

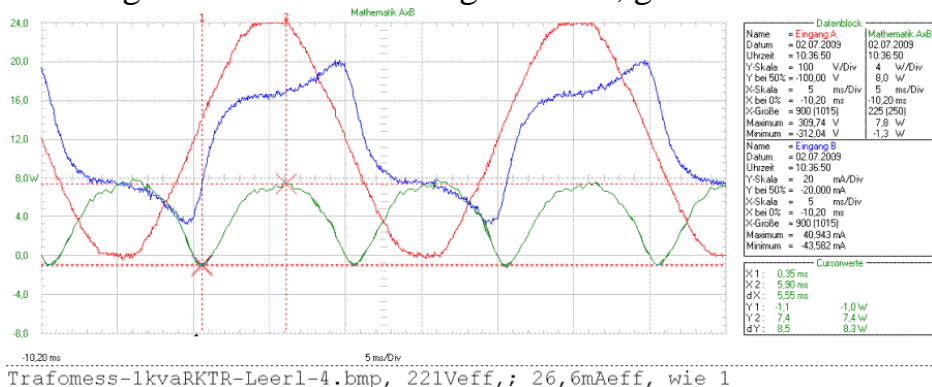
Trafo Grundlagen, Betrachtung der Magnetisierung mit Spannungs-Zeitflächen.

Inhalt:

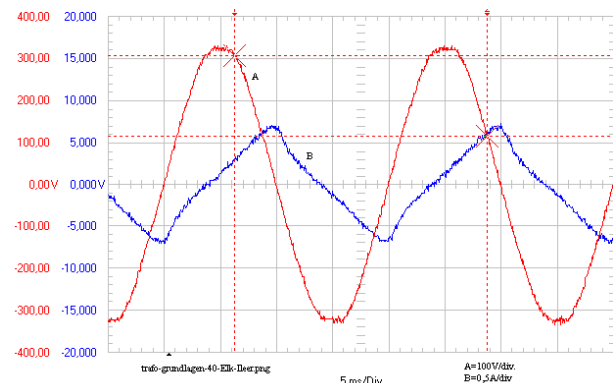
- Seite 01: Messkurven für Diskussion:
- Seite 2-4: Diskussion aus dem Wikipedia Transformator Artikel.
- Seite 5-6: Fragen und Definitionen zu Magnetischen Größen und Begriffen.
- Seite 07: Zusammenhang zwischen Spannungszeitfläche, Hysteresekurve und Magnetisierungs-Strom.
- Seite 08: Zusammenhang zwischen Spannungszeitfläche, Hysteresekurve und Magnetisierungs-Strom
- Seite 09: Hysteresekurve von Ringkerntrafo
- Seite 10: Messkurve von Ringkerntrafo bei Überspannung.
- Seite 11. Magnetisierungskennlinie, keine Hysteresekurve, von Luft.
- Seite 11-12 Messkurven Ringkerntrafo.
- Seite 13: Definition und Grafik von Spannungszeitfläche einer Sinus- Spannungskurve.
- Seite 14: Messschaltung zur Beeinflussung von Trafo mit Spannungszeitflächen
- Seite 15-20 Messkurven von Beeinflussung von einem Ringkerntrafo mit dc Spannungszeitflächen.
- Seite 20: Was der Eisenkern bewirkt
- Seite 20-24: Erklärungen und Trafoauslegungsregeln.

Messkurven als Diskussionsgrundlage:

Messung an einem 1 kVA Ringkerntrafo, grüne Kurve = Ummagnetisierungsleistung



. Man beachte den Stromverlauf, der blauen Kurve, die erst am Ende der Spannungshalbwelle sich hebt. Diese Spitze ist der geringe Blindstrom für das H, bei beginnender Sättigung im kern, ich sage dazu im Austeuerung abhängigen Restluftspalt, entsprechend der waagrecht werdenden Hysteresekurve. Er ist bei einem geschachtelten Kern Trafo viel größer, wegen dem größeren Luftspalt und hat dann einen fast Dreieckigen Verlauf, siehe die Grafik unten.



Es geht um die Anwendung der Sichtweise, dass die Spannungszeitflächen den Magnetfluss im Trafokern treiben, bzw. auf und abbauen und der dazu nötige Strom sich je nach den Gegebenheiten einstellt.

Auszug aus der Diskussion zum Artikel Transformator im Wikipedia vom Herbst 2012:

Autor zu Teilnehmer 1: Dein Satz: "Die Spannung an der Primärwicklung treibt einen Strom, **der sich ändernde Strom** erzeugt nach dem ampereschen 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 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. (Diskussion) 22:24, 10. Dez. 2012 (CET)

Autor zu Teilnehmer1: Noch ein Angebot zum Nachdenken: Was passiert beim Trafo der für 60 Hz ausgelegt ist, der dann aber nur mit 50 Hz betrieben wird. Er zieht mehr Strom. Was für Strom, es ist der Sättigungsstrom, der am Ende der Spannungshalbwelle zum Fließen kommt. Und warum tut er das? Weil die Spannungszeitfläche zu groß ist für die Spulen- und Kernausslegung. Das ist also nicht der Strom der die Sättigung macht. Er zeigt sie nur an. Was beweist das? Sicher nicht, dass der Strom den Magnetfluss Φ alleine aufbaut, sondern die Spannungszeitfläche es mit dem Strom zusammen tut. 10. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer1: Die Spannungszeitfläche als mathematisches Konstrukt tut im Gegensatz zum physikalisch real existierenden Strom gar nichts. -- 10. Dez. 2012 (CET)

Autor zu Teilnehmer 1: Die Spannungszeitfläche existiert auch physikalisch real, genauso wie der Strom. Schon Faraday, der Erfinder des Trafos, hat sie im Rahmen seiner Beobachtungen als Spannungsstoß bezeichnet. 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. Sie erwärmt ja den Kern auch. Das hatten wir 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 auf. Aber er ist es nicht alleine der die Magnetisierung erhöht oder umpolt im Eisen, 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 als Ursache gar nicht nötig, er ist vielmehr die Antwort des Trafos. Für die Beurteilung des Trafos bei seinen Betriebszuständen ist die Spannungszeitfläche am geeignetsten. Siehe die Trafoformel. Solange das nicht seinen Ausdruck im Artikel findet werde ich das immer wieder anmahnen.-- (Diskussion) 09:36, 11. Dez. 2012 (CET)

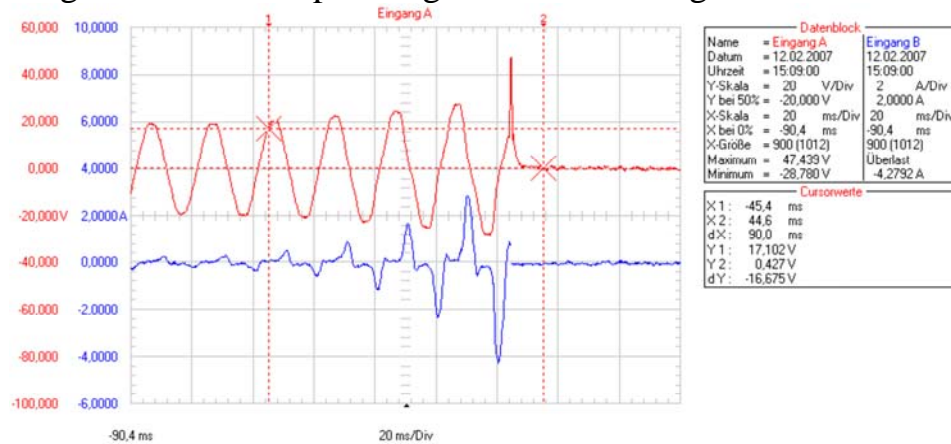
Teilnehmer 3 zu Teilnehmer 1: Es ist kein Stuss, sondern genau so ist es. Das Induktionsgesetz funktioniert in beiden Richtungen. Die von Küpfmüller gewählte Erklärung ist eine, eine andere sagt , dass Fluss nichts anderes ist als Spannungszeitfläche. Wirkt eine solche auf eine Spule ein, entsteht im Kern genau der Fluss, der dieser Zeitfläche gleichkommt. Deswegen bedeutet eine

Spannungseinprägung 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 den 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 zu kennen nichtssagend ist über den Fluss. Man müsste diese Kerneigenschaften 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 Teilnehmer 2 weiter oben schon anmerkte." solche Sätze, die sind Stuss, rühren aber daher, dass man immer wieder den Magnetisierungsstrom in den Übertragungsvorgang miteinbeziehen will. MfG -- 10. Dez. 2012 (CET)

Teilnehmer1: 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 -- 10. Dez. 2012 (CET)

Autor zu Teilnehmer 1: Auch der Leistungstrafo hat Bleche aus Kornorientiertem Material die immer in Flussrichtung orientiert sind. Und wenn du von diesen Bleche 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 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. Dieser Kern Ummagnetisierungs-Strom war dir bisher fremd. Du hast immer nur den Blindstrom gesehen, der aber vom Luftspalt kommt. Du wolltest auch die Magnetisierung 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, - 11. Dez. 2012 (CET)

Zu groß werdende Spannungszeitflächen bringen den Trafo in Sättigung.



