifically designed to exhibit a dc hysteresis loop resulting in the following important benefits:

BENEFITS

- **Lowest Loss Available** - < 70 W/kg at 100 kHz and 0.1 T
- **High Permeability**
- **High Saturation Flux Density** (1.56 T)
- **Significant Size Reduction**
- **Linear Permeability** - over a wide range of magnetizing force

PHYSICAL PROPERTIES METGLAS ALLOY-SA1

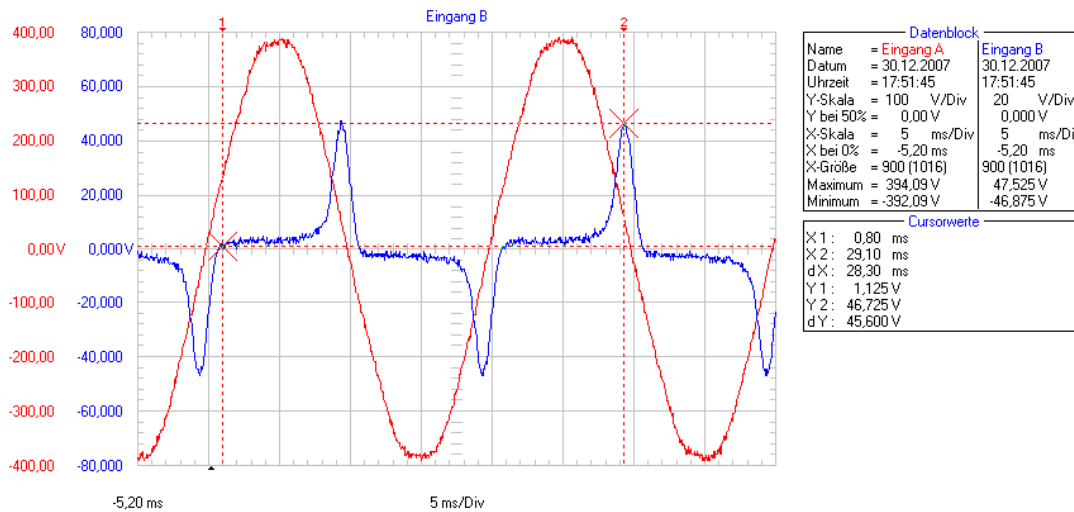
Ribbon Thickness (µm)	22
Density (g/cm ³)	7.18
Thermal Expansion (ppm/°C)	7.6
Crystallization Temperature (°C)	550
Curie Temperature (°C)	392
Continuous Service Temperature (°C)	150
Tensile Strength (MN/m ²)	1k-1.7k
Elastic Modulus (GN/m ²)	100-110
Vicker's Hardness (50g load)	860

MAGNETIC PROPERTIES METGLAS MICROLITE CORES

Saturation Flux Density (tesla)	1.56
Permeability (depending on core size)	250/285
Saturation Magnetostriction (ppm)	27
Electrical Resistivity (µΩ-cm)	137

Die magn.-Feldstärke ist hier in Örstedt angegeben. Die magn.-Flussdichte in Tesla.

Bild 15, Bild: Trafo-grundlagen-35.bmp, als Beleg zu den Details in der Zeichnung oben, „Spann-hystku-strom-4.png“ Original Messung mit 20% Überspannung, damit die Blindstromspitzen deutlich hervortreten.



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

Der Scheitel des total nichtlinear verlaufenden Leerlaufstromes bei der Eisen-Sättigung, liegt exakt im Spannungsnulldurchgang und damit auch genau unter den Spitzen Enden der Hysteresekurve, wo der Maximale Fluss herrscht und die Feldstärke und damit der mit ihr verkoppelte Strom, stark nichtlinear zunimmt. Das Myr verändert sich hier stark zu kleineren Werten.

Der dagegen waagrecht verlaufende und fast gleich bleibende Stromverlauf mit geringer Amplitude unter jeder Spannungshalbwelle bis kurz vor deren Ende, entspricht während dem größer werdenden Magnetfluss Φ , dem größer werdenden B, dem Durchlaufen im Bereich innerhalb dem senkrechten Ast der Hysteresekurve, siehe oben, Bild: TSEhyst1.png. Der Magnetflussanstieg erfolgt ausschließlich durch die Zunahme der Spannungszeitfläche, bei nahezu konstant waagrecht verlaufendem, zugehörigen Magnetisierungsstrom.

Zur Berechnung der Parameter, wie Leerlaufstrom, Eisenquerschnitt, Windungszahl der Primärwicklung eines unbekanntes Trafos, eignet sich die Vorgabe der max. Flussdichte B, gemäß den Daten des Kernbleches, in Verbindung mit der Spannungszeitfläche der Betriebsspannung einer Spannungshalbwelle am einfachsten. Denn dabei wird die Hysteresekurve genau einmal durchfahren.

Dagegen mit einem vorgegebenen Leerlauf-Strom dann die anderen Parameter zu berechnen, ist ein schwieriges und ungenaues Unterfangen, weil eben dieser Strom nicht linear und unbekannt ist.

Dazu muss man den Trafo erst bauen um dann den Leerlauf-Strom zu messen.

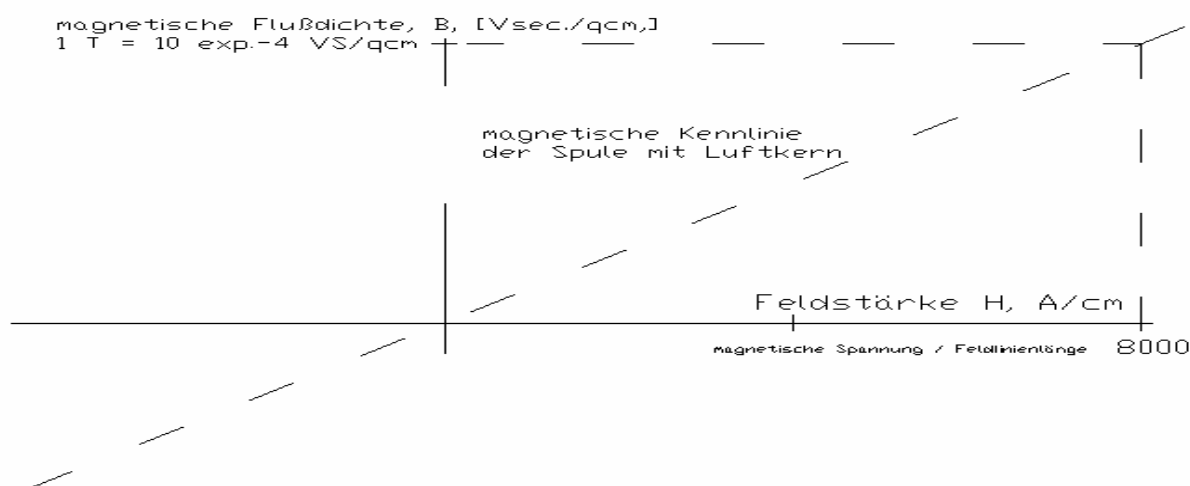
Genauso hat es der Autor in seinen ersten Berufsjahren erlebt.

In Spulen ohne Kern also nur mit Luft, siehe unten das Bild 16, magnetis-luft.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 Sättigungs-Erscheinung oder Remanenz. Bild: Magnetis-luft-1.png. Der Zusammenhang von B und H ist rein linear.

Das B von einem Tesla entspricht in der Luft der Magn. Feldstärke von 8000 A / cm Anders ausgedrückt: Um die magn. Flussdichte von 1 Tesla in Luft zu erreichen, ist ein Magnetfeld von 8000 A / cm nötig. Siehe der Text in der Grafik unten ist dafür eine Spule mit einem hohem Strom zu beaufschlagen.

Bild 16,

Magnetische Flußdichte in Luft über der Feldstärke aufgetragen. B von 1T entspricht H von 8000 A/cm



Vergleich zweier Ringspulen mit Betriebsspannung von 230Vac und einer Induktion von 1,0 Tesla:

Für eine Ringspule mit 15 qcm Innenfläche ohne Eisen und 11 cm mittl. Durchmesser und damit 35cm Umfang, sind laut Kennlinie 280000 Ampere-Windungen nötig, was bei 230 Windungen einen Leerlauf Strom von 1220 A ergibt. Bei einer Feldstärke von 8000 A/cm.

Für eine Ringspule mit den gleichen Abmessungen, jedoch mit einem Bandkern ausgerüstet, sind bei 230 Windungen nur 5,7 Amperewindungen, das sind nur 25 mA * 230 Windungen nötig. Der Leerlaufstrom beträgt laut Magnetisierungskennlinie nur ca. 25mA.

Der Ringkerntrafo ist also $280000 / 5,7 = 49000$ mal effektiver als eine Luftspule gleicher Größe, seine max. Feldstärke im Eisen beträgt nur $25\text{mA} / 35 \text{ cm} = 0,71 \text{ mA} / \text{cm}$.

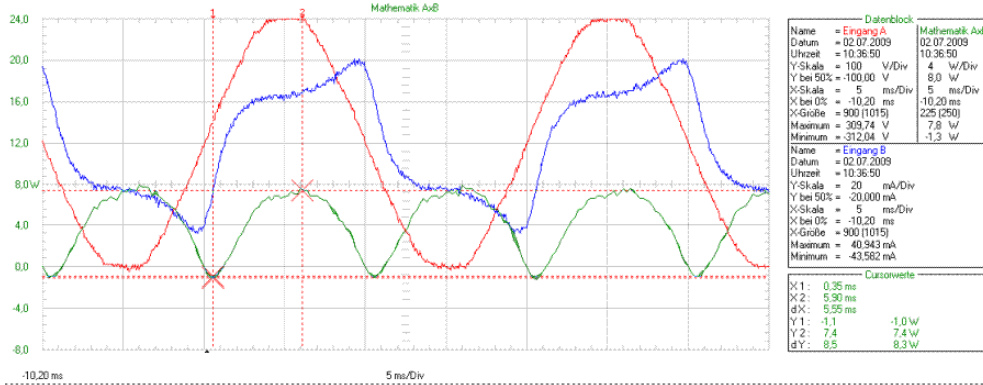
Eindrücklicher, als im Text der Grafik oben, kann man den Unterschied zwischen einer Luftspule und einer Ringkernspule bei gleichen Windungszahlen, wobei beide Spulen die gleiche Flussdichte B im Innern erzeugen, nicht vorführen, wobei die Luftspule wegen dem hohen Leerlaufstrom nicht für einen Trafo der Größe des Ringkerntrafos zu betreiben ist. Die Spule müsste viel größer sein.

Zurück zum Trafo mit Eisenkern.

Man ist beim Ringkerntrafo wegen dem geringen Magnetisierungsstrom geneigt zu vermuten, dass er fast ein idealer Trafo ist.

Man kann sagen, dass für den Aufbau des Magnetflusses die Zunahme der Spannungszeitfläche der Auslöser ist, weil für die steigende Magnetisierung kein steigender Strom benötigt wird, weil dieser nahezu konstant ist während der Ummagnetisierungsphase. Natürlich ist für den Aufbau des Magnetfeldes im Kern auch der Magnetisierungs-Strom nötig. Da er aber nur gering und nahezu konstant ist, die sich aber stark verändernde Variable, die Spannungszeitfläche dabei dominant ist, werden alle Betrachtungen und Berechnungen am Trafo einfacher wenn man die Spannungszeitfläche als die treibende Größe ansieht und mit ihr die gesuchten Trafoparameter berechnet.

Bild 17, Hier noch mal die Grafik einer Netz **Spannungs-(rot) und Leerlauf **Strommessung-(blau)** an einem 1kVA Ringkerntrafo im Leerlauf. Die **grüne Kurve** zeigt die **Magnetisierungsleistung**.**



TrafoMess-1kvaRTR-Leerl-4.bmp, 221Veff, ; 26,6mAeff, wie 1

Strommessung blau, mit 20 mA pro div.

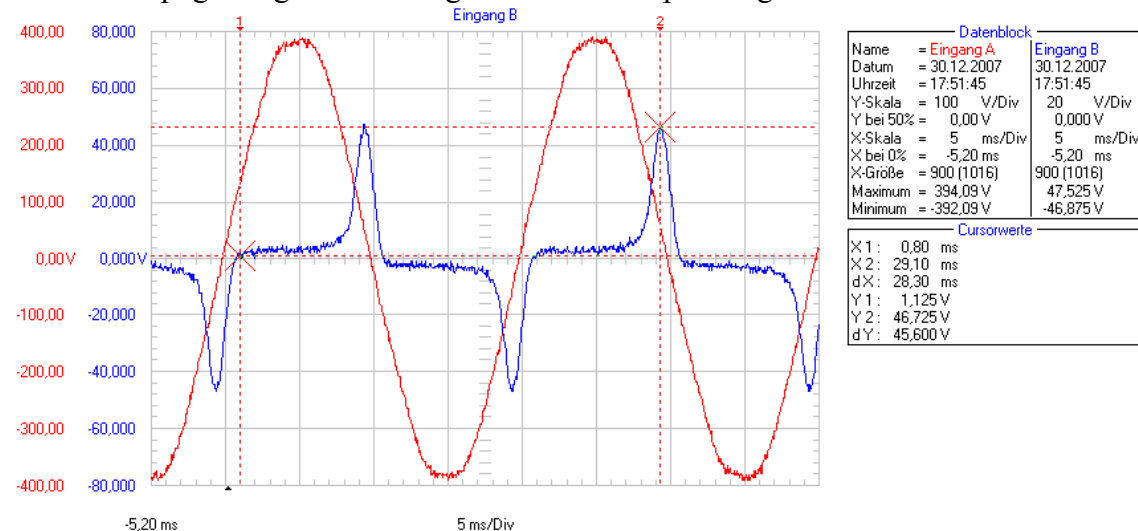
Auch der Ringkerntrafo braucht den Strom zum Aufbau der Feldstärke im Eisenkern, auch wenn es nur 24 mA eff. sind bei dem 1kVA Ringkerntrafo und die Stromspitzen auch erst am Ende der Spannungszeitflächen sichtbar werden, bzw. zum fließen kommen und in die 24mA Berechnung mit eingehen. (Das hat das Oscilloscop mit der Math. Funktion berechnet.). Wichtig ist dabei aber zu beachten, dass dieser Strom nicht in dem Maße wie der steigende Magnetfluss Phi und schon gar nicht linear zunimmt.

