

Trafo-Physik ganz einfach verstehen, durch messen von Spannung und Strom auf der Primärseite mit dem Oszilloscop: Im Dauerbetrieb, beim Ein und Aus-Schalten, mit DC Spannungsoffset .

Siehe auch den Fachartikel: trafo-grundlagen-2-m-dc-spzfl_01.pdf

Es wird anschaulich erklärt, wie der Eisenkern im Trafo physikalisch gesehen funktioniert, was im Trafo beim Einschalten und Ausschalten passiert, warum beim Einschalten der Einschaltstromstoß entsteht und wie man letztendlich den Einschaltstrom nicht nur begrenzen sondern ganz vermeiden kann.! Es werden aber auch einige grundlegende Begriffe über die magnetischen Vorgänge im Transformator und die damit verbundene Arbeitsweise einer Einschaltprozedur erklärt.

Zusätzlich erklärt werden Begriffe wie Hysteresekurve, Remanenz, Sättigung, Induktion, Magnetisierung im Eisenkern, Magnetfeldstärke, Wirkung der Spannungszeitfläche einer Netzspannungshalbwelle, usw.

Es wird vom Autor ein Ringkerntrafo, mit einem Eisenkern aus sehr verlustarmem Trafoblech, als Referenz eines fast idealen Trafos verwendet. An diesem Trafo, der entweder nur eine Primärwicklung besitzt oder eine gleich große Sekundärwicklung trägt, lassen sich reale Messungen machen, welche zu den gefundenen Erkenntnissen führten. Natürlich kann mit einem Trafo ohne Sekundärwicklung damit nur ein Trafo im Leerlaufbetrieb untersucht werden, was jedoch für die Untersuchungen des Primärstromes abhängig von der Beaufschlagung mit unterschiedlichen Spannungs-Zeitflächen und für das Verständnis von Vorteil ist.

In Lehrbüchern wird zur Erklärung des Trafos immer von einem idealen Trafo, ausgegangen, an dem man aber keine realen Messungen machen kann. Ein dort beschriebenes Ersatzschalt-Bild eines idealen Trafos, dem eine Induktivität vorgeschaltet ist, die den Einschaltstrom verursacht, entspricht nicht den vom Autor gewonnen Erkenntnissen. Ein optimierter Ringkerntrafo kann jedoch als fast idealer Trafo angesehen werden. Nur hat er leider einen hohen Einschaltstrom, der aber wie hier im Folgenden bewiesen wird, nur vom Trafo alleine herkommt. Dieser Einschaltstrom braucht aber gar nicht aufzutreten, wenn man den Trafo physikalisch richtig einschaltet. Das Verstehen der Einschaltprozedur, bringt automatisch das Verständnis über den Elektromagnetismus im Trafo.

Im Leerlaufbetrieb eines fast idealen Ringkerntrafos kann man die Vorgänge im Trafoeisen sehr gut nachmessen und verstehen.

Die von der Netzspannung gespeiste Primärspule magnetisiert das Trafoeisen ständig um. Diese Ummagnetisierung geschieht bei 50 Hz Netzfrequenz 100 Mal in der Sekunde. Die Netzspannung ändert sich sinusförmig und treibt dabei einen kaum messbaren Strom durch die Primärspule, auch wenn die Trafoleistung 1kVA bei 230V beträgt sind das dann nur wenige Milliampere, die zudem erst am Ende einer Spannungshalbwelle zum fließen kommen. Das Eisen im Trafokern erfährt dabei eine ständige Änderung der magnetischen Flussdichte, Induktion genannt, deren Verlauf über die Zeit durch die Form der Hysteresekurve beschrieben ist. **Siehe Bild 2 bis 4.** Gleichzeitig wird durch das sich im innern der Primär- und Sekundärspule ständig ändernde Magnetfeld die Sekundär-Spannung induziert, was ja die eigentliche Aufgabe des Trafos ist.

Ein Primärseitiger Strom ist im Leerlauffall kaum messbar, obwohl die Hysteresekurve im linearen Teil voll angesteuert wird, weil die Ummagnetisierungsverluste äußerst gering sind. Die fast verlustfreie Spannungsübertragung ist durch die Messung der Sekundärspannung beweisbar. Ein Ringkern-Trafo mit der Übersetzung 1:1, erzeugt auf der Sekundär-Seite im Leerlauf eine Spannung welche genau gleich der Primärspannung ist. Die Phasenverschiebung der beiden Spannungen ist vernachlässigbar klein.