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.

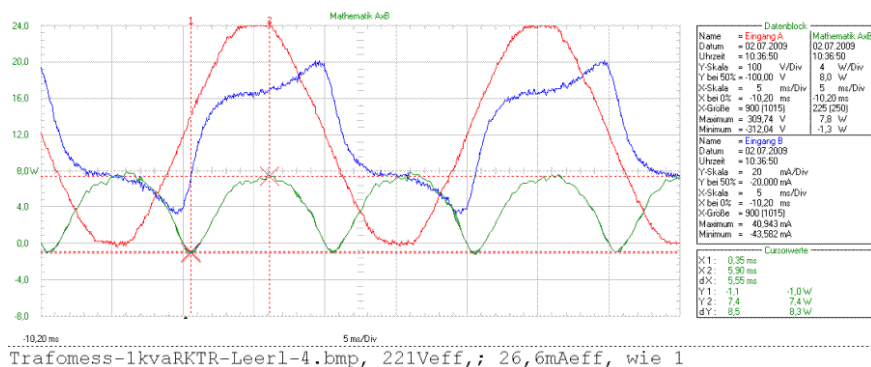


Autor: Die Grafik zeigt die Reaktion von Ringkerntrafo wenn er mit steigender Spannungs-Zeitfläche beaufschlagt wird, die symmetrisch immer größer werden.

Weshalb geht denn der Trafo am Ende 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. Sowas gibts natürlich ist aber nicht das was hier benutzt wurde. Richtig ist: Die abwechselnd neg. und pos. Spannungszeitflächen wurden wegen der steigenden Überspannung dem Trafo einfach zu groß, weshalb die Hysteresekurve symmetrisch, immer mehr zu weit angesteuert wurde und jedesmal mehr in die Sättigung gefahren wurde. Die Wahrheit tut manchmal weh und ist unbequem. Bitte, bitte erklärt es mir wie Ihr das seht, weshalb der Kern hierbei in Sättigung geht!!- 11. Dez. 2012 (CET)

Kommentar des Autors: Meist wird der Magnetisierungsstrom vereinfacht als Blindstrom gesehen. Ich unterscheide jedoch zwischen dem Um-Magnetisierungsstrom, der die Ummagnetisierungsarbeit verrichtet, also der die Weisschen Bezirke im Eisen umklappt und dem Blindstrom der das H-Feld im Luftspalt aufbauen muss. Leider werden beide Ströme oft in einen Topf geworfen, weil man dann damit besser rechnen kann. In der Literatur steht ja durchaus, dass beim Eisenkern das Rechnen schwierig wird, wegen der Nichtlinearitäten durch die Hystereskurve. Der UM-Magnetisierungsstrom ist sehr wohl ein Wirkstrom, siehe das Bild, die grüne Kurve der Ummagnetisierungsleistung, vom Scope gemessen:



Messung an einem 1 kVA Ringkerntrafo, grüne Kurve = Ummagnetisierungsleistung

Man beachte den weiteren Stromverlauf, der erst am Ende der Spannungshalbwellen sich hebt. Diese Spitze ist der geringe Blindstrom für das H im Restluftspalt, entsprechend der waagrecht werdenden Hysteresekurve. Er ist bei einem geschachtelt Kern Trafo viel größer, wegen dem größeren Luftspalt und hat dann einen fast Dreieckigen Verlauf, siehe nächstes Bild:

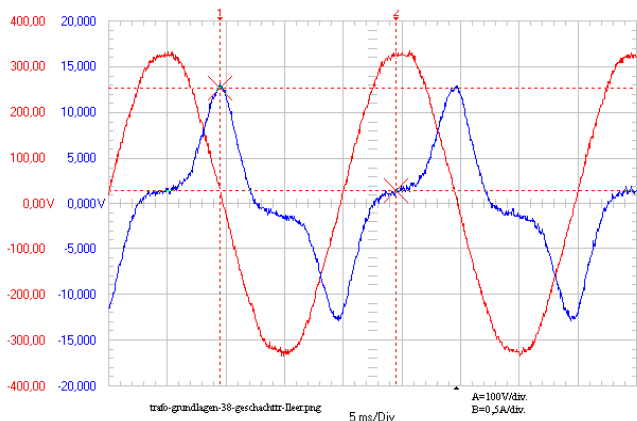


Bild 38 oben: Netzspannung und Leerlaufstrom von einem Transformator mit wechselseitig gestapelten Kernblechen schlechter Qualität.

Hoher Leerlaufstrom von ca. 1 Aeff., weniger durch Ummagnetisierungsverluste als großen durch Blindstrom durch große Restluftspalte. 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.

Der Eisenummagnetisierungsstrom ist nur ca. 0,15A hoch, er liegt in Phase zur Spannung. Der Luftspaltaufmagnetisierungsstrom ist dagegen 1,3A hoch, sein Scheitel liegt im Nulldurchgang der Spannung.

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

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 Primärspule einwirkende Spannungszeitfläche die ursächliche Größe oder ist der in die Spule fließende Spulenstrom alleine ursächlich für den Magnetfluss Φ ?

Erkenntnisse, die nicht neu sind, aber noch nie 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.
- Die Hysteresekurve kennzeichnet die Eigenschaften des Trafos für die Magnetisierung.
- Der zum Magnetfeldaufbau nötige Strom stellt sich ein nach dem Verlauf der Hysteresekurve und ist sehr stark abhängig vom Kernmaterial und der Kernbauform und

dem Aussteuerungsgrad der magn. Flussdichte. Er ist als Antwort des Trafos auf die Beeinflussung mit Spannungszeitflächen anzusehen.

- 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
- Das Magnetfeld wird bei der Magnetisierung durch den Magnetisierungsstrom aufgebaut, der Magnetfluss durch die Spannungszeitflächen.
- Magnetfluss und Magnetfeld sind also zweierlei Größen.
- 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], Ampere, Stromstärke oder auch Magnetisierungsstrom genannt und ist der waagerechten Achse der Hysteresekurve als Feldstärke H als Magnetfeldstärke 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 ist. Bei Spulen gilt nicht der gemessene Magnetisierungsstrom alleine sondern seine Multiplikation mit der Windungszahl, die Amperewindungen, (A_w).
- Für das Magnetfeld wird auch der Begriff Magnetische Durchflutung oder Magnetische Spannung 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 10^4 Mal, also 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, nach welcher Spannungszeitflächen Einwirkung in einer Netzhalbperiode, welcher momentane Strom fließt. Der Leerlaufstrom setzt sich aus dem Eisen-Ummagnetisierungsstrom und dem Luftspaltaufladestrom zusammen. Der Ummagnetisierungsstrom, $I_{hyst-senkr}$ in der Grafik unten, entsteht schon während der Ummagnetisierung und ist weitgehend in Phase mit der Spannung und verändert sich kaum in der Amplitude. Der Luftspaltaufladestrom, unten in der Grafik nicht sichtbar, weil beim Ringkern kein Luftspalt vorhanden ist, steigt bei parallel zur zunehmenden Magnetisierung linear an und hat am Ende der Spannungshalbwelle seinen Scheitel. Er ist der eigentliche und zur Spannung um 90 Grad Phasen verschobene Blindstrom, $I_{hyst.W.p.}$ in der Grafik unten, der auch im luftspaltlosen Kern dann entsteht wenn das Eisen weitgehend ummagnetisiert, also gesättigt ist. Er verursacht hier im Ringkernbeispiel 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.