In der Literatur wird bisher **nicht** zwischen Eisenaufmagnetisier- und Luftspaltaufmagnetisierstrom unterschieden. **Sie werden beide in einen Topf geworfen** und als sinusförmig und der Spannung 90 Grad hinterherlaufender sinusförmiger **Blindstrom** bezeichnet. Das entspricht aber überhaupt nicht dem Stromverlauf der hier tatsächlich zu messen ist.

Die Annahme, des immer 90 Grad nacheilenden, sinusförmigen Leerlaufstromes und diesen als Blindstrom zu bezeichnen, macht es gerade den Studierenden schwer sich die Vorgänge bildlich und im Detail vorzustellen. Allerdings läßt diese Vereinfachung das Rechnen mit komplexen Zahlen zu, die eine Erfindung der Mathematiker ist.

Um die technischen Vorgänge beim richtiges Einschalten, Vormagnetisieren, Sättigung, Überspannung, Unterfrequenz, Überfrequenz, usw. zu erklären, erweist sich die Spannungszeitflächen Sichtweise, (wegen der Einspeisung mit steifer Spannung), als sehr übersichtlich und einfach, wie es auch die folgenden Messungen eindeutig belegen.

Bild 18, Bild: Trafo-grundlagen-35.bmp, als Beleg zu den Details in der Zeichnung oben, „Spannhystku-strom-4.png“ Original Messung mit 20% Überspannung.



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

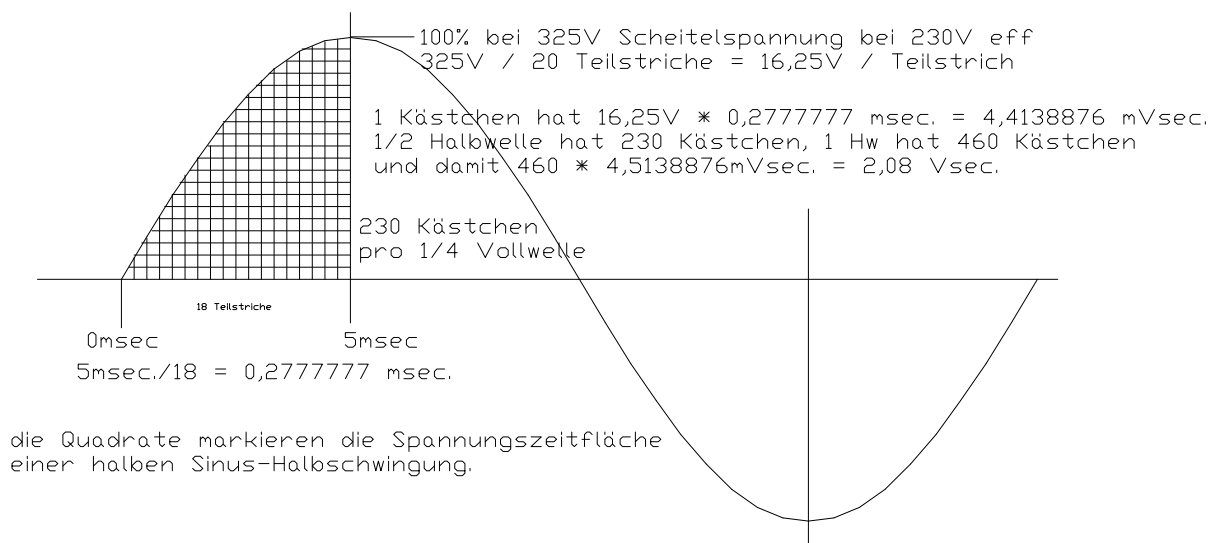
Signal B hat die Auflösung von 200mA / div.

(--Im obigen Bild18: Trafo-grundlagen-35a.png ist der waagrecht verlaufende Strom von ca. 30 mA etwas größer also zuvor, weil es Messtoleranzen sind, die den höheren Strom messen. Der Waagrechte Verlauf des Magnetisierungsstromes während dem Durchlaufen des senkrechten Teiles der Hystereseurve ist aber signifikant und typisch für den Ringkerntrafo.--).

Die nun gegenüber dem Bild 4 höheren Strompeaks am Ende der Spannung-Halbwellen rühren von der Überspannung her, die die Hystereseurve weiter in Richtung Sättigung aussteuert.

Bild 19,

Definition der Spannungszeitfläche.

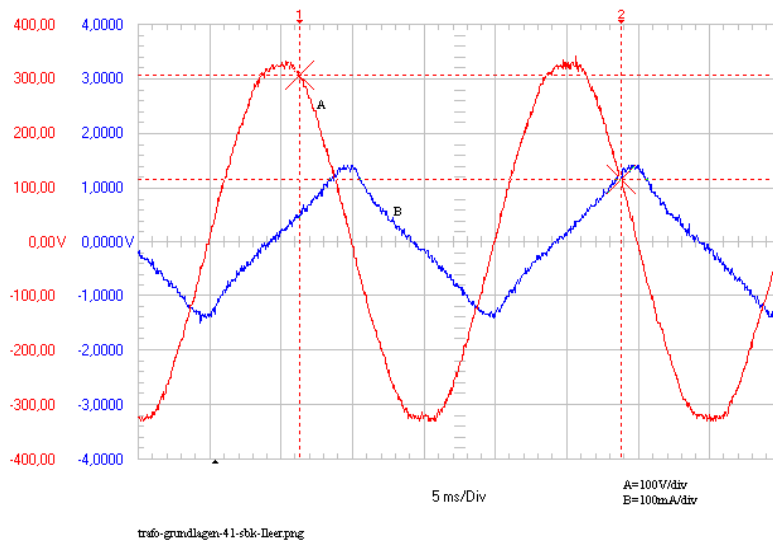


Die Spannungszeitfläche einer Halbwelle, die den Fluss im Transformatorkern aufbaut, ist natürlich doppelt so groß wie der schraffierte Bereich und beträgt bei 230V eff. ca. 2,1 Vsec.

Die Aussage und Beobachtung, dass ein Trafo mit einer für 230V dimensionierten Primärwicklung, bei Überspannung oder Unterfrequenz am Ende jeder Halbwelle in Sättigung gerät, ist damit sofort zu verstehen.

Die unten stehenden Messkurven zeigen die Spannung und den Strom an einem Leer-laufenden Schnittbandkerntrafo mit einem definierten, extra vergrößerten Luftspalt. Der Stromverlauf ist durch die Luftspaltdominanz nahezu dreieckig. Der Lineare Zusammenhang von B und H im Luftspalt wird hier deutlich. Siehe die Form der Hystereseurve von Seite 14.

Bild 20, Hier die Grafik einer Netz **Spannungs-(rot) und Leerlauf **Strommessung-(blau)** an einem 0,7 kVA Schnittbandkern Trafo mit vergrößertem Luftspalt im Leerlauf.**



Unter der Spannungszeitfläche einer Halbwelle wechselt der Strom von minus max. nach plus max. und umgekehrt wie erwartet ständig hin und her. Nur sieht nun der Stromverlauf gänzlich anders aus als im Bild 18, zuvor beim Ringkerntrafo.

Natürlich kann man die Magnetisierung im Eisenkern des Trafos auch mit definierten Gleichspannungspulsen beeinflussen. Innerhalb des senkrecht verlaufenden Teils der Hysteresekurve werden Spannungszeitflächen die kleiner als die sind, für die er ausgelegt ist und nicht zum Erreichen des max. Remanenzpunktes führen. Diese Pulse können natürlich auch als einmalige Gleichspannungspulse auf den Trafo gegeben werden. Sie werden genauso wie einzelne Wechselfeldpuls vom Trafoeisenkern aufgenommen und führen die Magnetisierung zu Remanenzpunkten unterhalb der max. Remanenz.

Legt man eine zu große Spannungszeitfläche auch als Gleichspannungspuls an, die das Eisen in die Sättigung führt, so kann man damit das Eisen von einem zum anderen Remanenzpunkt steuern.

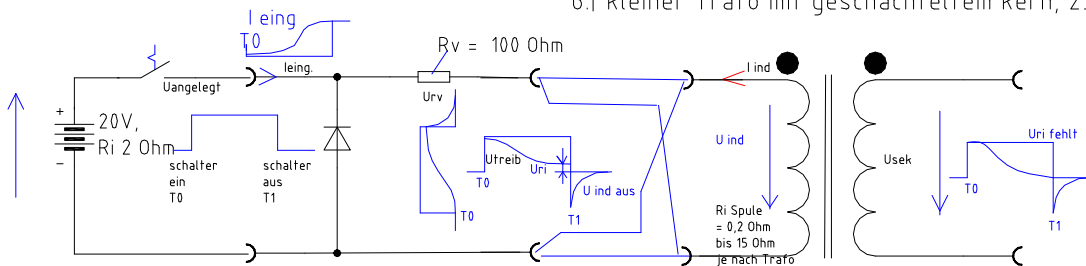
Das auf der nächsten Seite stehende Schaltbild zeigt den Aufbau für die Messung der Messkurven, die zum Erkennen der Wirkung von Spannungszeitflächen dienen.

Bild 21,

Messung der die Induktion treibenden Spannung, Utreib, der Ohmschen Spannung, U_{ri}, der Sekundärspannung U_{sek} und des EIngangsstromes, als Sprungantwort auf die angelegte Spannung U angelegt. Die Utreib läuft abhängig vom Startpunkt also der plus oder minus Remanenz, unterschiedlich weit annähernd waagerecht, bevor sie dann steil nach unten geht. Erklärung dazu: Solange die Magnetisierung noch nicht in Sättigung gelangt, ist die Kurve noch annähernd waagerecht. Bedingungen: Es wurde der Kern umgepolt, und nicht umgepolt gemessen und damit von einer gegenpoligen und gleichpoligen Remanenz aus aufmagnetisiert.

Die hier eingezeichneten Messkurven sehen im Detail anders aus als sie hier gezeichnet sind. Siehe separater 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
 5. | kleiner Ringkerntrafo, 230V, 100VA
 6. | kleiner Trafo mit geschachteltem kern, 230V 50VA



Voraussetzung bevor Schalter ein: Der Kern steht auf der zur U batt gegenpoligen Remanenzpolarität.

Ergebnis: Die Utreib ist anfangs synchron mit U angelegt, wird aber zunehmend vermindert um U_{rv}. Eine Selbstinduktionsspannung ist erst beim Ausschalten messbar.

wenn das Eisen ummagnetisiert ist, geht U_{ind} zu null.

Utreib liegt an der Primärspule an.

Trafo-grundl-2.dwg, EMEKO Ing. Büro, Freiburg den 18.12.07

Trafo-Messung mit Beaufschlagung der Trafoprimärspule mit einer definierten Spannungszeitfläche, hier Utreib genannt.

Messung an einem 1 kVA, 230V Ringkern Trafo und anderen Trafos ohne Belastung. (Die weiter oben abgebildeten Trafos wurden verwendet.)

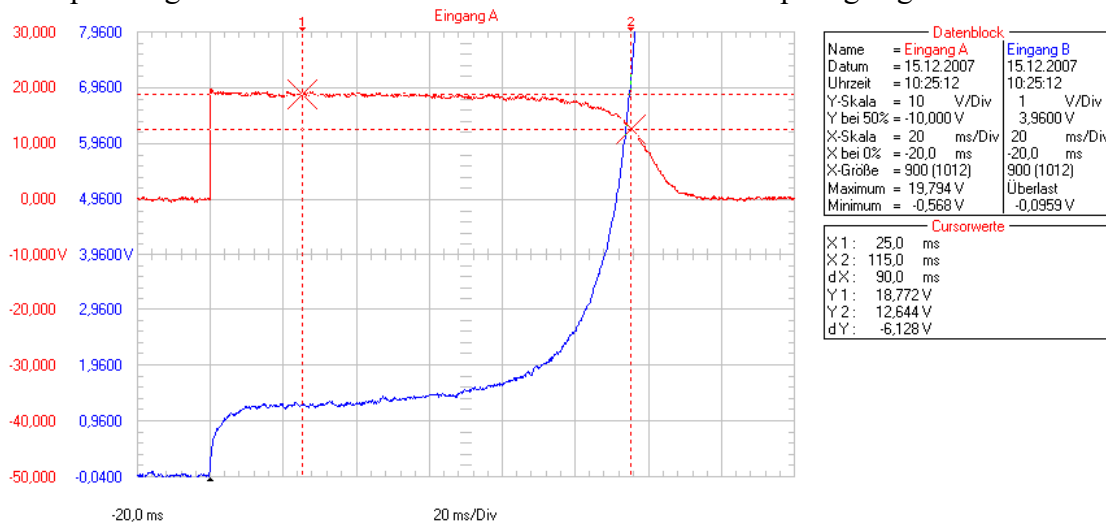
Es wird ein DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm an die vorher gleich beaufschlagte aber nun umgepolte oder nicht umgepolte Primärspule gelegt. Es wird also von der neg. oder der pos. Remanenz aus, der Magnetisierungsverlauf an hand vom Strom gemessen. Die Hysteresekurve wird nach dem Umpolen damit fast voll oder beim nicht vorher umpolen nur teilweise durchfahren.

Wenn vorher umgepolt wurde: Anfänglich fließt nur der fast konstante Eisen-Ummagnetisierungsstrom, blaue Kurve bis zum Zeitpunkt von 110 msec.. Die beiden nächsten Grafiken zeigen aufgrund der hohen Remanenz im Kern stark unterschiedliche Ergebnisse, abhängig davon ob von der negativen oder positiven Remanenz aus mit der positiven Spannungszeitflächenbeaufschlagung begonnen wurde.