Die herrschende Lehrmeinung geht leider immer noch davon aus, dass man Transformatoren am besten im Scheitel der Netzspannung einschalten muß, um den Einschaltstrom zu vermeiden. Außerdem wird dort die Meinung vertreten, dass die Hysteresekurve durch die Wirkung des Leerlauf-Primärstromes angesteuert wird und nicht durch die Spannungszeitfläche, die nur die Reaktion auf den Strom sei. – Bei der üblichen und bekannten Darstellung der Hysteresekurve als B über H, ist B Spannungszeitflächen-, (auch Spannungsstoß genannt) proportional, ist H stromproportional.-

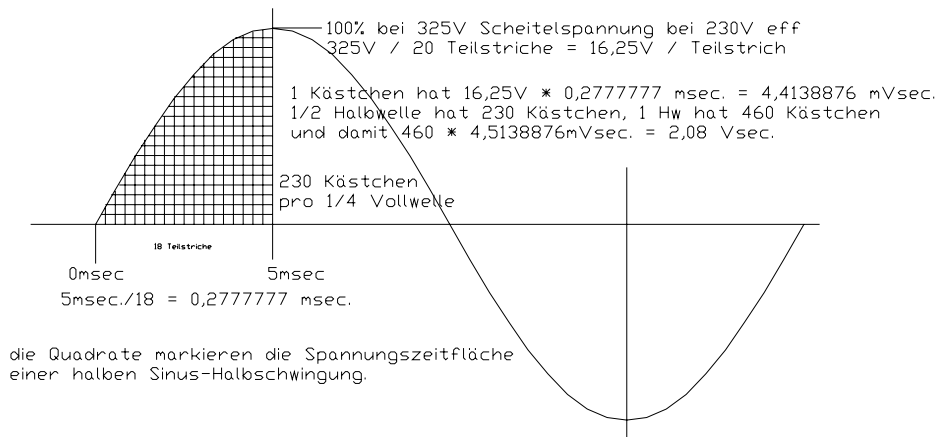
Weil die Netzspannung jedoch nicht Strom- sondern Spannungseingepreßt ist, sollte eine für alle Trafotypen gleiche Betrachtungsweise gelten. Und das ist die nachmessbare These der Beeinflussung der Magnetisierung, Induktion B, durch die Spannungszeitflächen und nicht durch den Strom.

Diese zum Durchlaufen der Hysteresekurve von einem zum anderen Ende nötige Spannungszeitfläche ist im stationären Betrieb bei allen für 50 Hz ausgelegten Trafos gleich einer Netzspannungshalb-

welle und ist überhaupt nicht abhängig vom Typ des Trafos. Also unabhängig vom Kerntyp. Bei anderen Trafos als Ringkerntrafos ist wie gesagt bei gleicher Trafo-Grösse und Leistung der sich einstellende Primär-Leerlauf-Strom allerdings um mehr als 100 Mal grösser als beim Ringkerntrafo, die Spannungszeitfläche aber gleich.

Also macht es doch Sinn die Wirkung der Spannung über die Zeit auf den Trafo zu betrachten.

Definition der Spannungszeitfläche.



Eine 230V 50Hz Netzspannungshalbwelle hat demnach eine Spannungszeitfläche von ca. 2 Voltsekunden.

Im weiteren Verlauf wird vom Autor davon ausgegangen, dass die auf die Primärspule einwirkende Spannungszeitfläche diejenige Grösse ist, welche die Magnetisierung im Trafo Eisenkern unabhängig vom Trafotyp auf der Hysteresekurve transportiert, den Magnetisierungsstrom hervorruft und auch die Sekundärspannung erzeugt.

Das Verständnis über das elektrische und physikalische Verhalten eines Trafos besonders in Beziehung zu Spannungsanomalien und dem Einschalten des Trafos wird damit erleichtert und sozusagen normiert. Siehe die Einschaltprozedur Demonstration weiter unten.

Eisenkern Wirkung beim leer laufenden Trafo:

Im Gegensatz zum Ringkerntrafo wird bei einem Lufttransformator, welcher keinen Eisenkern besitzt, bei gleicher Windungszahl wie beim Ringkerntrafo und bei gleicher Primärspannung und Frequenz, ein Riesenstrom fließen. Eine Hysteresekurve, die der von einem Eisenkern vergleichbar ist, existiert dabei nicht. Die Magnetisierungskurve eines Lufttrafos ist eine steile Gerade.