Zusammenhang von Spannung, Magnetisierung und Leerlaufstrom bei einem Ringkerntrafo

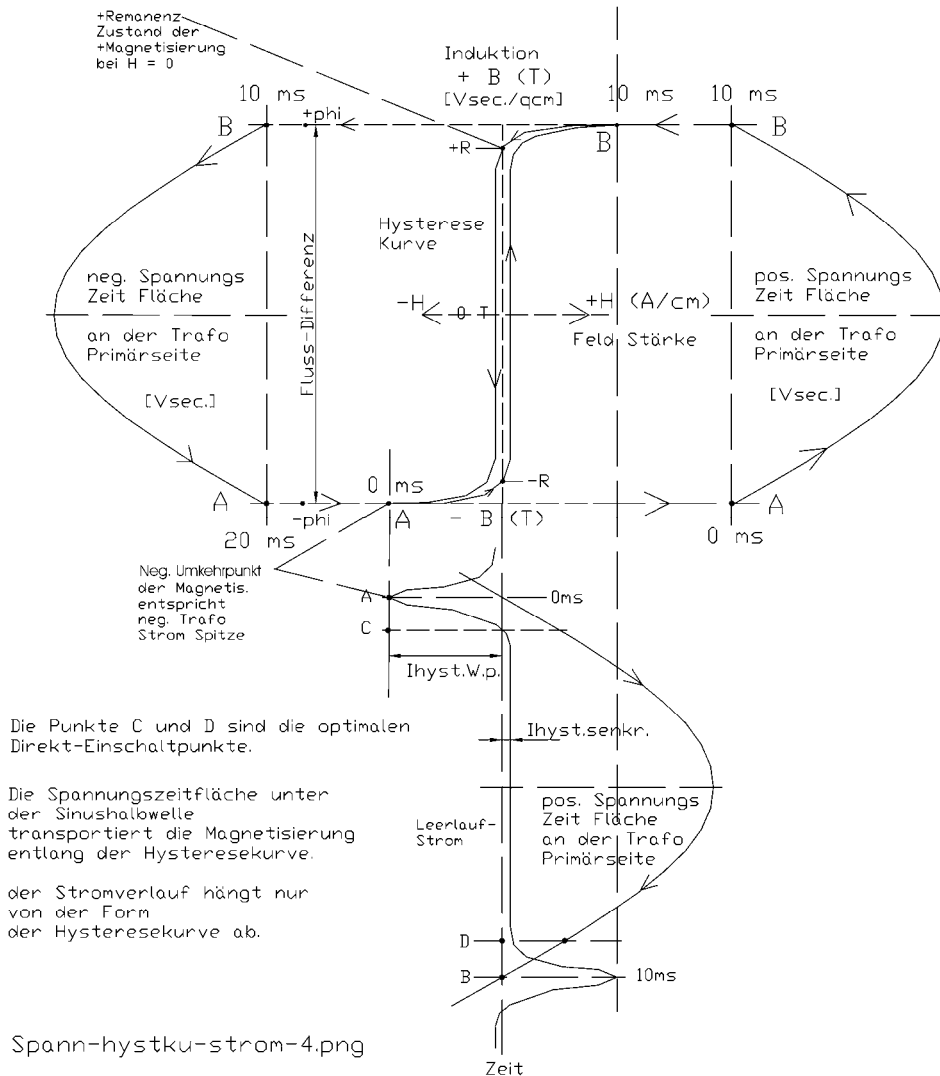


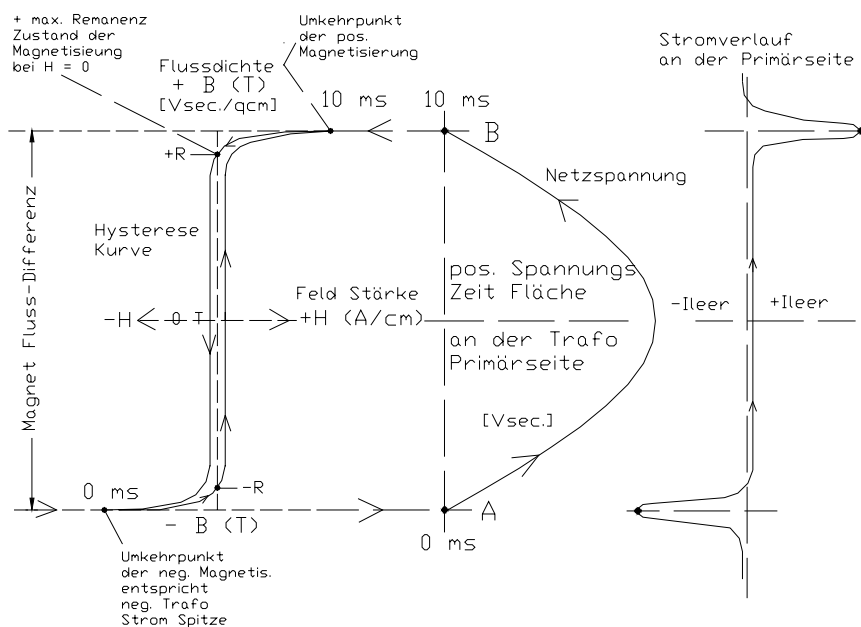
Bild: Spann-hystku-strom-4.png, Konstruktion von „EMEKO“-Ing.Büro.

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 Oszilloskop nachmessen. Der Verlauf im Oberen Bild 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 Blindstromüberhöhung 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 Sinusförmigen Stromverlauf wird beim Berechnen von Trafos mit Formeln verwendet, weil man die Nichtlinearität mit Formeln nicht fassen kann. Außer beim Trafo mit großen Luftspalten, die aber nicht gebräuchlich sind, sind die Leerlaufströme nicht sinusförmig. Welchen Betrag der Stromkurve im Bild 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 oben sind die idealen Direkteinschaltpunkte von der Maximalremanenz $-R$ oder $+R$ aus, mit dem entsprechenden Spannungsanschnitt.)

Zusammengehörigkeit von:
 Hysteresekurve, Spannungsverlauf
 und Leerlaufstrom bei einem Ringkerntrafo



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

Im Bild oben ist die Strom-Wirkung von einer Spannungshalbwelle am Ringkerntrafo zu sehen. Links unten beginnend, bei 0 msec., beginnt die pos. Spannungszeitfläche im Punkt A größer zu werden. 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 Hysteresekurve.

Das variable Verhältnis von dem Magnetfluss zum Magnetfeld ist in der Hysteresekurve zu sehen. Im senkrechten Teil der Kurve, ist bei steigendem Magnetfluss das Magnetfeld und damit der Strom konstant, obwohl der Magnetfluss, von der Spannungszeitfläche getrieben, zunimmt. Erst wenn sich der Magnetisierungspunkt auf dem sich zur Waagerechten neigenden Ast der Hysteresekurve befindet, steigt der Strom entsprechend der Form der Hysteresekurve 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.

Siehe Bild unten, TSEhyst1.

Hystereseurve

bei Ringkern-Trafos
(Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz

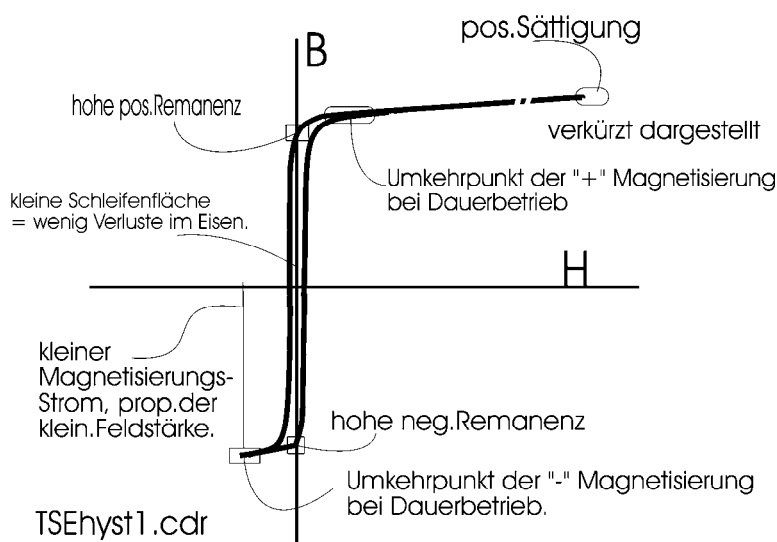
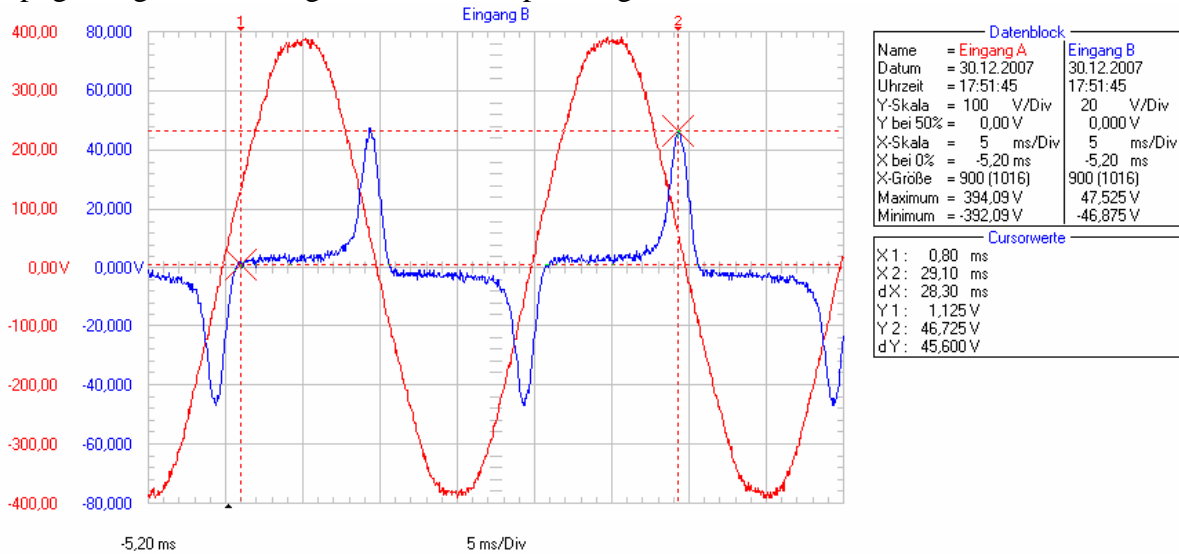