An einem Trafo mit großem Luftspalt, ergäben sich wegen der Nullremanenz der Hysteresekurve keine Unterschiede zwischen der Messung mit gleich großen positiven oder negativen Spannungszeitflächen Pulsen. Von der Mitte der Hysteresekurve ausgehend sind die positiven und negativen Spannungszeitflächen Pulse gleich groß bis zur jeweiligen Sättigung am Ende der Hysteresekurve.

Bild 22, Bild: Trafo-grundlagen-17.png

Hier wird der 1kVA Ringkerntrafo mit 230V Primärspannung, von seiner negativen maximalen Remanenzlage ausgehend, mit einer positiven Spannungszeitfläche an seiner Primärspule beaufschlagt. Die Spannung wird über einen Vorwiderstand an die Primärspule gelegt



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

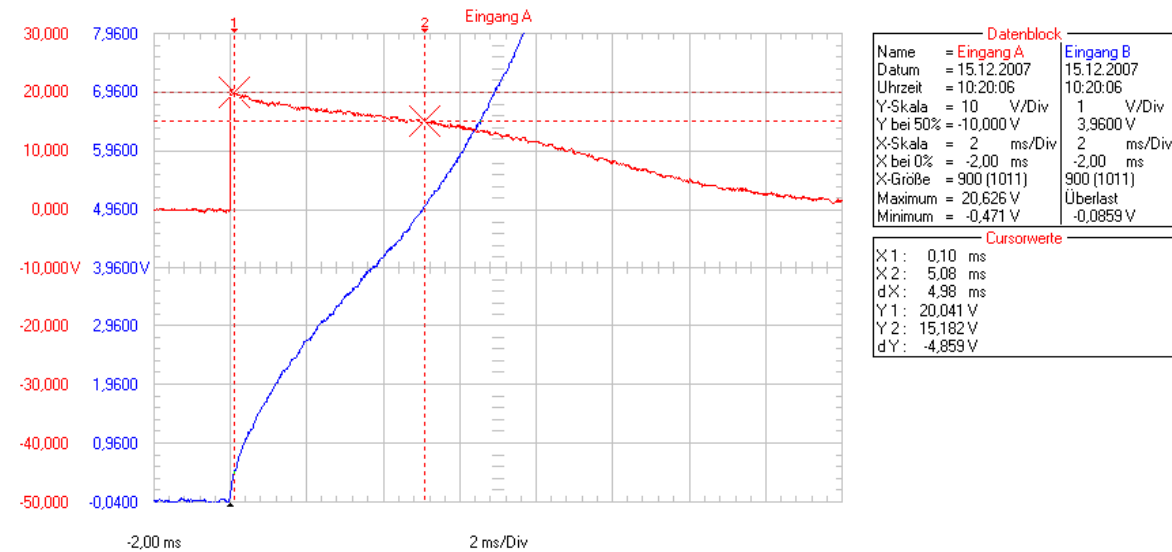
Zum Durchlauf der Hysteresekurve von der negativen max. Remanenz aus startend, hin zur pos. Remanenz, benötigt man die Spannungszeitfläche von ca. 20V mal 110 msec. = 2,1 Voltsekunden. Das deckt sich mit der oben in der Kästchen-Grafik ermittelten Spannungszeitfläche einer 230V 50Hz Sinusspannungs-Halbwellen. (Eine Spannungs-Halbwellen transportiert im Dauerbetrieb die Magnetisierung von einem zum anderen Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve.) Die Messung oben zeigt jedoch keinen Dauerbetrieb, sondern einen Einmal Vorgang, weil die Hysteresekurve hier nicht vom Umkehrpunkt sondern dem Remanenzpunkt bei Feldstärke Null aus startet, der ein etwas geringeres B hat.

Kanal A, Utreib, zeigt die Spannung direkt an der Primärspule, also nach dem Vorwiderstand, weshalb sie bei Sättigung zusammenbricht, weil am Vorwiderstand dann wegen dem ansteigenden Strom die ganze treibende Spannung abfällt, Kanal B, blaue Kurve, zeigt die Spannung am Vorwiderstand und damit den Strom in die Primärspule.

Hier sieht man den Magnetisierungsstrom mit seiner langen fast waagerechten Phase von ca. 80 msc. Dauer. Nach 120 ms, was einer Spannungszeitfläche von ca. 2,2 Vs. entspricht, ist der Nenn-Betriebs-Umkehrpunkt der Hysteresekurve , mit ca. 65 mA peak schon überfahren. Er liegt im Dauerbetrieb bei ca. 42 mA peak.

Diese Spannungszeitfläche unter der roten Kurve von Kanal A bis zum Abfall, drückt die Auslegung des Trafos auf Spannung, Windungszahl, Kernfläche und Frequenz aus. Drückt damit also die Spannungszeitfläche für eine 230 V Sinushalbwellen bei 50 Hz aus, die ungefähr 2,1 Vs entspricht. Interessant wird jetzt der Vergleich mit der nächsten Grafik.

Bild 23, Messung an einem 1kVA, 230V Ringkern Trafo, mit einem DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm bei **nicht** umgepolter Primärspule, also von der pos. Max. Remanenz aus gemessen. Die Spannung wird über einen Vorwiderstand an die Primärspule gelegt



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

Zu Bild: Trafo-grundlagen-14.png.

Achtung hier mit 10 mal kürzerer Zeitmaßstab als bei der Messung von der neg. Remanenz aus, im Bild 22 auf der vorigen Seite, damit im Bild 23 der bei dem Spannungs-Sprung, unmittelbare Strom-Anstieg besser sichtbar wird..

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

Die hier angelegte **Spannungszeitfläche** treibt den Kern sofort in die Sättigung, weil gleichpolig zur Remanenz aufmagnetisiert wird. (So reagiert auch der Trafo beim Einschalten im schlechtesten Fall, wenn bei positiver Remanenz zufällig eine positive Spannungszeitfläche beim Einschalten als erste Halbwelle auf den Trafo gegeben wird.)

(In Lehrbüchern steht bis heute noch, dass der Beste Einschaltfall eines Trafos im Scheitel der Netzspannung geschehen muss, was außer beim Trafo mit einem großen Luftspalt völlig falsch ist.)

Siehe die Messkurven auf Wikipedia, Benutzer: Emeko.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Emeko>

Auch hier im Bild 23 wird der Magnetisierungsstrom als Spannung am 100 Ohm Vorwiderstand gemessen. Es fällt auf, dass er hier im Bild 23 relativ zum Umpolfall der Magnetisierung im Bild 22, sofort steil ansteigt.

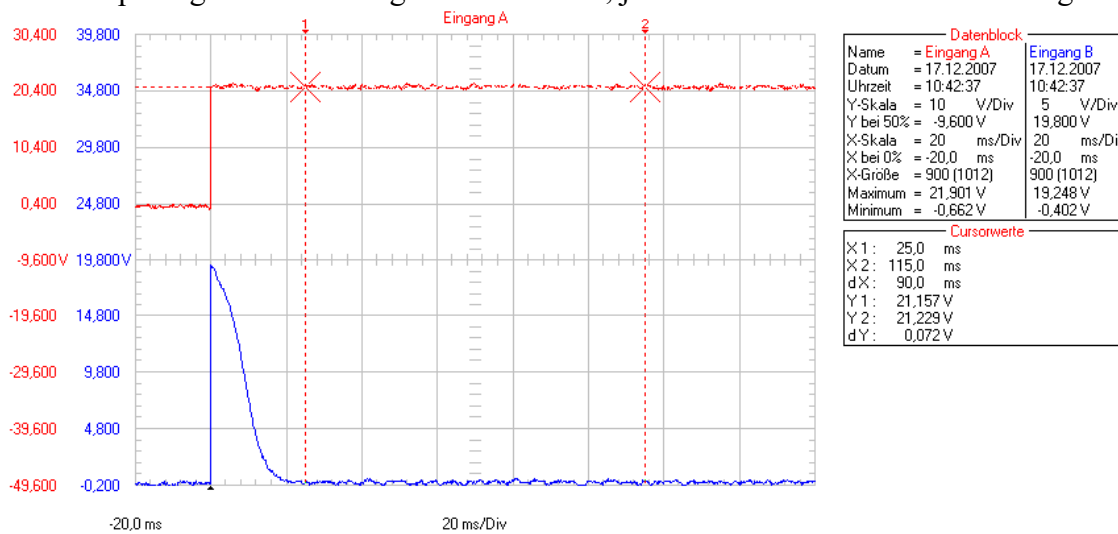
(Zum aufmagnetisieren der letzten Weisschen Bezirke am Ende der Hysteresekurve, ist viel mehr Energie für die gleiche Feldstärke im Eisen nötig als zum ummagnetisieren der Weisschen Bezirke die während dem senkrechten Verlauf der Hysteresekurve ummagnetisiert werden.)

Die Messung zeigt damit auch, dass die Remanenz hoch ist und nahe der Flussdichte B für den Umkehrpunkt in der Hysteresekurve liegt, weil kein waagrecht verlaufender Strom zu sehen ist.

Der Magnetisierungsstrom zeigt also genau was im Trafo mit dem B und H über den Verlauf der Spannungszeitfläche passiert. Er ist ein Abbild der Feldstärke entsprechend der Lage von B auf der Hysteresekurve.

Es wird also ständig auf das B Bezug genommen, was durch die Spannungszeitflächen getrieben wird.

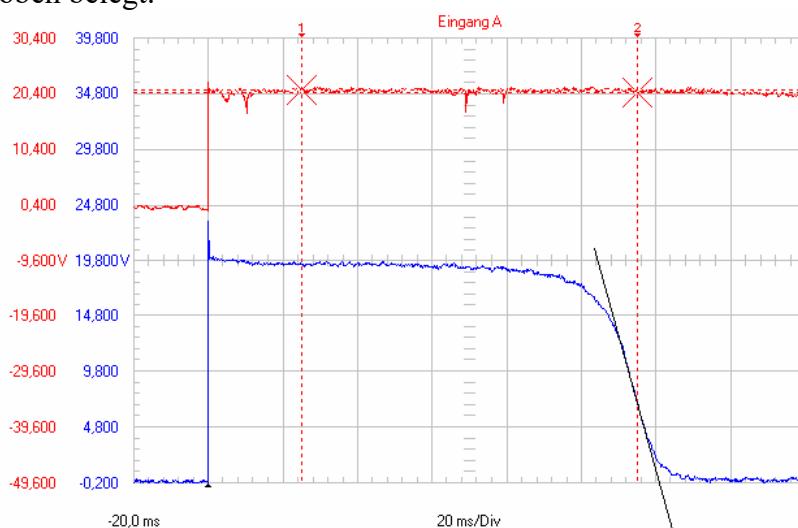
Bild 24, Messung an einem 1kVA, 230V Ringkern Trafo, mit einem DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm an die vorher **nicht** umgepolte Primärspule gelegt, also **von der pos. Remanenz aus gemessen**. Die Hysteresekurve wird nur am Ende bis zur Eisensättigung durchfahren. Hier ist der Kanal A aber die Spannung vor dem Vorwiderstand, weshalb sie nicht einbricht, Kanal B ist nun die Spannung am Trafoeingang, die bei Sättigung einbricht. Im Prinzip die gleiche Messung wie im Bild 23, jedoch mit anderer Messanordnung.



Trafo-Grundlagen-18.bmp, 1kVA Ringkerntr. v. pos Rem. aus mit +20V Sprung, A= Uangel. B= Utreib nach Rv von 100 Ohm.

Hier wird **nicht** wie beim Bild 22 oder 23, Trafo-grundlagen-17 oder 14 auf Kanal B, blaue Kurve, der Strom, sondern die Trafo-Primärspulen Spannung direkt an der Spule dargestellt. Auf Kanal A, rote Kurve, ist die Gleichspannung vor dem Widerstand gemessen dargestellt und zeigt natürlich keinen Abfall der steifen Gleichspannungsquelle. Hinter dem Strom-Messwiderstand bricht die Spannung B wegen dem Steilen Stromanstieg, siehe im Bild 23 oben, sofort ein. Die Spannungszeitfläche unter der blauen Kurve zum Transport des Magnetflusses vom oberen Remanenzpunkt in die Sättigung ist nur klein, was der Form des Endes der Hysteresekurve in diesem Bereich entspricht.

Bild 25, 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. Die Kanäle A und B sind wie im Bild 24 oben belegt.



Trafo-Grundlagen-19.bmp, Ringkerntr. wie Bild 1, jedoch von neg. Rem. aus +20V Sprung.

Korrektur : wie Bild 18

Kanal A, rote Kurve, zeigt die Gleichspannung vor dem Widerstand, Kanal B, blaue Kurve, zeigt die Primärspulenspannung nach dem Vorwiderstand.

Wenn die Hystereskurve bis ans Ende durchfahren ist, bricht die Primärspannung durch den Stromanstieg hinter dem Vorwiderstand zusammen, weil der Kern in Sättigung geht.

Die Spannungszeitfläche zum Transport der Flussdichte B in die Sättigung ist groß und entspricht den ca. 2,1 Volt Sekunden einer 230V Netzspannungshalbwelle. Die Spannungszeitfläche nimmt bei konstanter Spannung ohne merklichen Stromanstieg über die Zeit zu. (Sichtbar daran, dass die blaue Kurve zuerst kaum abfällt.) Das Zunehmen der Spannungszeitfläche erfolgt hier linear und ist über die Zeit konstant, im Gegensatz zur Sinusspannungszeitfläche. Aus dem Grund ist die nur 20 Volt große Spannung am Trafo Eingang und die induzierte Spannung am Trafoausgang, die hier nicht dargestellt ist, auch solange konstant bis die Sättigung erreicht ist. (**Der Trafo-Ausgang folgt dem Trafo-Eingang wie ein siamesischer Zwilling, unabhängig vom Verlauf der Hysteresekurve und dem daraus resultierenden Leerlauf-oder Magnetisierungsstrom.**) Der Leerlauf-Stromverlauf spielt dafür keine Rolle.