Das Eisen im Ringkerntrafo dagegen wird schon mit geringsten Amperewindungen, das ist das Produkt aus Strom durch die Primärspule mal deren Windungszahl, entlang der Hysteresekurve ummagnetisiert und setzt durch die Gegeninduktionsspannung der Primärspule die einen Strom treiben könnende und in der Primärspule wirkende Spulenspannung sehr stark herunter und verhindert dadurch einen höheren Strom. Das gilt jedoch nur solange sich die Magnetisierung im linearen Teil der Hysteresekurve bewegt, also dann wenn die maximale Betriebsinduktion ein gutes Stück unter der Sättigungsinduktion bleibt. Man kann auch sagen, dass beim Aussteuern des Eisens in Richtung Sättigung, diese Gegeninduktionsspannung der Primärspule stark abnimmt, weil die Hysteresekurve nun viel flacher verläuft und beim Erreichen der Sättigung völlig waagerecht wird. In diesem Absatz wurde das Geschehen Trafo über die Wirkung des Leerlauf-Stromes betrachtet.

Im Lastbetrieb eines fast idealen Ringkerntrafos

Erst bei Belastung auf der Sekundär-Seite stellt sich ein Strom durch die Last ein und im Verhältnis der Trafo – Übersetzung, auch auf der Primär-Seite ein. Die in der Primärspule wirkende Gegeninduktionsspannung wird mit zunehmender Last etwas kleiner, wodurch der der Strom in der Primär- Spule zunimmt.

Der Laststrom wirkt sich grob gesehen nicht auf den Verlauf der Magnetisierung aus. Ausser, dass durch ohmsche Spannungsabfälle in der Primärspule die treibende Primärspannung etwas kleiner und damit die Aussteuerung auf der Hysteresekurve auch kleiner wird. Was bei einem Trafo mit hohem Wirkungsgrad jedoch vernachlässigbar ist. Der Eisenkern wird dabei nicht durch die sehr geringen Ei-

senkernverluste erwärmt. Die Erwärmung des Trafos kommt allein von den Ohmschen Verlusten in den Kupferwicklungen der Primär und Sekundärseite, die sich proportional dem Strom, der sich bei Belastung einstellt, erhöhen.

Elektrische Leistung im Verhältnis zur Trafogrösse

Je grösser die Primär- Spannung , die Frequenz und der Magnetfluss ist, desto grösser ist die mit dem Trafo übertragbare Leistung. Ein grosser Magnetfluss wird durch eine grosse Eisenkernfläche erreicht. Für einen grossen Strom braucht es dicke Drahtquerschnitte in den Wicklungen. Eine hohe Primär-Spannung braucht viele Windungen auf der Primärspule. Die Frequenz ist von aussen vorgegeben. **Siehe auch** die Formeln auf **Seite 4 und 7**.

Ursache und Auswirkung des Trafo-Einschaltstroms

Es erscheint paradox. Ein Ringkerntrafo mit einem fast vernachlässigbaren Leerlaufstrom hat jedoch einen riesigen Einschaltstrom. Ein Trafo mit Luftspalt im Eisenkern mit einem erheblich grösseren Leerlaufstrom, hat dagegen einen geringeren Einschaltstrom. Die Ursache dafür ist die unterschiedliche Form der Hysteresekurven und nicht, wie manchmal behauptet, eine vorgelagerte Induktivität. **Siehe** die folgenden Seiten, die Bilder 3 und 4. Der trafotechnische Laie glaubt zuerst an Zufall oder andere gleichzeitige Einwirkungen auf das Stromnetz, wenn beim Trafoschalten das eine Mal die Absicherung auslöst und das andere Mal nicht.

Es existieren immer noch verschiedene Theorien über die Vermeidung und Ursache des Einschaltstromstosses. Manche Fachleute behaupten ein Trafo muss zur Vermeidung des Einschaltstromes im Spannungsnulldurchgang, andere, auch wissenschaftliche Lehrbücher, behaupten ein Trafo muß am Besten im Spannungsscheitel einer Netzspannungshalbwelle eingeschaltet werden. Auch behaupten Hersteller von Halbleiterrelais, dass sich Scheitel-Schaltende Typen oder momentan schaltende Typen bestens zum Schalten von allen Transformatoren eignen.