Bild: TSEhyst1.png

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

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



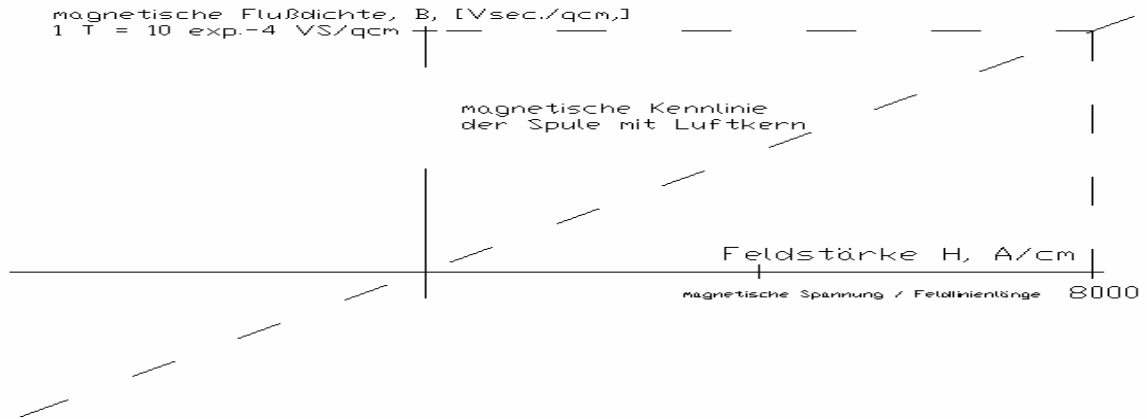
Trafo-grundlagen-35.bmp, 1kVA, 230V Ringkerntrafo, an 277Veff über 100 Ohm Vorwiderstand als Strommesshant im Leerlauf. A= U netz, B=U an Rv.

Der Scheitel des total nichtlinearen Leerlaufstromes liegt exakt im Spannungsnulldurchgang und damit auch genau unter den Spitzen Enden der Hysteresekurve, wo der Maximale Fluss herrscht. Der waagrecht verlaufende und fast gleich bleibende Stromverlauf mit geringer Amplitude, entspricht während dem größer werdenden Magnetfluss Phi, dem Bereich innerhalb dem senkrechten Ast der Hysteresekurve, siehe oben, Bild: TSEhyst1.cdr durch die Zunahme der Spannungszeitfläche.

Ein Lot durch das Ende des steilen negativen Stromabfalls, nach dem Peak links, (linkes Kursorkreuz), schneidet die Spannungskurve im optimalen Direkt-Einschaltpunkt von der negativen Maximal-Remanenz aus. (Die kleine Spannungszeitfläche des entsprechenden pos. Spannungsabschnitts entspricht der optimalen Vormagnetisier-Spannungszeitfläche für das TSR-Einschaltverfahren bei dieser Hysteresekurve. Siehe „Trafoschaltrelais“. Siehe unten, Bild: TSEme012.png).

In Spulen ohne Kern also nur mit Luft, siehe unten das Bild 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.

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.

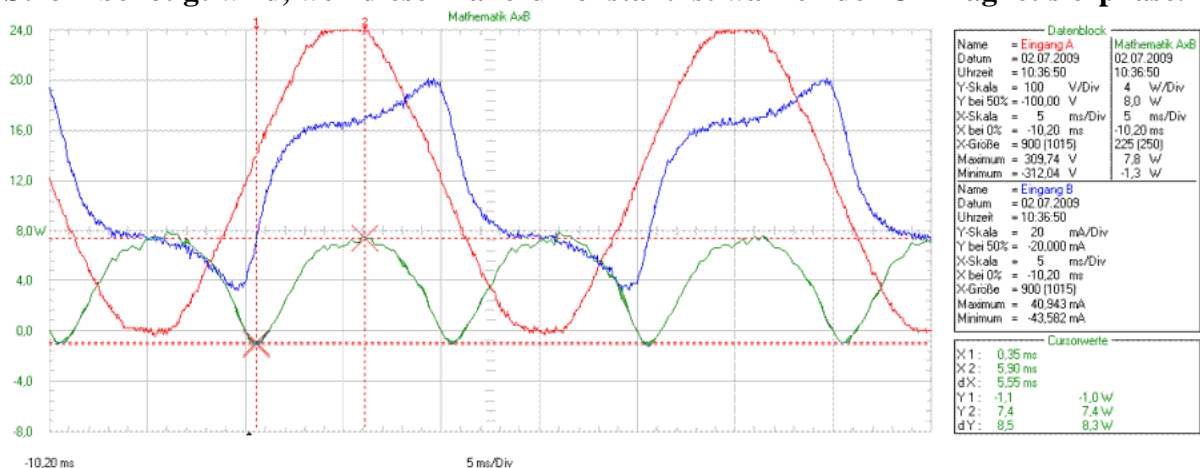
Für eine Ringspule mit den gleichen Abmessungen, jedoch mit einem Bandkern ausgerüstet, sind bei 230 Windungen nur 5,7 Amperewindungen, das sind nur 25 mA * 230 Windungen nötig. Der Leerlaufstrom beträgt laut Magnetisierungskennlinie nur ca. 25mA

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

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 nur die Zunahme der Spannungszeitfläche ursächlich ist, weil für die steigende Magnetisierung kein steigender Strom benötigt wird, weil dieser nahezu konstant ist während der Ummagnetisierungsphase.



Trafomess-1kvaRKTR-Leer1-4.bmp, 221Veff, ; 26,6mAeff, wie 1

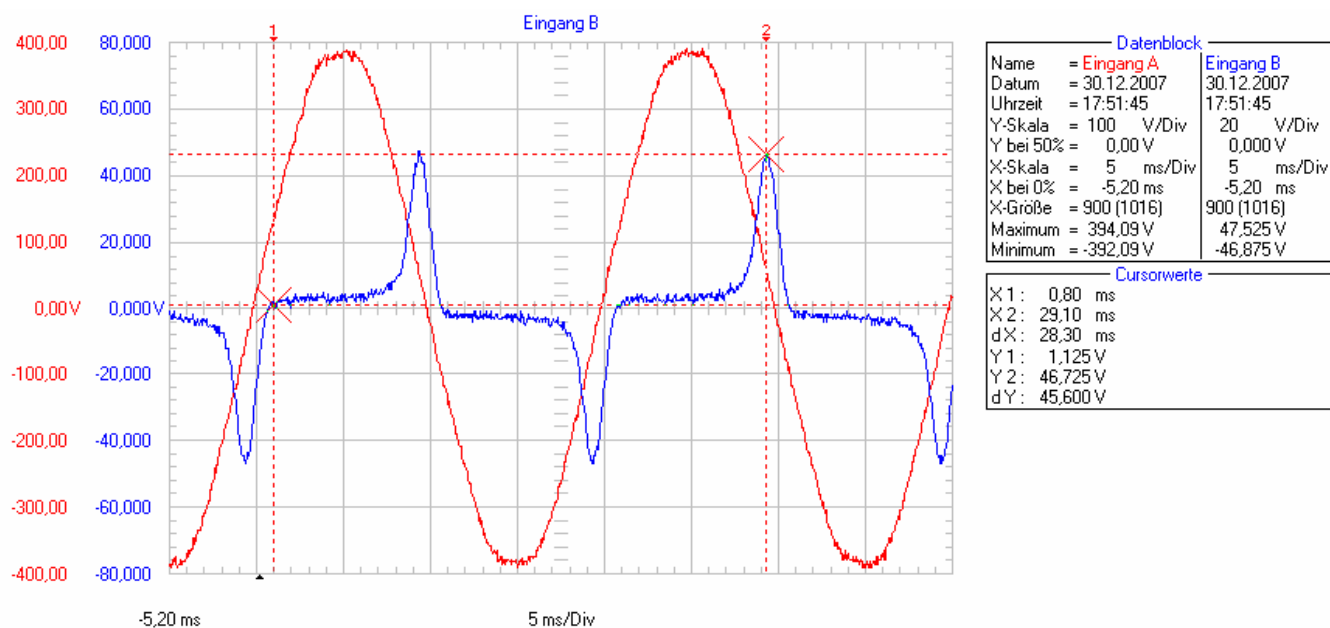
Strommessung blau, mit 20 mA pro div.

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. (Hat das Oscilloscop mit der Math. Funktion berechnet.). Wichtig ist dabei aber zu

beachten, dass dieser Strom nicht in dem Maße wie die steigende Magnetisierung Phi und schon gar nicht linear zunimmt.

In der Literatur wird bisher nicht zwischen Eisenaufmagnetisier- und Luftspaltausmagnetisierstrom unterschieden. Sie werden beide in einen Topf geworfen und als sinusförmig und der Spannung 90 Grad hinterherlaufender **Blindstrom** bezeichnet. Das 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.