Das gleiche, dass der Leerlauf-Strom am Ende der Spannungshalbwelle stark ansteigt, passiert an einem Trafo, wenn die Primär-Spannung zu groß oder die Frequenz zu niedrig ist. Siehe der Versuch am 100VA Trafo der mit steigender Sinusspannung betrieben wird. Grafik auf Seite 12, trafo-test-Überspannung 1.

Die Sekundär Spannung bricht dabei also nicht gleich nach dem Beginn der Spannungszeitfläche ein, sondern erst bei beginnender Sättigung.

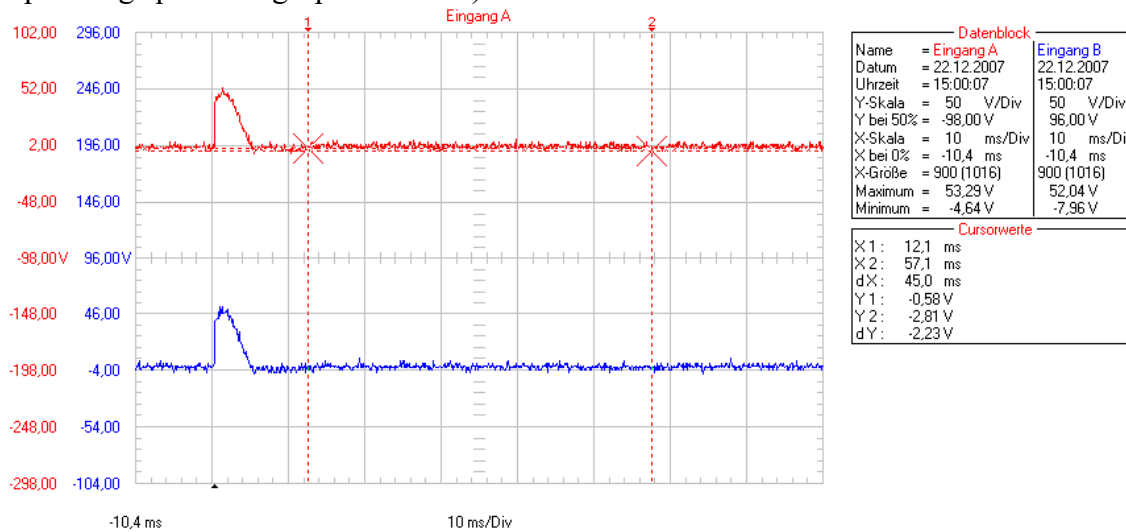
Wird der 100 VA Trafo hingegen nicht wie hier über einen Vorwiderstand, sondern an einem steifen NETZ mit 50 Hz und zu großer Spannung betrieben, so steigt dann bei Sättigung der Leerlaufstrom sehr stark an, es bleibt die Sekundärspannung jedoch immer noch ein treues Abbild der Primärspannung minus der Spannung die am R_i des Trafos abfällt. Der R_i ist bei einem 100 VA Ringkerntrafo ca. 6 Ohm. Der Trafo verhält sich ab dem Zeitpunkt der Sättigung eben nur wie einer ohne Eisenkern und da ist der Leerlaufstrom eben viel, viel größer. Natürlich würde dabei dann durch den hohen Leerlaufstrom von ca. 40A, am R_i vom Trafo ein großer Spannungsabfall entstehen.

Angenommen die Sicherung wäre dabei groß genug, so würde bei dem untersuchten Trafo von 100VA und 230V dann bei ca. 40A und 6 Ohm Trafo Primär R_i , die gesamte Netzspannung am R_i abfallen und damit den Strom begrenzen, sodass er nicht weiter ansteigt. Die Sekundärspannung würde dabei nur am Anfang der Primärspannung zu sehen sein, solange nicht die ganze Primärspannung am R_i abfällt. Der Magnetfluss steigt dabei aber nicht weiter an wie es jedoch in der Literatur zum Einschaltfall oft beschrieben steht.

Neue Untersuchung.

Anstatt wie bei den Messungen oben, die Primärspannung mit einer konstanten Gleichspannung über einen Vorwiderstand zu erzeugen, wird bei der nächsten Grafik gezeigt wie der Transformator reagiert, wenn über eine Konstantstromquelle ein Strom in die Primärspule eingespeist wird.

Bild 26, Messung an einem 1 kVA, 230 V Ringkern Trafo, bei **nicht** umgepolter Primärspule, also von der pos. Remanenz aus gemessen, mit pos. Konstantstrom von 12,4 mA parallel zur Diode siehe Bild 21 Trafo-grundl-2.bmp, siehe Seite 20 oben, eingespeist. (Nicht wie in de Bild 23 wo mit der 20V Spannungsquelle eingespeist wurde.)



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, vor dem 100 Ohm Vorwiderstand, Kanal B = U treib, das ist die Spannung direkt an der Primärspule.

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 $0,15\text{Vsec}$. ungefähr genau so groß wie im Bild 23, Trafo-grundlagen-14.

Es ist für den Aufbau der Induktion oder des Magnetfeldes also egal wie die Trafoprimärspule gespeist wird, ob 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.

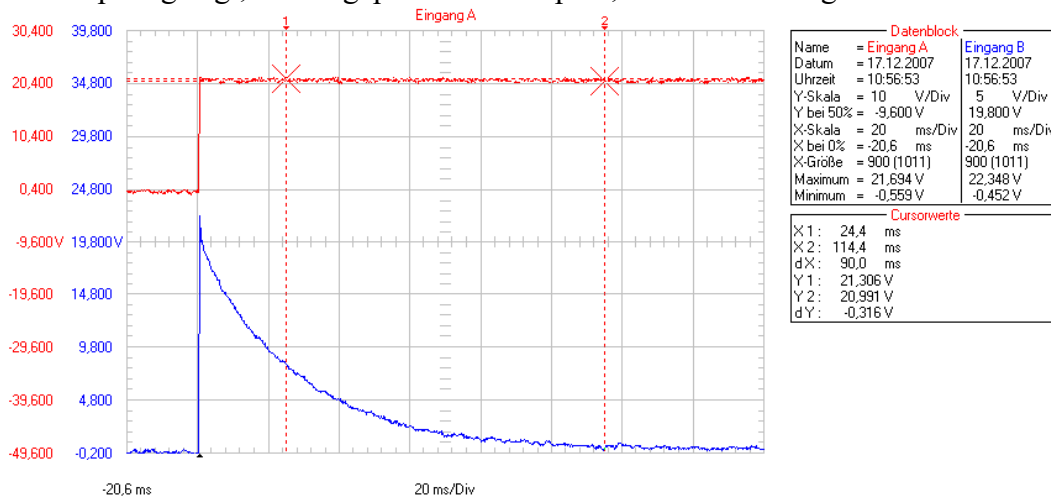
Durch die Hysteresekurve sind Spannungszeitfläche und Strom zu jedem Zeitpunkt, meint Lage von B auf der Hysteresekurve, mit einander verknüpft.

Da unser Stromnetz jedoch mit eingprägter Spannung 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.

Bild 27, Messung an einem 1 kVA, 230V Trafo mit geschweißtem Kern, der definierte Luftspalte hat.

Es wird wieder ein 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 pos. 20V Sprung, sonst wie Bild 18

Zu Bild: Trafo-grundlagen-25.png

Kanal A zeigt die Spannung vor dem Vorwiderstand und **Kanal B zeigt die Spannung Utreib 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, zum Aufladen der Luftspalte sofort ein zunehmender Strom fließt, der die Spannung hinter dem Vorwiderstand sofort zusammenbrechen lässt.

Die Fläche unter der **blauen Utreib im Bild 27**, von der neg. Rem aus gemessen, ist nur etwas größer als die Fläche unter **Utreib**, wenn von der positiven Remanenz aus gemessen wird, (hier nicht dargestellt), was darauf schließen lässt, **dass der Unterschied zwischen positiver und negativer Remanenzausgangslage gering ist**, die tatsächlichen Remanenzen also nahe null liegen müssen. Die Ursache dafür ist ein deutlicher Luftspalt im EI förmigen Eisenkern, was durch die Messungen hier beweisbar ist. Im Vergleich zu den Messungen Nr. 14 und 17 ergibt sich damit eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und der Wirklichkeit.

Die unten gezeigten 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.

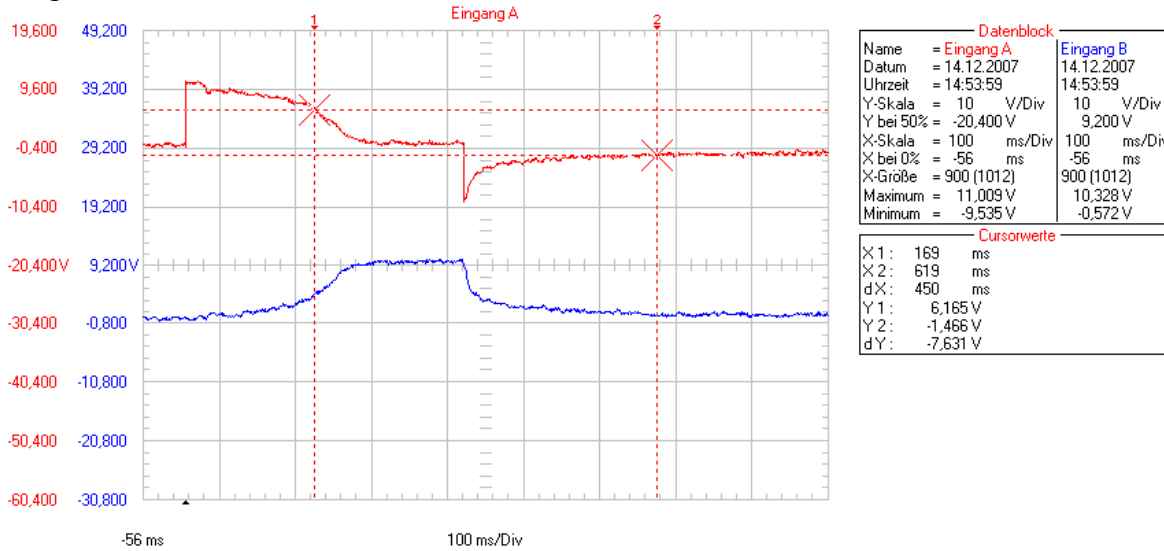
Siehe der Messaufbau Bild 28 unten.

Bild 28 = Bild 21 weiter oben,

Mit dieser Messanordnung wurden die gezeigten Bilder, Trafo-grundlagen-25.png, Trafo-grundlagen-14.png und Trafo-grundlagen-17 bis 19.png, gemessen.

Was der Eisenkern bewirkt:

Bild 29, 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.

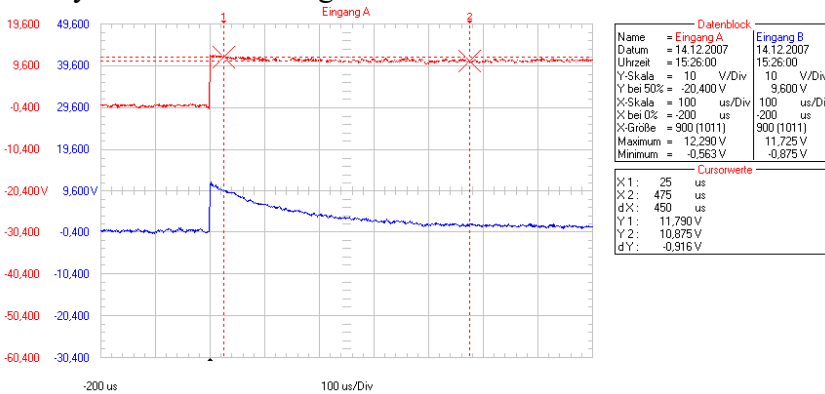


Trafo-grundl-6.bmp, wie 4 aber A=Utreib, B=U_{ri} prop I_{in}

Bild: Trafo-grundl-6.png

Kanal A Utreib, **Kanal B = U_{ri}**, **Spannung am Vorwiderstand**, (nicht U_{ri}). Mit 56 Ohm Vorwiderstand gemessen. Beim Umkehrpunkt der Hysteresekurve, fließen ungefähr 18mA peak. Durch den Luftspalt im Schnittbandkern ist die Hysteresekurve geneigt und es verläuft deshalb der Strom am Anfang nur in einer kurzen waagerechten Phase.

Bild 30, 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 U_{ri}.



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 29 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.

Vorteile des Ringkerntrafos:

Beim Ringkerntrafo ist im Bild 22: 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 Hysteresekurve durchlaufen wird. Bei **keinem** anderen Transformator ist der flache Stromverlauf so deutlich ausgeprägt.

Da dieser Trafokern 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 kaum erhöht.

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

Eine Berechnungs-Formel für H lautet: $H = I * L / (\mu_{r} * \mu_0 * A * N)$

Daran sieht man, dass I dann konstant ist, wenn L und μ_{r} auch konstant sind. Das H, ist siehe die Hysteresekurve mit Rechteck Charakter, ja auch konstant im senkrechten Ast der Hysteresekurve.

Beim Luftspulentrafo (gebildet aus dem Schnittbandkerntrafo, Bild auf Seite 6, ohne eingelegten 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. (Es muß ja auch kein Eisen ummagnetisiert werden.) 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 senkrechten Hysteresekurve abhängt, also ob von neg. oder pos. Remanenz aus, der Spannungs-Sprung auf die Spule gegeben wird. Ein kleiner Anfangs- Strom ist aber auch hierbei sofort festzustellen. Die lange waagerechte Phase der Utreib 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, er ist ein nötiges Übel. Er ist nur die Folge der Induktion des Trafoeisenkernes und damit ein Sekundäreffekt.

Der Magnetfluss Phi sieht die Last überhaupt nicht, wird auch nicht von ihr beeinflusst, wie durch Messung an einer Hilfswicklung zu sehen ist. Das steht leider ganz anders in den Lehrbüchern

Beobachtung: Wenn man auf einen gegebenen Trafo mit Anzapfungen auf der Primärseite, die gleiche Netzspannung auf eine höhere Windungszahl legt, dann sinkt der effektiv gemessene Primärleerlaufstrom bei der gleichen einwirkenden Spannungszeitfläche gegenüber dem Zustand zuvor an der Spule mit der kleineren Windungszahl. Der Grund ist die kleiner durchlaufene Hysteresekurve, was besonders an deren Enden weniger Blindstrom zeigt.

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, Frequenz-Änderung, Spannungsaussetzer, Lücken in einer Halbwelle und das Einschalten erleichtert.

Siehe unten das Bild31, TSEme012, welches die Wirkung von Spannungszeitflächen bei einem besonderen Sanfteinschaltverfahren zeigt, welches bei der Fraunhofer Gesellschaft vom Autor erfunden und für ihn patentiert wurde.

Eine spezielle Form der Beeinflussung von Transformatoren durch Spannungszeitflächen wird zum Sanfteinschalten mit dem **Trafoschaltrelais** angewendet.

Diese Trafo Sanfteinschalter werden seit fast 20 Jahren an über 900 Kunden weltweit vertrieben.

Bild 31

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

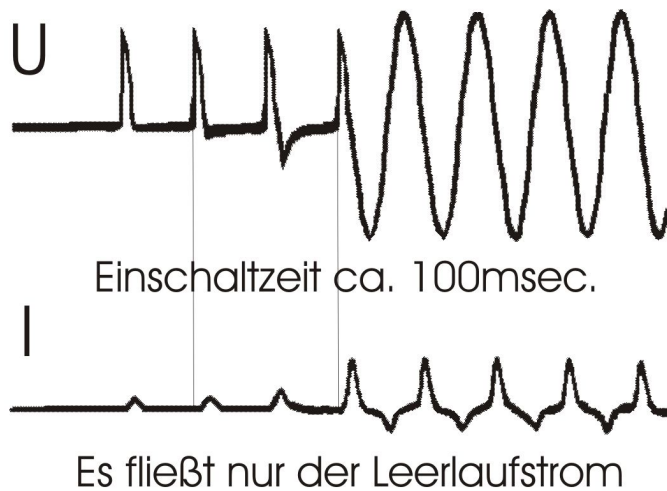


Bild: TSEme012.png

Die unipolaren Vormagnetisier-Spannungszeitflächen transportieren die Induktion mit jedem Spannungszeitflächen Stück, Schritt für Schritt in Richtung zum oberen positiven Umkehrpunkt der Hysteresekurve, worauf nach dem Erreichen des Umkehrpunktes im Anschluss sofort voll eingeschaltet wird. Dass es nur der Leerlaufstrom ist der dann fließt, ist an seiner typischen Strom-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 oder erniedrigt. (Wovon das Trafoprinzip und die Induktion lebt.)

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, aber nur für höhere Frequenzen), ist die Tatsache, dass man durch das Eisen nur einen bis zu 50000 mal kleineren Magnetisierungsstrom braucht als es ohne Eisen der Fall wäre. (Wenn das Myr = 50000 ist.)

Siehe Bild 28, Trafo-grundl-2.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. Inzwischen werden für die Bleche schon metallische Gläser verwendet, die noch geringere Ummagnetisierungs-Verluste als kalt gewalzter Stahl haben. Siehe das Datenblatt auf Seite: 22.

Dass dabei durch die im Mittelteil fast senkrecht verlaufende Hysteresekurve, die Spannungsübertragung nichtlinear würde und zu Verzerrungen führt, ist ein weiteres Märchen das der Lehre teilweise noch anhaftet, wie die Mitdiskutanten im Wikipedia es vertreten haben..

Noch einmal die Trafoauslegung:

Trafos werden bei der Berechnung so ausgelegt dass keine nennenswerte Sättigung im Eisen beim Nennbetrieb +10% Überspannung entsteht, aber doch den Induktionshub im Eisen voll ausnutzt. (Das Eisen soll möglichst nur im linearen Teil der Hystereseurve um- magnetisiert werden, damit keine großen Leerlaufströme fließen. (Genauer, keine Stromspitzen am Ende der Netzspannungshalbwellen entstehen.) Gesättigte Bereiche im Eisenkern verhalten sich nach außen wie dynamische, das heißt aussteuerungsabhängige Luftspalte genannt.)

Die Spannung U_1 , an der Primärspule, lässt sich mit folgender Formel berechnen.

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

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 der Magnetisierungsstrom nichtlinear ansteigend sehr groß, der Kern beginnt dann gesättigt zu sein, bei ca. 2,2 Tesla ist die volle Sättigung erreicht, dann muß zu einer weiterhin angelegten Spannung, also bei einer zu großen Spannungszeitfläche, die Luft des Kernvolumens aufmagnetisiert werden, wozu ein großer Magnetisierungsstrom benötigt wird. (Gesättigtes Eisen verhält sich wie Luft.)

Bei 2 Tesla wären das dann schon 16000A /cm, siehe die Kennlinie auf Seite 16. Und bei einer Spule für einen 5 kVA Trafo mit 60cm Feldlinienlänge und ca. 200 Windungen sind das dann 60cm mal 1600A pro cm / 200, weil 200 Windungen, = 480 A ein Strom den kein Haushalts Niederspannungs-Netz mehr aufbringen kann und kein für einen 5kVA Eisenkerntrafo normaler Größe nötigen, entsprechender Spulendraht mehr aushält. Also wird hiermit klar, dass es gar nicht vollkommen zur reinen Luftaufmagnetisierung im Trafokern kommen kann, weil vorher schon in der ersten Spannungshalbwelle eine 20 A Absicherung auslösen würde.

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 und Baugröße eines Trafos, sagt die obige Trafo Formel auf Seite 38 jedoch noch gar nichts aus, **weil der Last Strom darin nicht vorkommt**. Hier muss man die mittlere Stromdichte von ca. 2-4 A pro qmm Spulendrahtfläche für den zu übertragenden Strom bei gegebener Wärmeabfuhr im Kupferlackdraht und der ganzen Spule berücksichtigen.

Je größer also der Last-Strom und damit die zu übertragende Leistung sein soll, desto größer muß deshalb auch der Drahtquerschnitt sein, was bei der geforderten Anzahl von Windungen auf einer Spule, über die Amperewindungen entsprechend der Feldstärke in der Hystereseurve, dann die Spulen-Größe und damit die Trafo-Größe bestimmt.

Beim Auslegen, Berechnen, 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.

Wiederholung, siehe auch die Grafiken weiter oben. Wie groß ist die Spannungszeitfläche einer Sinushalbschwingung bei 230V, 50 Hz?

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 den Messkurven vom Ringkerntrafo herauslesen. Der Strom von 30mA peak entsteht in Bild 23 nach 2 millisecc. wenn vom pos. Remanenzpunkt aus der +20V Sprung gegeben wird. Der Strom von 30ma peak entsteht in Bild 22 nach 108 millisecc. 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 noch 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, aufgezwungene Spannung, in dieser Spule gleichzeitig eine Spannung induziert, welche die entgegengesetzte Richtung wie die treibende Spannung und fast die gleiche Größe hat, also zur treibenden Spannung eine Zwillingspannung darstellt, die nicht von der treibenden Spannung per Meßtechnik 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 und dieser Strom dann die Gegeninduktionsspannung erzeugt? Oder kürzer ausgedrückt: Der Induktionsstrom wirkt seiner Entstehungsursache entgegen, wirkt also dem Strom der von der treibenden Spannung ausgeht entgegen.

Das alles erscheint dem Laien sehr verwunderlich.

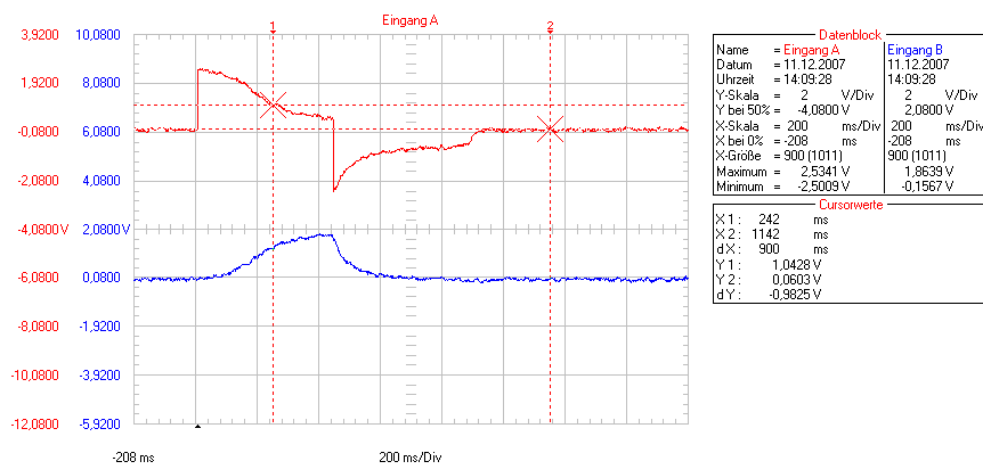
Die Messkurven sind dagegen viel einfacher zu verstehen.

Detaillierte Erklärung der Selbstinduktion, die das Lenzsche Gesetz benutzt:

Die induzierte Spannung tritt im gleichen Moment auf wie die von außen angelegte, induzierende Spannung. Sie tritt auch gleichzeitig mit gleicher Polarität an anderen von der Erregerwicklung getrennten Wicklungen auf dem Kern auf. Wobei man diese Gegeninduktionsspannung, also die induzierte Spannung dabei jedoch an der verursachenden Wicklung 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 schiebt 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 linear 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 28 erklärt. Beim Abschaltfall ändert sich die die Magnetisierungsrichtung und deshalb dreht sich dann die Spannung um. Was als Beweis der Selbstinduktionsspannung gilt.

Bild 32, Messung an einem 1kVA, 230V zu 230V geschachtelten EI Trafo, bei nicht umgepolter Primärspule, also immer von der pos. Remanenz aus gemessen, mit Ein- und gleich wieder Ausschalten der Spule.



Trafo-grundlagen-2.bmp, A=treib, B=Uri, nach Sprung Uangelegt.

Kanal B zeigt die Spannung am Vorwiderstand Rv, nicht am echten Ri.

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 Schaltplan Trafo-grundl-2 zu sehen ist, polt sich die Abschalt-Induktionsspannung um, was an der **Utreib** zu sehen ist. Der plus Spannungspfeil ist im Schaltbild Trafo-grundl-2 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 scheinbare Hochohmigkeit der Trafoprimärspule auf dem Eisenkern, 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 mit dem Oscilloscop zeitlich aufgelösten Ummagnetisierungsströme, abhängig von den Induzierenden Spannungszeitflächen, siehe die Messkurven 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 erst am Ende stark verändert, weil sich dann das Myr ändert. Im senkrechten Teil der Hysteresekurve 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 „Lgroß“ mit der untenstehenden Formel führt weiter, weil diese die große Induktivität, entsprechend dem senkrechten Teil der Hysteresekurve beschreibt.

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

N= Anzahl der Windungen.

Das Berechnen der Induktivität „Lklein“ mit der untenstehenden Formel führt weiter, weil diese die kleine Induktivität, entsprechend dem eher waagerechten Teil der Hysteresekurve beschreibt. Das μ_r wird dabei durch 1 ersetzt.

$$L_{\text{klein}} = N * N * \mu_0 * 1 * \text{Kernfläche} / 2 * \pi * \text{mittl. Kern Radius.}$$

N= Anzahl der Windungen. (μ_r ist gleich 1 gesetzt worden wegen der Sättigung.)

Man sieht am hohen μ_r von ca. 5000-50000, dass die Induktivität L innerhalb des Magnetisierens im senkrechten Ast groß ist und im fast waagerechten Ast mit $\mu_r = 1$ also 5000-50000 mal kleiner ist.

Die Funktionsweise des Trafos über die Stromwirkung zu verstehen ist ein schwieriges Unterfangen, weil der Magnetisierungsstrom sich innerhalb des Durchlaufens der Hysteresekurve stark ändert.

Wenn man dagegen den Trafo über die Wirkung der Spannungszeitflächen erklärt, wird das Verständnis sehr erleichtert.

Wie die alte Lehrmeinung vorherrscht zeigt die folgende Diskussion.

Auszug aus der Diskussion zum Artikel Transformator im Wikipedia vom Herbst 2012: Die Diskussion vom Dezember 2012 zeigt am besten, wie schwierig das Terrain ist.

Teilnehmer 1: (Vertritt die Lehrmeinung.)

Im unbelasteten Transformator fließt primär ein Leerlaufstrom. Bei dem idealen Transformator ohne Verluste ist das ein reiner Blindstrom mit 90° Phasenwinkel zur Spannung. Bei dem realen Transformator fließt aufgrund der Kupfer- und Eisenverluste zusätzlich ein Wirkstrom, der in Phase mit der Spannung ist. Die Messung oben scheint einen (kleinen?) Transformator, mit sehr hohen Leerlaufverlusten zu zeigen, der nicht unbedingt repräsentativ für einen durchschnittlichen Transformator ist. -- 12:22, 12. Nov. 2012 (CET)

Autor: Der relativ große Ringkerntrafo mit 1kVA ist im Gegenteil zu deiner Annahme sehr verlustarm. Was im Zitat vom Teilnehmer 1 nicht stimmt ist: Im idealen Transformator würde gar kein Magnetisierungs-Blindstrom fließen. In Wirklichkeit gilt: Beim verlustarmen Trafo fließt ein kleiner Magnetisierungswirkstrom und überhaupt kein Blindstrom, weil kein Luftspalt vorhanden ist. Der sich erhebende Strom am Ende der Spannungshalbwelle im Bild oben vom Ringkerntrafo rührt von der beginnenden Sättigung am Ende des Durchlaufens der Hysteresekurve her.