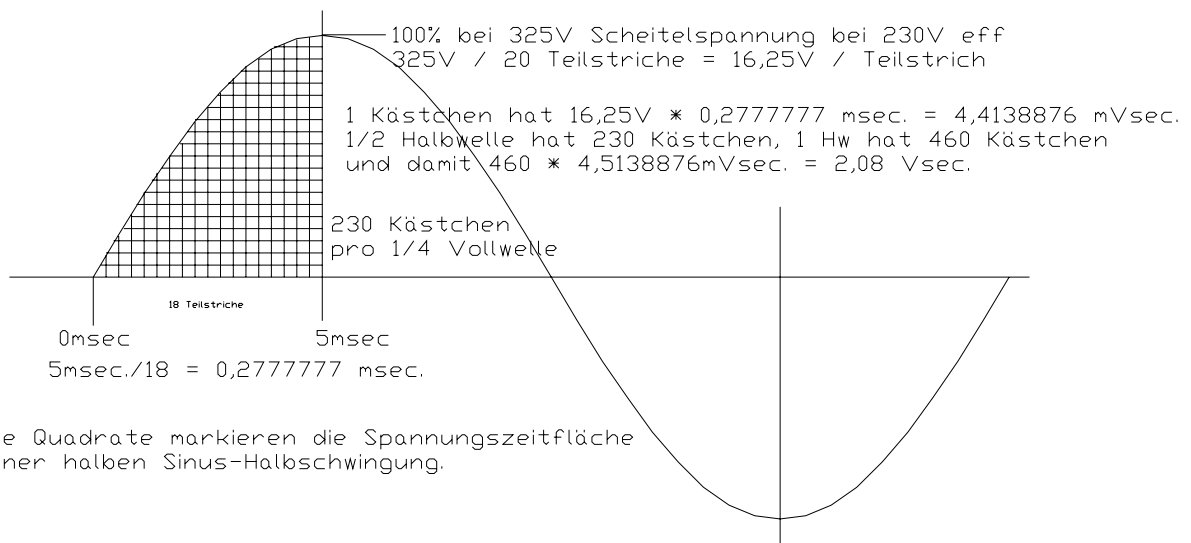
Um die technischen Vorgänge beim richtigen Einschalten, Vormagnetisieren, Sättigung, Überspannung, Unterfrequenz usw. zu erklären, erweist sich die Spannungszeitflächen Sichtweise, (wegen der Einspeisung mit steifer Spannung), als sehr übersichtlich und einfach, wie auch die folgenden Messungen es belegen.



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

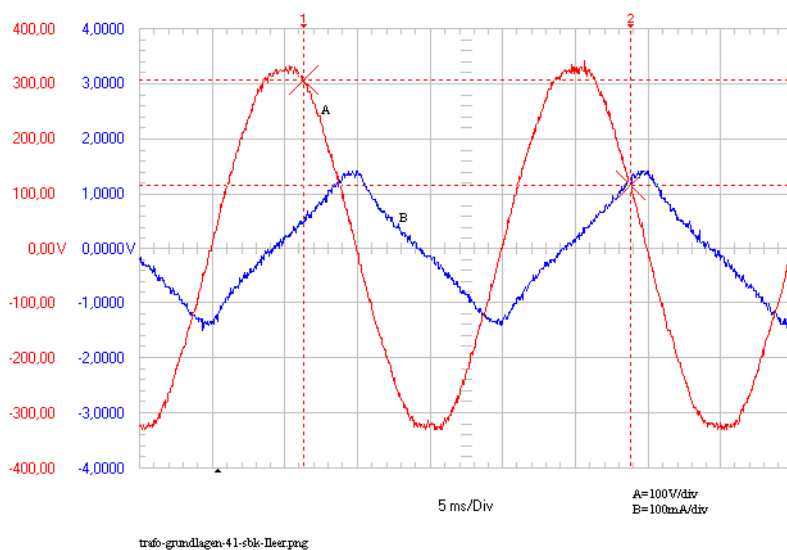
(--Im obigen Bild: Trafo-grundlagen-35.bmp ist der waagrecht verlaufende Strom von ca. 33 mA etwas größer, weil wegen der höheren Netzspannung eine breitere Hysteresekurve als bei Nennspannung durchlaufen wird. Der Waagerechte Verlauf des Magnetisierungsstromes während dem Durchlaufen des senkrechten Teiles der Hysteresekurve ist aber typisch für den Ringkerntrafo.--).

Definition der Spannungszeitfläche.



Die Spannungszeitfläche einer Halbwellen, 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 untenstehenden Messkurven zeigen die Spannung und den Strom an einem Leerlaufenden Schnittbandkerntrafo mit einem definierten, vergrößerten Luftspalt. Der Stromverlauf ist durch die Luftspaltdominanz nahezu dreieckig.



Unter der Spannungszeitfläche einer Halbwellen wechselt der Strom von minus max. nach plus max.

Das untenstehende Schaltbild zeigt den Aufbau für die Messung der folgenden Messkurven, die zum Erkennen der Wirkung von Spannungszeitflächen dienen.

Messung der die Induktion treibenden Spannung, U_{treib} , der Ohmschen Spannung, U_{ri} , der Sekundärspannung U_{sek} und des Eingangsstromes, als Sprungantwort auf die angelegte Spannung U angelegt.

Die Selbstinduktionsspannung, U_i , welche für das Aufmagnetisieren zuständig sein soll, kann nicht gemessen werden.

Auffallend ist jedoch

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

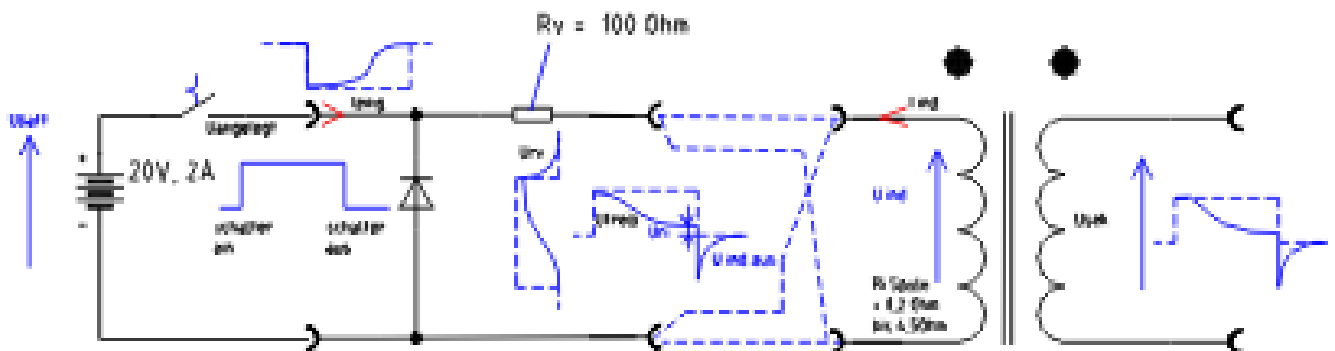
Es wurde der Kern umgepolt, und nicht umgepolt gemessen und damit von einer gegenpoligen und gleichpoligen Remanenz aus aufmagnetisiert.

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

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

Die hier eingezeichneten Messkurven sehen im Detail anders aus als sie hier gezeichnet sind. Siehe 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



Ergebnis: Die U_{treib} läuft synchron mit U angelegt, ist aber vermindert um U_{ri} . Eine Selbstinduktionsspannung ist erst beim Ausschalten messbar.

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

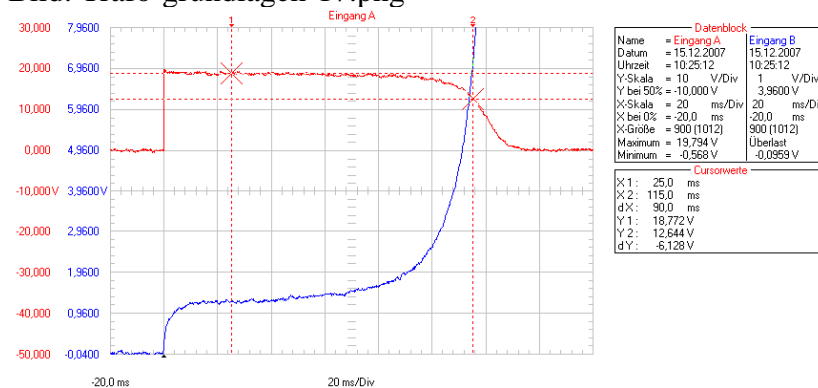
Trafo-grundl-1.dwg, EMEKO Ing. Büro,
 Freiburg den 17.12.17

Trafo Grundlagen mit Demonstration der Wirkung von DC-Spannungs-Zeitflächen Impulsen, welche auf die Trafoprimärspule einwirken.