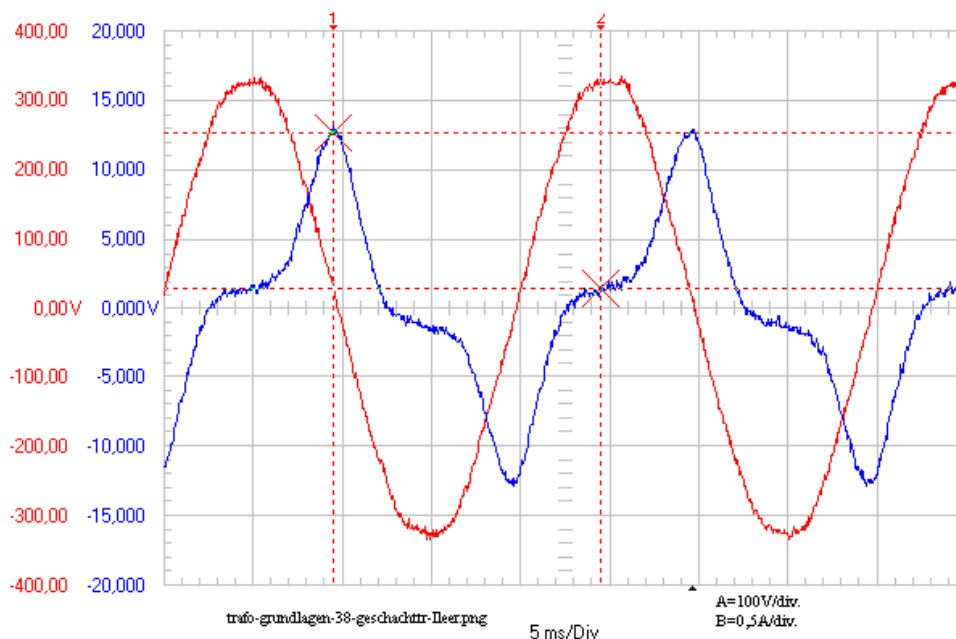
Der gemessene Ringkern-Trafo hat also überhaupt keine großen Verluste, du solltest auf den Strommaßstab schauen. Nur beim Ringkerntrafo sieht man sehr schön den Strom für die Ummagnetisierung, der bei einem Schnittbandkern, UI-Kern-Trafo oder EI Kern Trafo untergeht im Aufmagnetisierungsstrom für den Luftspalt. Siehe die Messkurven oben - 16:39, 12. Nov. 2012 (CET)

Kommentar des Autors: Meist wird der Magnetisierungsstrom bisher vereinfacht als Blindstrom gesehen. Ich unterscheide einerseits zwischen dem Um-Magnetisierungsstrom, der zusammen mit der Primärspannung die Ummagnetisierungsarbeit verrichtet, also der die Weisschen Bezirke im Eisen umklappt und andererseits dem echten Blindstrom der das H-Feld im (Rest) Luftspalt eines Kernes oder

mit einem definierten Luftspalt aufbauen muss. Leider werden beide Ströme oft in einen Topf geworfen, weil man dann damit besser und vereinfacht rechnen kann. In der Literatur steht ja durchaus, dass beim Trafo mit Eisenkern das Rechnen schwierig wird, wegen der Nichtlinearitäten durch die Hystereskurve. Der Um-Magnetisierungsstrom ist sehr wohl ein Wirkstrom, siehe die obigen Messkurven vom Ringkerntrafo, die grüne Kurve der Ummagnetisierungsleistung, wurde vom Oscilloscop in Echtzeit gemessen:

Man beachte den Stromverlauf in der Messkurve vom geschachtelten Trafo unten, der erst am Ende der Spannungshalbwelle sich deutlich bis auf 1,4A Peak erhebt. Diese Spitze ist der Blindstrom für das H im (Rest)Luftspalt*1, entsprechend der waagrecht werdenden Hystereskurve. Er ist bei einem geschachtelt Kern Trafo viel größer als bei einem Schnittbandkerntrafo, wegen dem viel größeren Luftspalt und hat dann eine spitz verlaufenden Form, und liegt symmetrisch zum Spannungsnulldurchgang siehe Bild unten:

Bild 9, Hier die Grafik einer **Spannungs-(rot)** und **Strommessung-(blau)** an einem 1kVA geschachtelten EI-kern Trafo im Leerlauf.



Autor: Das Bild oben zeigt Netzspannung und Leerlaufstrom von einem 1kVA EI-Transformator mit wechselseitig gestapelten Kernblechen schlechter Qualität. Hoher Leerlaufstrom von ca. 1 Aeff., der weniger durch die Ummagnetisierungsverluste als durch einen großen Blindstrom herrührt, hervorgerufen durch große Dynamische Luftspalte, wobei das Eisen dann Teilgesättigt wird am Ende jeder Spannungshalbwelle. Der Strom zum Aufbau von H im Luftspalt wird als Blindstrom in der folgenden Netzhalbwellen ins Netz zurückgegeben und belastet die Leitungen und den Trafo unnötig in dem er Wärme erzeugt.

Der Eisen-Ummagnetisierungsstrom, der am Anfang jeder Halbwelle fast waagrecht Verlauf der blauen Kurve unterschiedlicher Polarität, ist nur ca. 0,15A hoch, er liegt in Phase zur Spannung. Der Luftspaltaufmagnetisierungsstrom ist dagegen 1,4 A hoch, erst sein Scheitel liegt im Nulldurchgang der Spannung. 14:38, 23. Nov. 2012 (CET)

☞*1 : Als Restluftspalt bezeichnet der Autor einen bestimmten Bereich im Eisenkern des Trafos ohne diskrete Luftspalte, der bei beginnender Sättigung seine hohe Permeabilität verliert und deshalb einem scheinbaren Luftspalt gleichkommt, der jedoch erst beim zu großen Aussteuern der Hystereseurve am Ende jeder Spannungshalbwelle in Erscheinung tritt.

Diskussion im Wikipedia zu den Spannungszeitflächen.

Teilnehmer 1: Ja, aber Du hast nicht den Magnetisierungsstrom, sondern den Leerlaufstrom gemessen. Die Scheinleistung bei Deinem Ringkern hat eindeutig einen *rein positiven Anteil* (Verlustleistung) und einen Wechselanteil (Blindleistung zum Ummagnetisieren) , obwohl in Deinem Ringkern kein Luftspalt vorhanden ist. Nach Deiner Theorie hätte eine ideale Ringkernspule eine Induktivität von 0 H, da kein Luftspalt in ihr vorhanden ist. Beim geschachtelten Kern ist die Blindleistung freilich größer, wegen des Luftspaltes wie von Dir dargestellt. Das widerspricht aber nicht den Lehrbüchern und nicht der Tatsache, dass man auch für einen (idealen) Eisenkern einen Blindstrom braucht. Nov. 2012.

Autor: Schon der erste Satz vom Teilnehmer 1 ist falsch, denn der Leerlaufstrom setzt sich, wie aus seinem Verlauf ersichtlich, aus dem kleineren Ummagnetisierungsstrom, der in Phase zur Spannung liegt und dem größeren Strom für den Aufbau der Luftspaltemagnetfeldstärke zusammen. (Auch im Ringkern verhält sich das Eisen am Ende der Hysteresekurve als wenn es kleine und verteilte Luftspalte eingebaut hätte. Die Quelle kann ich nicht nennen aber ich habe es gelesen. Das erklärt sich jedoch alleine schon durch die Messkurven.)

Der Ummagnetisierungsstrom hat keinen Gleichanteil. Er hat unter der pos. Spannungshalbwelle einen pos. Betrag und unter der neg. Halbwelle einen negativen Betrag. Das sieht man ja auch aus der Magnetisierungsleistungskurve. Es ist aber gerade umgekehrt als du es behauptest. Aufgrund des kleinen Ummagnetisierungsstromes hat der Ringkerntrafo eine große Induktivität, die aber nichtlinear ist und zum Ende der Hysterekurve stark abnimmt. Du hast da wohl was verwechselt. Du solltest genauer hinsehen, dann merkst du, dass der Leerlaufstrom sich aus mehreren Komponenten zusammensetzt. Dem Ummagnetisierungsstrom, der einer Ummagnetisierungs-Verlust, = Arbeit, bedeutet und dem Strom für das H-Feld im Luftspalt, der im Kern annähernd verlustfrei ist, allerdings an dem R der Primärspule auch wieder Verluste hervorruft.-- 09:46, 12. Nov. 2012 (CET)

Bemerkung am 6.6.20: Der Leerlaufstrom ist der Magnetisierungsstrom und nicht nur ein Blindstrom. Da liegt Teilnehmer 1 ganz falsch.

Teilnehmer 2: Die ursprüngliche Fassung im Artikel ist für den realen Transformator aber falsch, ganz unabhängig von Messungen. Sie steht so garantiert auch nicht in Lehrbüchern. Es steht dort *ein Magnetisierungsstrom im Primärkreis, der von der Größe des induktiven Blindwiderstandes der Primärtrafosspule abhängt*. Diese Aussage vernachlässigt die wenige Punkte darüber eingeführten Verluste durch $R_{\sigma 1}$ und R_{Fe} . Die Aufstellung widerspricht sich also selbst. -- 23:00, 9. Nov. 2012 (CET)

Autor: Die bisherige Darstellung vereinfacht zu sehr, ganz richtig Janka.-- 16:40, 10. Nov. 2012 (CET)

Teilnehmer 1: Vielleicht sollte man bei dem betreffenden Satz nicht von "Magnetisierungsstrom" sondern von "Leerlaufstrom, der von induktivem Blindwiderstand und Eisenverlusten abhängt" sprechen? Magnetisierungsstrom macht doch eigentlich nur Sinn, wenn man die Verluste vernachlässigt, was "realen" Bedingungen aber widerspricht? -- 23:32, 9. Nov. 2012 (CET)

Autor: Wieder falsch. Leerlaufstrom ist der Ummagnetisierungsstrom, der fast in Phase zur Spannung ist plus dem Strom für die Aufmagnetisierung des Luftspaltes, der fast 90 Grad nacheilt zur Spannung, siehe meine Aussagen von heute weiter oben.-- 16:40, 10. Nov. 2012 (CET)

Teilnehmer 1: Nein, s.o.-- 18:18, 10. Nov. 2012 (CET)

Autor: Dein Satz oben: "Die Spannung an der Primärwicklung treibt einen Strom, **der sich ändernde Strom** erzeugt nach dem amperschen Gesetz einen sich ändernden Fluss, dieser wiederum eine induzierte Gegenspannung, die der angelegten Spannung entgegengerichtet ist. " Bei der Grafik von mir vom Ringkerntrafo weiter oben, siehst du sehr schön, wenn du überhaupt willst, dass sich der Strom gar nicht ändert während der Aufmagnetisierung unter der Spannungshalbwelle, nur die Spannungszeitfläche ändert sich stark. Deshalb stimmt die von Dir oben gemachte Aussage nicht. Ich kann das nur immer wieder betonen. Die Elektroniker sind da weiter, die den Übertrager für Schaltnetzteile schon lange mit der Spannungszeitfläche berechnen. -- 22:24, 10. Dez. 2012 (CET)

Bemerkung des Autors am 15.6.20: Eben genau die Aussage, dass sich der Strom ändert führt auf die falsche Fährte. Beim Ringkerntrafo ändert er sich nämlich nicht, nur die Spannungszeitfläche ändert sich.

Autor zu einem anderen Thema: Die Kurzschlussspannung hängt nicht nur von der Kernkonstruktion und der Lage der Spule zueinander ab, sondern auch vom ohmschen Widerstand der Spulen. Das ist doch eine Trivialität. Dass du da nicht selber draufkommst? Hast du die Kurzschlussspannung noch nie selbst an verschiedenen Trafos gemessen?-- 22:24, 10. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer 1: Selbstverständlich spielt der ohmsche Widerstand eine Rolle, genauso wie der Blindwiderstand. Nur die "Innenwiderstände zueinander" machten keinen Sinn. Hat sich aber dank Revertierung mittlerweile erledigt.-- 23:16, 10. Dez. 2012 (CET)

Autor: Wieso zueinander? Absolut ist es. Ein Trafo mit einem größeren R_i im Wickel hat doch eine größere Kurzschlussspannung als ein gleich großer und gleich gebauter Trafo mit dickeren Drähten und deshalb kleinerem R_i , natürlich wenn das Wickelfenster groß genug ist.-- 23:19, 10. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer 1: Die Spannungszeitfläche als mathematisches Konstrukt tut im Gegensatz zum physikalisch real existierenden Strom gar nichts. -- 23:16, 10. Dez. 2012 (CET)

Autor: Die Spannungszeitfläche existiert auch physikalisch real, genauso wie der Strom. Ich mache einen neuen Versuch die Sachlage zu erklären: Vielleicht solltest Du, Ihr, daran denken dass die Ummagnetisierung im Eisen weder vom Strom alleine noch von der Spannungszeitfläche alleine bewerkstelligt wird. Es ist die Ummagnetisierungsarbeit die das Ummagnetisieren ausführt. Also das Produkt von Spannung mal Zeit mal Strom, in Wattsekunden, sie erwärmt ja den Kern auch. Das hatten wir schon einmal mühsam diskutiert. Ihr habt das bisher nicht gesehen, weil bei Euch der Blindstrom für die Magnetisierung ja keine Arbeit verrichten kann, wegen seiner Phasenverschiebung um 90 Grad. Deshalb habe ich ja versucht Euch zu zeigen, mit meinen Messkurven, dass der Strom zum Kern Aufmagnetisieren, tatsächlich in Phase mit der Spannung ist. **Und Arbeit ist Spannung mal Strom mal Zeit.** Also kommt der Strom natürlich auch darin vor, er baut ja auch das Magnetfeld H im Eisenkern auf. Aber er ist es nicht alleine der die Magnetisierung erhöht oder umpolt im Eisen und dann die Gegenspannung hervorruft, wie Ihr bisher argumentiert habt. Ich denke darüber sollte nach der langen Diskussion endlich ein Konsens herrschen.