Trafo-Messung mit Beaufschlagung eines Ringkerntrafos mit einer Spannungszeitfläche, von verschiedenen Remanenzlagen ausgehend.

Messung an einem 1 kVA, 230V Ringkern Trafo ohne Belastung. Es wird ein DC Spannungsimpuls von +20V über 100 Ohm an die vorher gleich beaufschlagte aber nun umgepolte Primärspule gelegt. Es wird also von der neg. Remanenz aus, der positive Magnetisierungsverlauf gemessen. Die Hysteresekurve wird damit fast voll durchfahren. Anfänglich fließt nur der fast konstante Eisen-Ummagnetisierungsstrom, blaue Kurve. Die Messung zeigt aufgrund der hohen Remanenz im Kern stark unterschiedliche Ergebnisse. An einem Trafo mit Luftspalt, ergäben sich wegen der Nullremanenz keine Unterschiede.

Bild: Trafo-grundlagen-17.png



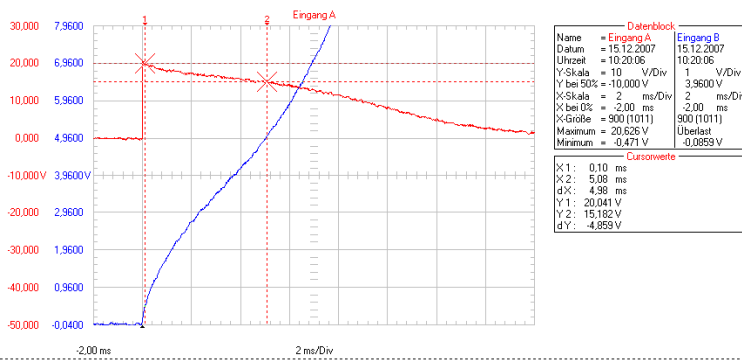
Trafo-grundlagen-17.bmp, Ringkerntrafo 1kva, von neg. Remanenz aus mit p os.kleinem Sprung. A=Utreib, B= U an Rv mit 100 Ohm, also 10mA/div

Der Durchlauf der Hysteresekurve benötigt 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-Halbwelle. (Eine Spannungs-Halbwelle transportiert die Magnetisierung von einem zum anderen Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve.)

Kanal A zeigt die Spannung direkt an der Primärspule, weshalb sie bei Sättigung zusammenbricht, 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.

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

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



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

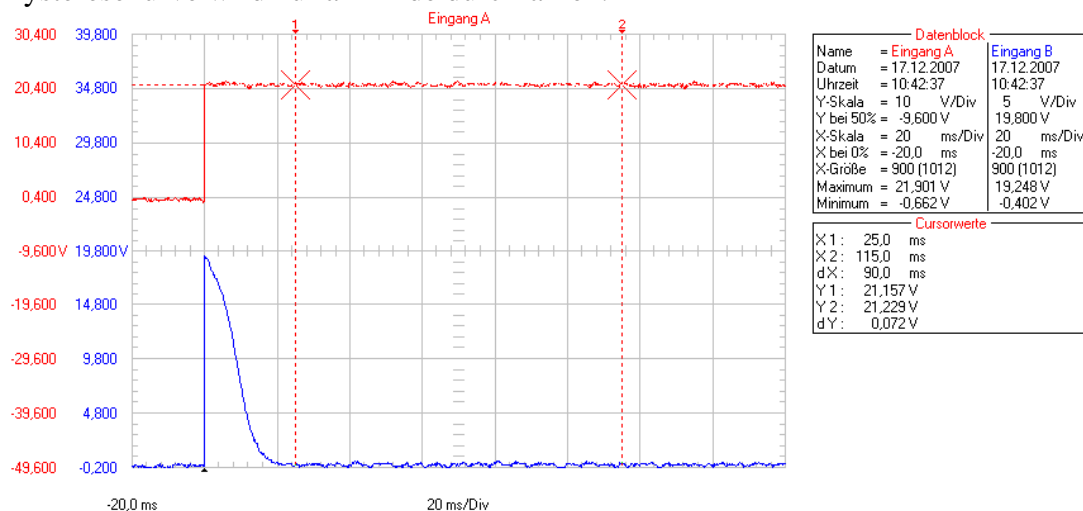
Zu Bild: Trafo-grundlagen-14.png.

Achtung 10 mal kürzerer Zeitmaßstab als bei der Messung von der neg. Remanenz aus, im oberen Bild. **Kanal A, 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.)

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

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 durchfahren.

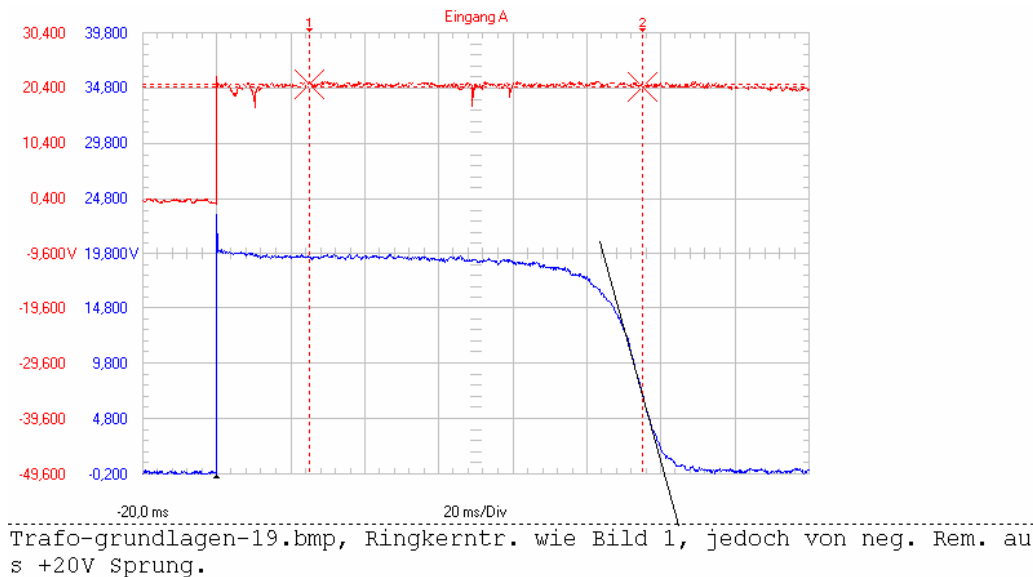


Trafo-Grundlagen-18.bmp, 1kVA Ringkerntr. v. pos Rem. aus mit +20V Sprun g, A= Uangel. B= Utreib nach Rv von 100 Ohm.

Hier wird nicht wie beim Bild 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 im Bild 14 sofort ein. Die Spannungszeitfläche unter der blauen Kurve zum Transport des Magnetflusses vom oberen Remanenzpunkt in die Sättigung ist nur klein, was der Form der Hystereseurve in diesem Bereich entspricht.

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 Hystereseurve wird fast voll durchfahren.

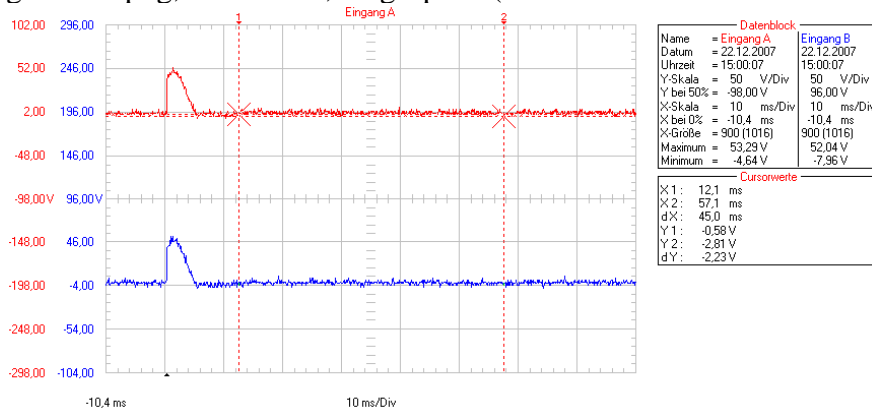


Kanal A, rote Kurve, zeigt die Gleichspannung vor dem Widerstand, Kanal B, blaue Kurve, zeigt die Primärspulenspannung nach dem Vorwiderstand. Wenn die Hystereseurve bis ans Ende durchfahren ist, bricht die Primärspannung durch den Stromanstieg hinter dem Vorwiderstand zusammen, weil der Kern in Sättigung geht.

Die Spannungszeitfläche zum Transport der Flussdichte B in die Sättigung ist groß und entspricht den ca. 2 Volt Sekunden. Die Spannungszeitfläche nimmt bei konstanter Spannung ohne merklichen Stromanstieg über die Zeit zu. (Sichtbar daran, dass die blaue Kurve kaum abfällt.) Das Zunehmen der Spannungszeitfläche erfolgt hier linear und ist über die Zeit konstant, im Gegensatz zur Sinusspannungszeitfläche. Aus dem Grund ist die induzierte Spannung auch solange konstant bis die Sättigung erreicht ist. Das gleiche, dass die Sekundär-Spannung vor dem Ende der Spannungshalbwellen zusammenbricht oder der Leerlauf-Strom am Ende der Spannungshalbwellen stark ansteigt passiert an einem Trafo, wenn die Primär-Spannung zu groß oder die Frequenz zu niedrig ist. Die Sekundär Spannung bricht dabei also nicht gleich ein sondern erst bei beginnender Sättigung.

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.

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 Trafo-grundl-1.png, siehe oben, eingespeist. (Nicht wie im Bild mit der 20V Spannungsquelle eingespeist.)



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

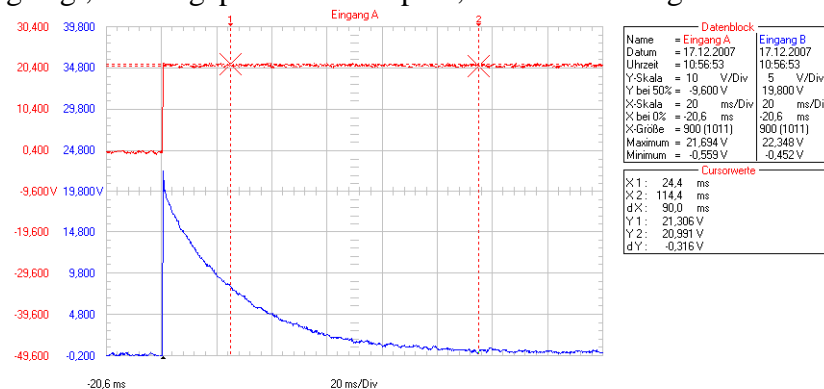
Bild: Trafo-grundlagen-32.png

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

Es ist für den Aufbau der Induktion oder des Magnetfeldes also egal wie die Trafoprimaryspule gespeist wird, mit Konstantspannung oder Konstantstrom um eine bestimmte Magnetisierung im Kern der Spule zu erreichen. Das Ergebnis ist das gleiche. Es entsteht bei Konstantspannungs-Speisung ein dazugehöriger Strom und bei Konstantstrom-Speisung eine dazugehörige Spannungszeitfläche, wobei bei beiden Verfahren die Mess-Werte gleich sind. Durch die Hysteresekurve sind Spannungszeitfläche und Strom zu jedem Zeitpunkt mit einander verknüpft. Da unser Stromnetz jedoch mit eingepprägter 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.

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



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

Bild: Trafo-grundlagen-25.png

Kanal A zeigt die Spannung vor dem Vorwiderstand und Kanal B zeigt die Spannung U treib 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 25**, 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 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.

Da bei der Netzspannungs-Stromversorgung die Spannung und nicht der Strom eingepägt 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 und das Einschalten erleichtert.

Siehe unten das Bild TSEme012, welches die Wirkung von Spannungszeitflächen bei einem besonderen Sanfteinschaltverfahren zeigt, das 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.

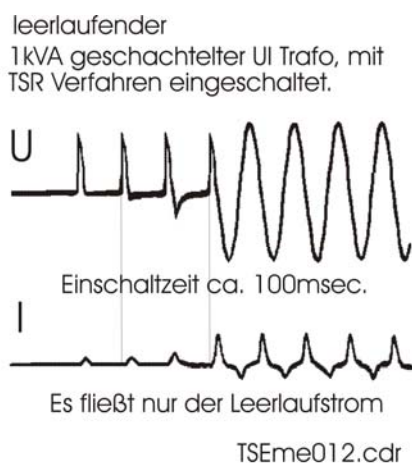


Bild: TSEme012.png

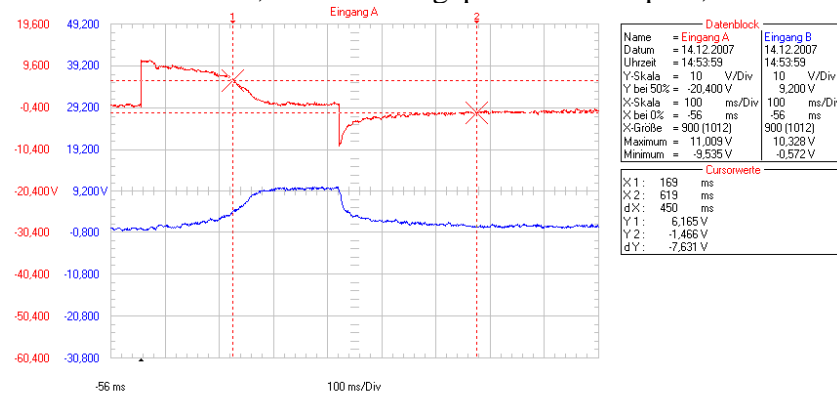
Die unipolaren Vormagnetisier-Spannungszeitflächen transportieren die Induktion mit jedem Spannungszeitflächen Stück, Schritt für Schritt in Richtung zum oberen positiven Umkehrpunkt der Hysteresekurve, worauf nach dem Erreichen des Umkehrpunktes im Anschluss sofort voll eingeschaltet wird. Dass es nur 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.

Die unten gezeigten Messkurven stammen von der Messung an einem 1kVA, 230V zu 230V geschachtelten EI Trafo, bei nicht umgepolter Primärschule, also immer von der pos. Remanenz aus gemessen.

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

Was der Eisenkern bewirkt:

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

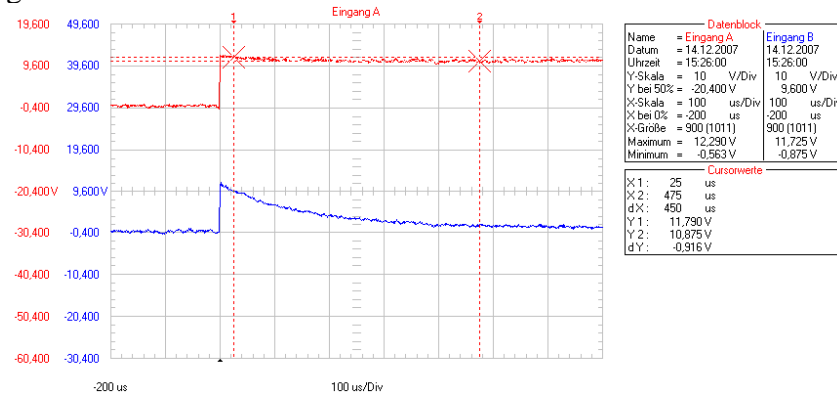


Trafo-grundl-6.bmp, wie 4 aber A=Ütreib, B=URi prop Iin

Bild: Trafo-grundl-6.png

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

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



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

Bild: Trafo-grundl-7.png

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

Vorteile des Ringkerntrafos:

Beim Ringkerntrafo ist im Bild: Trafo-grundlagen-17.png, sehr schön die waagerechte Phase des Stromverlaufs mit einem Anfangsstrom von ca. 12 mA zu sehen, während dessen der Senkrechte Teil der Hystereseurve durchlaufen wird. Bei **keinem** anderen Transformator ist das so deutlich ausgeprägt.

Da dieser 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 nicht erhöht.

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

Beim Schnittbandkerntrafo, Bild 7, 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 Anlegen von U angelegt sofort ein Strom in die Spule hinein der solange zunimmt bis er durch den R_v und das R_i vollkommen begrenzt wird. Beim Ringkerntrafo dagegen, ist der zu anfangs fließende Strom viel geringer und bleibt auch anfänglich auf einem niederen Wert mit einer waagerechten Phase, deren Dauer vom Weg in der senkrechten Hystereseurve abhängt, also ob von neg. oder pos. Remanenz aus, der Sprung auf die Spule gegeben wird. Ein Anfangs- Strom ist aber auch hierbei sofort festzustellen. Die lange waagerechte Phase der U treib und des kleinen Eingangstromes beim Ringkerntrafo zeigt wie mit wenig Energie der Magnetfluß von neg. zu pos. Werten transportiert wird, was elektrisch gesehen eine hohen dynamischen Induktivität entspricht, was diesen Trafo so effektiv macht. Denn für die Übertragung der Energie ist der Leerlaufstrom überhaupt nicht maßgebend, er ist ein nötiges Übel. Er ist nur die Folge der Induktion des Trafoeisenkernes und ein Sekundäreffekt. Der Magnetfluss sieht die Last nicht.

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 Hystereseurve, was besonders an deren Enden weniger Blindstrom erzeugt.

Welche Aufgabe hat das Eisen im Transformator?