Für die Beurteilung des Trafos in Bezug auf Spannung, Überspannung, Induktionshöhe, Sättigung, Windungsbedarf, Kernflächenbedarf usw., ist der Magnetisierungs-Strom aber gar nicht nötig. Da genügt die Spannungszeitfläche. Siehe die Trafoformel, oben. Solange das nicht seinen Ausdruck im Wikipedia Transformator-Artikel findet werde ich das immer wieder anmahnen.-- 09:36, 11. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer 3: Das Induktionsgesetz funktioniert in beiden Richtungen. Die von Küpfmüller gewählte Erklärung ist eine, eine andere sagt, dass Fluss nichts anderes ist als Spannungszeitfläche. Wirkt eine solche auf eine Spule ein, entsteht im Kern genau der Fluss, der dieser Zeitfläche gleichkommt. Deswegen bedeutet eine Spannungseinprägung für eine gewisse Zeit an einer Spule immer auch eine Flusseinprägung in ihrem Kern. Dieser Zusammenhang gilt grundsätzlich für jede Anordnung, gleich ob als magnetischer Kreis, in dem der Fluss dann zu beobachten ist, ein Eisenkern, ein Holzkern, Luft oder Wasser oder sonst was zu finden ist. Natürlich braucht der Fluss ein Magnetfeld H und nur dieses hängt dann vom magnetischen Widerstand der Anordnung ab (d. h. ob Eisen oder Luft oder sonst was) und der Fluss zusammen mit dem Eigenschaften des Magnetkreises bestimmt dann den Strom. Natürlich kann man auch mit dem Strom anfangen, letzten Endes sind alle 3 Größen miteinander verknüpft. Aber praktische Gründe allein schon sprechen dagegen, weil der Strom allein ohne die Kerneigenschaften nichtssagend ist über den Fluss. Man müsste diese also immer vorher schon kennen und wenn dort dann auch noch Nichtlinearitäten auftreten, wie bei ferromagnetischen Kernen eigentlich immer der Fall, dann ist man hier schon am Ende. Dagegen ist die Beziehung Spannung $>$ Fluss absolut kernunabhängig und die Beziehung Fluss $>$ Sekundärspannung natürlich auch. Womit auch gleich erklärt wäre, dass die Übertragung der Spannung von Primär nach Sekundär immer unabhängig vom Kern und absolut kurvenformgetreu erfolgen muss. Sätze wie: "Also ich für meinen Teil glaube verstanden zu haben, wie

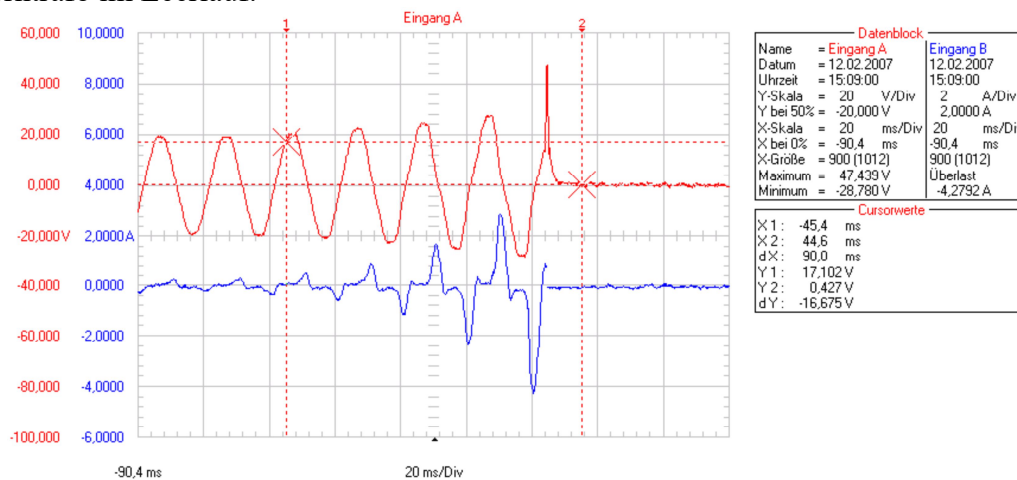
sich das mit den Rechteckwerkstoffen verhält. Was mich aber noch brennend interessiert: Für welche Transformatoren und weshalb werden solche Werkstoffe eingesetzt? Für "normale" Transformatoren, die eine Spannung einfach möglichst verzerrungsfrei transformieren sollen, sicher nicht. Dafür wären sie völlig ungeeignet, wie xy weiter oben schon anmerkte." solche Sätze, die sind Stuss, rühren aber daher, dass man immer wieder den Magnetisierungsstrom in den Übertragungsvorgang des Trafos miteinbeziehen will. MfG -- 23:17, 10. Dez. 2012 (CET)

Bemerkung des Autors am 6.6.20: Der Teilnehmer 1, der die Kerne mit rechteckigem Hysteresekurven-Verlauf für 50 Hz Trafos anzweifelt, siehe unten, versteht nicht, dass die Magnetisierung unterhalb der Sättigung des Kernes bleibt, also nur im senkrechten Ast der Hysteresekurve bleibt. Er glaubt die Kerne werden über die Sättigung hinaus betrieben. (Schulwissen genügt eben nicht.)

Teilnehmer 1:Nochmal: Ich habe keinen Bock mehr, das noch ein viertes mal auseinanderzusetzen. Wenn ich Stuss geredet habe, dann sag mir doch endlich mal wo ich einen Leistungstrafo mit Kern aus Rechteckwerkstoff kaufen kann! Gruß -- 23:25, 10. Dez. 2012 (CET)

Autor: Auch der Leistungstrafo hat Bleche aus Kornorientiertem Material die immer in Flussrichtung orientiert sind. Und wenn du von diesen Blechen die Hysteresekurve anschaust, dann ist sie nahezu rechteckförmig. Es gibt sie sogar schon aus Metglas, deren Kurven weiter oben zu sehen sind. Leider kommen dann aber die vielen kleinen Luftspalte an den Stößen dazu wenn der Kern fertig gelegt ist. Dann hast du natürlich keine Rechteckkurve mehr. Siehe die Kennlinie vom Trafo ohne Eisenkern. Beim Ringkern siehst du am Ummagnetisierungs-Strom aber am besten was im Eisen passiert, weil der störende Luftspalt und sein Aufmagnetisierungsstrom entfällt und erst am Hysteresekurven-Ende, der dann beginnenden Sättigung, das Blech sich so verhält als ob kleine verteilte Luftspalte verteilt im Kern eingebaut sind. (Solche Kerne baut man übrigens auch, wo diese kleinen Luftspalte definiert eingebaut sind.) Der Kern Ummagnetisierungs-Strom war dir bisher fremd. Du hast immer nur den Blindstrom gesehen, der aber vom Luftspalt kommt. Du wolltest auch die Magnetisierung im Eisen dann schlagartig umklappen lassen bei den Rechteckkernen. Du glaubtest auch das Myr sei unendlich beim Rechteckmaterial. USW. alles falsche Vorstellungen. Ich will mich aber nicht mehr wiederholen. Du kannst die Diskussion nachlesen. Aber das scheint dich nicht zu interessieren. Gruß, -- 09:36, 11. Dez. 2012 (CET)

Bild 10, Hier die Grafik einer **Spannungs-(rot)** und **Strommessung-(blau)** an einem 0,1kVA Ringkerntrafo im Leerlauf.



Trafotest-uebersp1.png, 100VA Ringkerntrafo im Leerlauf mit steigender Spannung gespeist. Am Ende löst die Absicherung von 1 A aus. Die Ströme aus den Hystereseverlusten steigen nicht. Nur der Blindstrom der in den Spannungsnulldurchgängen auftritt, steigt stark an und löst die Absicherung aus.

☞ Die Ummagnetisierungsströme, die in Phase zur Spannung liegen und während dem Anfang jeder Spannungshalbwellen zu sehen sind, werden kaum größer bei steigender Spannungshöhe, die Blindströme dagegen nehmen stark zu. (Die Spannungserhöhung wurde durch schnelles Drehen an einem 2kVA Stelltrafo erzeugt.)

Autor: Die Grafik zeigt die Reaktion vom Ringkerntrafo wenn er mit Spannungs-Zeitflächen beaufschlagt wird, die symmetrisch zunehmend immer größer werden.

Weshalb geht denn der Trafo am Ende der Spannungserhöhung in Sättigung und wirft sogar die Sicherung raus? Natürlich weil zu viel Strom fließt. Weshalb fließt zu viel Strom? Weil man ihn zu groß hat fließen lassen, wäre die Aussage der Verfechter der Stromtheorie. Das wäre dann aber nur möglich mit einer Netzsteckdose als programmierbare AC-Konstantstromquelle. So was gibts natürlich, ist aber nicht das was hier benutzt wurde und bei Netztrafos üblich ist.

Richtig ist: Die Spannungszeitflächen wurden wegen der steigenden Überspannung dem Trafo einfach zu groß, weshalb die Hystereseurve symmetrisch immer mehr zu weit angesteuert wurde und jedesmal mehr in die Sättigung gefahren wurde. Sieht man ja an der deutlichen Strom- Antwort am Ende jeder Spannungshalbwellen. Die Wahrheit tut manchmal weh und ist unbequem. Bitte, bitte erkläre es mir wie Ihr das anders seht, weshalb der Kern sonst hierbei in Sättigung geht!-- 10:03, 11. Dez. 2012 (CET)

Autor: Leider kamen auf meine Fragen nie Antworten, nur immer Gegendarstellungen, welche die Lehrmeinung vertreten. Ich glaube die Teilnehmer verstehen es nicht die Messkurven zu interpretieren.

Sie sind mit Formeln und nicht mit Oszilloscopen und Messtechnik aufgewachsen.

Frage von Teilnehmer 3: Magnetisierungsstrom, Wirkstrom oder Blindstrom, phasenverschoben oder nicht? Antwort: Hängt ab vom Kernmaterial. Eine Blindkomponente kommt immer, aber auch nur dann zustande, wenn die Mag.-Kennlinie eine Scherung aufweist. Was heißt Scherung? Es ist ein Luftspalt vorhanden im Kern oder es gibt kleine, verteilte Luftspalte. H muss immer proportional B sein. Der Idealfall ist eine Luft(spalt)kennlinie. Hier ist der Prop.-Faktor auch noch konstant, weil sich das μ_r nicht ändert über das H . Aber auch klassische Kernmaterialien wie Dynamobleche haben diese Eigenschaft, sodass die Aussage, dass nur Luft zu einer Blindstromkomponente im Mag.-Strom führt, falsch ist.

(Anmerkung vom Autor: Einschnürungen und die Korn Orientierung in manchen Blechbereichen quer zur Flussrichtung führen beim Aufmagnetisieren, steigendem B und H , früher als in den restlichen Bereichen des Blechs zu Teilsättigungen, die in der Wirkung einem Teilluftspalt gleichkommen. Also ist hier auch die Luft am Anstieg des H beteiligt.)

Bei Dynamoblech ist μ_r nicht mehr konstant, sondern abhängig vom Sättigungszustand, der Mag.-Strom ist deshalb kein Sinusstrom mehr, sondern verzerrt, er enthält aber trotzdem eine nicht unerhebliche Blindkomponente. Nun gibt es aber moderne Magnetwerkstoffe, deren Hystereseschleife einem Rechteck sehr nahe kommt. D. h. die Feldstärke H zum Auf- u. Abmagnetisieren ist nahezu konstant und unabhängig von B . Der Remanenzpunkt von B liegt praktisch auf gleicher Höhe wie das B bei Beendigung des Aufmagnetisierungsvorganges (soweit man unterhalb der Sättigungsgrenze bleibt) oder dem B im Nullpunkt der Kurve. Aus dieser Kerneigenschaft ergibt sich ein nur geringer Um-Mag.-Strom, der mit der Spannung weitgehend in Phase ist, der damit ein reiner Wirkstrom ist und der nur noch für die Ummagnetisierungsverluste steht. Der Strom, der nicht phasenverschoben ist, hat auch

keine Blindstromkomponente, was bedeutet, dass so ein Gebilde auch keine Blindleistung speichern und wieder abgeben kann.

Ich sehe Euch alle schon Kopfschütteln, aber es ist so. Und fast alle heute üblichen Leistungstransformatoren haben solche Kerne, insofern ist dies auch kein rein akademisches Problem. Paradebeispiel ist der praktisch luftspaltlose Ringkerntrafo, bei dem man diese Verhältnisse fast astrein vorfindet. Bei den gewickelten Kernmaterialien handelt es sich um kaltgewalzte Eisen-Siliziumlegierungen, die in Walzrichtung magnetisiert solche Eigenschaften haben, wenn auch nicht als exakte Rechteckschleife, so doch in sehr guter Annäherung an ein Rechteck. Deswegen ist die Aussage: "der Mag.-Strom ist ein Sinusstrom, der der Spannung um 90° nacheilt..." eben ein Märchen, das nur gelegentlich wahr ist und vielfach falsch. Der Grund, warum dieses Märchen so oft in Lehrbüchern zu finden ist, ist ganz einfach: Als die Lehrbücher geschrieben wurden, hat es solche modernen Kerne noch nicht gegeben und neuere Lehrbücher sind zu oft von alten abgeschrieben. Also ein echtes Dilemma. In Wiki darf nicht ganz ohne guten Grund nur stehen, was in den Lehrbüchern steht und diese sind hier, gelinde gesagt nicht ganz vollständig bzw. etwas zu ungenau. Jeder, der z. B. den Mag.-Strom eines Ringkerntrafos (ev. bei etwas reduzierter Spannung) mit dem Oszi anschaut, stellt fest, dass nix Sinus, nix 90° , sondern ganz anders der Leerlauf-Strom aussieht. Deswegen wäre es schon angebracht, den Wikitext den echten Verhältnissen etwas besser anzupassen, wenngleich ich zugestehe, dass die Zusammenhänge fast zu kompliziert sind um sie mit einem Satz zu erschlagen. MfG -- ([Diskussion](#))
19:23, 12. Nov. 2012 (CET)

Autor: Was mich aber sehr wundert: Scheinbar können nur Teilnehmer 3 und ich meine gemessenen Kurven von Spannung und Strom am Trafo richtig interpretieren. Sonst würde es hier nicht diese lange Diskussion geben. Aber leider diskutieren die Blockierer gar nicht mit und beantworten auch meine Fragen nicht. P.S. Teilnehmer 3 weiss das sicher auch ohne meine Messungen, ich versuche es mit den Messungen aber den Blockierern zu beweisen. P.S. Ein Ringkerntrafo der übersteuert wird, also eine zu große Spannungszeitfläche bekommt und dann den Kern Sättigt, verhält sich ab da, also am Ende der Hysteresekurve, wie eine Luftspule, das Eisen ist dann scheinbar nicht mehr vorhanden und der Strom ist dann ein Blindstrom, der aber auch nicht sinusförmig ist. Es gibt also mehrere Betriebszustände am guten-" Ringkerntrafo, die jeweils andere Stromkurvenformen verursachen.