Eine einfache Erklärung über den Zweck und die Wirkung des Eisens in einem Netz- Transformator, (es gibt auch Luftspulen- Transformatoren ohne Eisen), ist die Tatsache, dass man durch das Eisen einen bis zu 20000 mal kleineren Magnetisierungsstrom braucht als es ohne Eisen der Fall wäre. Siehe Bild Trafo-grundl-1.png. Denn der Magnetisierungsstrom fließt auch dann in die Primärspule hinein, wenn gar keine Leistung auf der Trafosekundärseite abgenommen wird. Und wenn der Trafo dann eben durch den Einbau des Eisens viel kleiner sein kann, denn die Wärme des großen Luftspulen- Magnetisierungsstromes müsste ja abgeführt werden, was ein großes Volumen mit großer Oberfläche erfordert, bringt der Eisenkern eben einen großen technischen Vorteil. Man ist deshalb bestrebt, immer bessere Eisen Kerne zu entwickeln, welche immer geringere Magnetisierungsströme benötigen. Der Ringkerntransformator ist ein gutes Beispiel dafür. Inzwischen werden für die Bleche schon metallische Gläser verwendet, die noch geringere Verluste als kalt gewalzter Stahl haben.

Trafoauslegung:

Trafos werden bei der Berechnung so ausgelegt dass keine nennenswerte Sättigung im Eisen beim Nennbetrieb +10% Überspannung entsteht. (Das Eisen soll möglichst nur im linearen Teil der Hystereseurve um- magnetisiert werden, damit keine großen Leerlaufströme fließen. Gesättigte Bereiche im Eisenkern verhalten sich nach außen wie dynamische Luftspalte.)

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

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

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

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

Spannung, also bei einer zu großen Spannungszeitfläche, die Luft aufmagnetisiert werden, wozu ein großer Magnetisierungsstrom benötigt wird. (Gesättigtes Eisen verhält sich wie Luft.)

Bei 2 Tesla wären das dann 16000 A/cm. Und bei einer Spule für einen 5 kVA Trafo mit 60cm Feldlinienlänge und ca. 200 Windungen sind das dann 60cm mal 1600 A pro cm / 200, = 480 A ein Strom den kein Haushalts Niederspannungs-Netz mehr aufbringen kann und kein 5kVA Eisenkerntrafo entsprechender Spulendraht mehr aushält. Also wird hiermit klar, dass es gar nicht vollkommen zur reinen Luftaufmagnetisierung 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 eines Trafos, sagt die obige Trafo Formel jedoch noch nichts aus, weil der Last Strom darin nicht vorkommt. Hier muss man die mittlere Stromdichte von ca. 2-4 A pro qmm für den zu übertragenden Strom bei gegebener Wärmeabfuhr im Kupferlackdraht und der ganzen Spule berücksichtigen.

Je größer also der 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 einer Spule, über die Amperewindungen entsprechend der Hysteresekurve, dann deren Größe bestimmt.

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

Wie groß ist die Spannungszeitfläche einer Sinushalbschwingung?

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

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

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

Wie erklärt man am anschaulichsten, weshalb die Primärspule eines Transformators mit Eisenkern im Leerlauf, bei Speisung mit einem eingepprägten Spannungsimpuls, am Pulsanfang nur wenig Strom aufnimmt, also hochohmig ist? Siehe Bild: Trafo-grundl-1.png.

Oder anders gefragt, weshalb ist der Leerlaufstrom bei Transformatoren viel geringer als der Laststrom? Ist die Selbstinduktion an der anfänglichen Hochohmigkeit der Primärspule schuld, die dann auftritt wenn man eine Spule an eine Spannung legt, sie sich also selber induziert? Wobei diese Selbstinduktions-Spannung dabei aber von außen nicht messbar ist!

Es fällt dem Elektrotechnischen Praktiker schwer, sich vorzustellen, dass eine an eine Spule von außen angelegte Spannung, in dieser Spule gleichzeitig eine Spannung induziert, welche die gleiche Richtung

wie die treibende Spannung hat, also zur treibenden Spannung eine Zwillingsspannung darstellt die nicht von der treibenden Spannung per Meßtechnik zu unterscheiden ist.

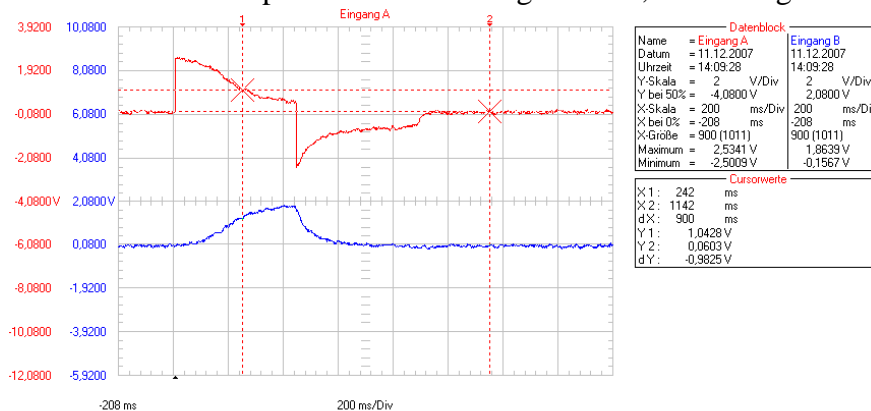
Wirkt also das Lenzsche Gesetz, das besagt, dass ein von der induzierten Spannung erzeugter Strom die durch die Spannungszeitflächen Beaufschlagung der Spule erfolgende Magnetfluss- Änderung zu verhindern sucht und dieser Strom dann die Gegeninduktionsspannung erzeugt? Oder kürzer ausgedrückt: Der Induktionsstrom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

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 derselben 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 schickt jedoch einen Strom in Richtung der speisenden, angelegten Spannungsquelle, der dem Strom dieser Spannungsquelle entgegen steht, sich also von diesem subtrahiert, weshalb nur ein minimaler (Rest) Strom von der Spannungsquelle ausgehend übrig bleibt, eben der Leerlaufstrom, der zum Beispiel bei einem Ringkerntrafo nahezu konstant fließt solange sich die Induktion 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 2 erklärt. Beim Abschaltfall ändert sich die die Magnetisierungsrichtung und deshalb dreht sich dann die Spannung um. Was als Beweis der Selbstinduktionsspannung gilt.

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



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

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

Nach dem Ausschalten der Angelegten Spannung tritt sofort die Selbstinduktionsspannung mit negativem Vorzeichen auf, durch die nun umgekehrte Richtung der Änderung des Magnetflusses, (Abbau und nicht Aufbau.) Wie in Bild 2 und Schaltplan Trafo-grundl-1 zu sehen ist, polt sich die Abschalt- Induktionsspannung um, was an der **Utreib** zu sehen ist. Der plus Spannungspfeil ist im Schaltbild Trafo-grundl-1 nun unten, drückt damit weiter über die Diode und den R_v einen positiven Strom, im Kreis herum, am oberen Spulen Ende in die Spule hinein, weshalb sich der Spannungsabfall am R_v nicht umdreht oder sofort ändert, sondern sich nur mit einer abklingenden E-Funktion verkleinert. Hier ist das Lenzsche Gesetz klar erkennbar, was besagt, dass der vor dem Abschalten fließende Strom nach dem Abschalten (in der gleichen Richtung) weiter fließen will um der Magnetfluss Änderung entgegenzuwirken und sich die induzierte Spannung deshalb umdreht in der Richtung, damit sie diesen Strom treiben kann.

Eine Weitere Erklärung für die Hochohmigkeit der Kupferwicklung einer Trafoprimärspule 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 Ummagnetisierungsströme, abhängig von den Induzierenden Spannungszeitflächen, siehe die Messkurven unten und unter Beachtung der Hysteresekurven der verschiedenen Transformatortypen, kann man den momentanen, sich verändernden Induktiven Widerstand aus den Momentanwerten der Spannung und des Stromes ausrechnen und sich auch eine zweite Erklärung vorstellen: Man stellt dabei fest, dass sich die Induktivität während dem Durchlaufen der Hysteresekurve 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.

$L = N * N * My_0 * My_r * \text{Kernfläche} / 2 * \text{Pi} * \text{mittl. Kern Radius.}$

N= Anzahl der Windungen.

Das Berechnen der Induktivität „Lklein“ mit der untenstehenden Formel führt weiter, weil diese die kleine Induktivität, entsprechend dem eher waagrecht Teil der Hysteresekurve beschreibt.

$L = N * N * My_0 * 1 * \text{Kernfläche} / 2 * \text{Pi} * \text{mittl. Kern Radius.}$

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

Man sieht am hohen Myr von ca. 5000, dass die Induktivität L innerhalb des Magnetisierens im senkrechten Ast groß ist und im fast waagrecht Ast =1 also 5000 mal kleiner ist.

Letzte Version vom 23.01.2013.

Der Autor hofft mit diesem Artikel das Verständnis für die Sichtweise mit Spannungszeitflächen zu erhöhen. Quellen: Alle Messkurven und Grafiken stammen vom Autor selbst. Die Diskussionstexte stammen aus dem Wikipedia.

Weitere Infos unter: bei www.de.Wikipedia.org, [Benutzer:Emeko](#) oder im Artikel: Transformator oder im Wikipedia Artikel:Transformatorschaltrelais,

Oder auf www.emeko.de