Autor: Frage was ist jetzt ihr Herren Mitdiskutanten? Blockiert ihr weiter oder zeigt ihr euch bemüht die Lehre zu verbessern? Ich sage es immer wieder und wieder: Das WIKI wird von Studenten zuerst gelesen, bevor sie ein Fachbuch öffnen. Sollen sie denn weiterhin das Falsche lernen? Es kommt mir fast so vor wie vor hunderten von Jahren, als man glaubte: Die Erde ist eine Scheibe und die Sonne dreht sich um die Erde.- 13. Nov. 2012 (CET)

Teilnehmer 2: Du scheinst die falsche Vorstellung zu haben, dass es bei einem Eisenkern keinen Blindstrom gibt, sondern nur in Luft? Natürlich erhöht der Eisenkern den Blindwiderstand und reduziert den Blindstrom. Und ein Netztrafo (sinusförmige Spannung) wird natürlich im möglichst linearen Teil seiner Magnetisierungskennlinie betrieben. Eine "rechteckige" Kennlinie würde zu extremen Verlusten führen, weil der Kern ständig in der Sättigung wäre.

(Anmerkung des Autors: das kommt davon, dass man nur mit dem Strom denkt und nicht mit der Spannungszeitfläche, die durchaus genug Zeit hat den Kern Um- und Auf zu magnetisieren, bevor er am Ende der Hysteresekurve beim „Rechteckkern“ in Sättigung geht, denn dann kommt ja schon wieder die gegenphasige Spannungszeitfläche.)

Wenn der Eisenkern gesättigt ist, steigt nicht nur der Blindstrom extrem an, sondern auch die Kupferverluste steigen mit dem Quadrat des Blindstroms und verursachen einen Wirkstrom, der die Wicklung zum Glühen bringt. Hast du einmal die Induktivität der Primärwicklungen deiner Transformatoren gemessen und daraus den Blindstrom berechnet? Bei einem Transformator mit Luftspalt ist natürlich die Induktivität kleiner und der Blindstrom größer. Bitte erst einmal die bekannte Theorie richtig anwenden. Wenn es in den letzten Jahrzehnten sensationelle Neuentwicklungen bei Netztransformatoren gegeben hat, die eine neue Theorie erfordern, sollte sich dafür doch sicher eine Quelle oder sogar ein Fachbuch finden lassen. -- ([Diskussion](#)) 12:29, 13. Nov. 2012 (CET)

Autor: [@Teilnehmer 2](#), kannst du meine Messungen nicht interpretieren? Siehst du da einen großen Blindstrom beim Ringkerntrafo? Es sind 26mA eff. beim 1kVA Trafo. Eine Rechteckige Hysteresekurve meint natürlich eine ganz schmale senkrecht verlaufende mit kleinem H und großem B und da H dem Strom proportional ist, ist dieser dann eben klein. Du hast wohl mit rechteckiger Kurve die eines Dauermagneten im Sinn mit großem Koerzitivfeld, großes H. Ich wäre dir sehr dankbar wenn du ein neues Fachbuch darüber finden und mir nennen würdest. Natürlich habe ich einen Trafo berechnet. Und wenn dann herauskommt dass der Leerlaufstrom sinusförmig ist, dann scheint die Rechnung nicht zu stimmen, denn die Messung zeigt die Wirklichkeit. (*nicht signierter Beitrag von Emeko* ([Diskussion](#) | [Beiträge](#)) 14:21, 13. Nov. 2012)

Bemerkung des Autors am 6.6.20: Natürlich darf der Recheckkern nicht bis zum Maximum angesteuert werden. Er ist auch in Netztrafos nicht praktikabel, weil dieser bei DC Offsets sofort in Sättigung geraten würde. Mit der Spannungszeitfläche einer Halbwelle, wird der Kern vom neg. Umkehrpunkt zum pos. Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve um-magnetisiert.

Große Trafos haben auch immer einen kleinen Luftspalt im Kern und übertragen Netzspannungsanomalien deshalb ohne weiteres.

Teilnehmer 3: [@.....](#): Ich dachte nicht dass die Diskussion an dieser Stelle wieder aufbricht. Das hatten wir doch alles schon mal und deswegen ist im Artikel das Grundprinzip so erklärt: *Eine Wechselfeldspannung auf der Primärseite des Transformators erzeugt aufgrund der elektromagnetischen Induktion einen wechselnden magnetischen Fluss im Kern. Der wechselnde magnetische Fluss wiederum induziert auf der Sekundärseite des Transformators eine Spannung (Spannungstransformation)*. Um diesen Satz wurde lange gestritten, aber nur so funktioniert der Trafo.

Der gedankliche Fehler, der Euch unterläuft und da seid Ihr in bester Gesellschaft, liegt darin, dass Ihr davon ausgeht, dass man dem Trafo einen Mag.-Strom einprägt. Dem ist aber nicht so. Dem Trafo wird über das Netz oder was auch immer eine Spannung eingepreßt. Der Fluss muss der Spannung folgen als Zeitintegral der Spannung (Fluss ist nichts anderes als die Spannungszeitfläche der anliegenden Spannung). Die Spannung selbst ist proportional zur Geschwindigkeit mit der sich der Fluss ändert ($U = d\phi/dt$). Da kann die Mag.- Kennlinie unendlich steil sein, da "klappt" nichts um, der Fluss kann sich nur ändern, wie es der Spannungsverlauf vorgibt. Der Strom ist dann eine Folgeerscheinung des Flusses und des Magnetisierungsweges, den der Fluss nehmen muss. Ist der Mag.-Widerstand dort groß (z. B. Luft), ist auch der Mag.-Strom groß und umgekehrt. Ist der Mag.-Widerstand nichtlinear, ist der Strom verzerrt (bei einer Hysterese). Die Kausalkette für den Magnetisierungspfad heißt Spannung>>Fluss>>Strom, wobei die erste Verknüpfung eine sehr unmittelbare ist, während bei der 2. der Mag.-Widerstand des magnetischen Kreises noch eine Rolle spielt. Für die Spannungsübertragung heißt die Kausalkette Prim.-Spannung>>Fluss>>Sek.-Spannung.

Ein Magnetisierung mit eingepreßtem Strom ist natürlich denkbar, aber dann sieht das Ergebnis ganz anders aus, da bliebe kein Stein auf dem anderen. Führt aber hier zu weit. Wir kommen vom Thema ab.

MfG --..... (Diskussion) 20:25, 2. Dez. 2012 (CET) (Bem. Des Autors am 6.6.20: die Spannung an den Spulen wäre dann selbst bei sinusförmig eingepprägtem Strom dann überhaupt nicht sinusförmig.)

Teilnehmer 2: Frag einfach Deinen Gymnasiasten aus dem Physik-Lk. Er wird Dir bestätigen können, dass ein B-Feld immer von einem Strom induziert wird. Die eingepprägte (Netz)speannung erzeugt einen Strom, der wiederum erzeugt den Fluss. Quelle: Jedes Buch über Grundlagen der E-Technik. "Die Spannung selbst ist die Geschwindigkeit mit der sich der Fluss ändert ($U=d\phi/dt$)", dass gilt für die **induzierte** Spannung, nicht aber für die eingepprägte Spannung. Die Diskussion führt zu nichts. Bitte Belege, dann sehen wir weiter.--... (Diskussion) 22:43, 2. Dez. 2012 (CET)

Bemerkung am 6.6.20: der Gymnasiast lernt ja auch nur das Falsche was in den Lehrbüchern bisher steht.

Teilnehmer 1: Du schreibst oben: ""Die Spannung selbst ist die Geschwindigkeit mit der sich der Fluss ändert ($U=d\phi/dt$)", dass gilt für die **induzierte** Spannung, nicht aber für die eingepprägte Spannung." Die Wirkung geht doch von der eingepprägten Netzspeannung aus, die den Fluss erzeugt und damit auch die Gegeninduktionsspeannung. Ausserdem kannst du jede Gleichung auch rückwärts lesen. ($U=d\phi/dt$) oder ($d\phi/dt = U$) ohne dass sie aus dem Gleichgewicht käme.-- 3. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer 3: Lies mal nach bei Küpfmüller. Nur ein kurzes Zitat: "Bei Leerlauf der Ausgangsklemmen stellt sich nach dem Induktionsgesetz, Gl. ...zu jedem Zeitpunkt ein solcher magnetischer Fluss ein, dass die Selbstinduktionsspeannung gerade gleich der Eingangsspeannung U_1 ist (Spannungsgleichgewicht). Daraus folgt für den Fluss ϕ_1 .".. dann kommt die Trafogleichung $U=f(\phi)$. Der Mag.-Strom kommt erst später als folge des Flusses. Usw. Usw. Noch Fragen? MfG-- ... (Diskussion) 23:24, 2. Dez. 2012 (CET)

Autor: Belege, Zitate, gibt es zuhauf, nur jeder legt sie aus wie er will. Wieso geht denn keiner auf meine Messkurven ein, die genau beweisen was im Trafo passiert? Versteht Ihr sie nicht oder ist es euch zu mühsam? Auch wenn sie nicht in den Artikel dürfen, weil sie noch nicht in einem Professoren Buch stehen, sind meine Messkurven gültig. Hängt das Verstehen einmal gedanklich an der Ummagnetisierungsarbeit im Eisen auf, über die wohl inzwischen Einvernehmen herrscht. Die Arbeit für das komplette Ummagnetisieren des Eisens vom neg.B Umkehrpunkt zum pos. B Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve in einer Halbwelle der Netzspeannung ist bekanntlich Leistung mal Zeit, also Volt mal Ampere mal die 10 msec., bei 50Hz. Die Leistung ist die grüne Messkurve in der Grafik die schon am Anfang dieser ganzen 6 wöchigen Diskussion stand. Die Arbeit ist die Fläche darunter. Einverstanden? Ohne die Spannung würde sich nichts ummagnetisieren. Dass die Ummagnetisierung Zeit braucht, zeigen die letzten beiden Grafiken oben. Je höher die Spannung, desto kürzer die Zeit. Jede Primärwicklung eines bestimmten Kernes, hat ihre eigene Spannungszeitfläche für die Ummagnetisierung, egal ob die Spannung hoch und die Zeit kurz ist oder umgekehrt. Dass sich die Ummagnetisierung im Eisen nicht nach dem Strom richtet, sieht auch man daran, dass bei Anwesenheit eines Luftspaltes der Strom stark ansteigt über die Halbwelle, beim Ringkern aber fast waagrecht bleibt. Siehe der Vergleich mit der Grafik vom Schnittbandkern mit dem gleichen Material wie im Ringkern. Der Strom für das Eisen alleine bleibt bei steigender

Spannungszeitfläche und steigendem Φ und B fast konstant. Deshalb kann es doch nur einen ursächlichen Zusammenhang von Flussstärke oder Flussdichte B im Eisen zur Stromstärke über die Hysteresekurve geben. Beweis ist auch das fast konstante Feld bei der Aufmagnetisierung, sichtbar an der fast senkrechten Hysteresekurve. Der Zusammenhang von steigendem Magnetfluss Φ und steigender Stromstärke wurde bisher durch den steigenden Luftspaltblindstrom fälschlicherweise für das Eisen angenommen. Hier liegt der Hund begraben in den 100 Büchern der Literatur, die ihr als Belege habt. Der Zusammenhang von B und H und damit Strom wird durch die Form der Hysteresekurve gezeigt. Und beim Rechteckkern ändert sich das B hauptsächlich durch die steigende Spannungszeitfläche, kaum durch ein größer werdendes H , das stromproportional ist. Alles klar? Ich werde als Konsequenz aus dieser Diskussion einen Lehrgang verfassen über die Zusammenhänge im Trafo von B , H , Φ , M , U , I , t , usw. und ihn auf meine Homepage stellen. Aber das dauert. Ich denke ich weiß jetzt wie ich das schreiben muss. Ich biete jedem Diskussionspartner hier an, mit mir bidirektional in Kontakt zu treten um sich 1:1 auszutauschen. Entweder über meine Benutzerseite oder per E-mail. Da ich nicht unter Pseudonym schreiben dürfte es nicht schwer sein meine Adresse zu finden.--Emeko (Diskussion) 09:50, 3. Dez. 2012 (CET)Korr.-- (Diskussion) 17:35, 8. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer 5: Die Idee, einen Lehrgang zu verfassen, finde ich sehr sinnvoll. Dazu empfehle ich [das passende Schwesterprojekt](#). --..... (Diskussion) 10:35, 8. Dez. 2012 (CET)

Fazit aus der Diskussion: Die Materie ist schwierig und erfordert viel Geduld. Vorurteile oder falsch Gelerntes lassen sich schwer ausräumen. Einfacher wird es wenn man folgende Regeln beachtet und die gezeigten Messkurven richtig interpretiert.

Letzte Version vom 24.01.2013 emeko.
Ergänzt und korrigiert am 14.6.2020 emeko

Quellen: Alle Bilder und GRAFIKEN, außer dem Bild 1, von Faradays Erfindung, stammen aus eigenen Quellen des Verfassers dieses Berichtes.

Weitere Infos unter:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Emeko>

oder im

Wikipedia-Artikel: Transformator

oder im

Wikipedia-Artikel:Transformatorschaltrelais,

Oder auf www.emeko.de

Siehe dort auch unter:

Wissenswertes/ Trafo Physik/ 21-Trafo-energieübertragung.pdf