Es existieren auch verschiedene Theorien wie man die gesamten elektromagnetischen Funktionen im Trafo, auch die Höhe des Einschaltstromes, mit mathematischen Formeln berechnen kann. Die dabei verwendeten Ersatzschaltbilder beweisen alle nur die lückenhaften mathematischen Formeln und umgekehrt. Dabei wurden bisher Vereinfachungen und Annahmen getroffen, die sich aufgrund der Erkenntnisse des Autors als nicht mehr haltbar zeigen. (Zum Beispiel existieren falsche Annahmen, die besagen, dass die Remanenz für den Einschaltstrom keine Rolle spielt, dass der Magnetfluss vor dem Einschalten immer gleich Null sei oder dass das Eisen die vom Trafo zu übertragende Energie zwischenspeichert oder dass der Magnetfluss sich verdoppelt beim Einschalten, unabhängig vom Remanenzpunkt und der Einschaltichtung, dass das Einschalten im Spannungsscheitel am besten sei, usw.).

Alle vom Autor aufgestellten Thesen und Erkenntnisse sind durch Strom- und Spannungsmessungen mittels Stromzange und Speicher Oscilloscop an Ringkern- und anderen Trafos belegt. Diese Messungen beweisen im Umkehrschluss die vom Autor aufgestellten Thesen über das Verhalten des Transformators und seine Arbeitsweise. Der zeitliche Verlauf des Eingangs-Leerlaufstromes zur Netzspannungshalbwelle sagt aus wo sich die Magnetisierung auf der Hysteresekurve gerade befindet. Und zwar präzise zumindest dann wenn der Leerlaufblindstrom sein Maximum hat, weil da die Magnetisierung genau auf einem Endpunkt der Hysteresekurve angekommen, ist was immer beim maximalen Fluss und folglich am Ende einer Spannungszeitfläche und damit der Spannungshalbwelle der Fall ist.

Im Fall der Eisensättigung – welche mehr oder weniger fast immer entsteht beim unkontrollierten Ringkern-Trafo Einschalten – ist *der Kupferwiderstand der Primärwicklung*, zusammen mit dem Netz-Innenwiderstand, *der einzige strombegrenzende* Widerstand im Stromkreis. Also je verlustärmer der Trafo ist, desto höher ist der Einschaltstrom. Das wird leider auch von Fachleuten oft verkannt. Die Netzimpedanz ist ungefähr 0,3 Ohm bei 230 V für 16-32 Ampere Netze, der Widerstand der Primärwicklung hängt stark von der Bauart des Trafos ab und beträgt bei einem guten 1 kVA Ringkern-Transformator ca. 0,2 Ohm. Dann ergeben $230V / 0,5 \text{ Ohm} = 640 \text{ A}_{\text{eff}}$ und ca. 900 A Spitze an einem sehr steifen Netz.) Das liest sich so unscheinbar, stellt aber de facto einen kapitalen Kurzschluss für das Stromnetz dar, der allerdings nur 3-8 Millisekunden dauert, aber doch ausreicht die Spannungsstabilität des Stromnetzes zu stören und die Trafo- Sicherung auszulösen. Die Sicherung vor dem Trafo kann wegen diesem Einschalt-„Kurzschlussstrom“ nicht so ausgelegt werden, dass sie den Trafo wirklich vor Überlastung schützt.

Anschauliche These: Während dem Einschaltstromstoss scheint das Eisen bei einem Ringkern-Trafo wie nicht vorhanden zu sein, weil die Magnetisierung des Eisens in diesem Fall der Sättigung der Induktion nicht mehr durch die Netzspannung geändert werden kann und deshalb der induktive Widerstand fehlt, den die Ummagnetisierung ihrerseits erzeugt und normalerweise einem plötzlichen Stromanstieg entgegensteht.

Die Remanenz ist der Punkt auf der Hysteresekurve, wo die zurücklaufende Kurve die senkrechte Achse der Induktion bei der Feldstärke Null und dem Strom gleich Null schneidet.

Der schlechteste Einschalt-Fall mit dem grössten Einschaltstromstoss entsteht immer dann, wenn die *Remanenz*, das ist die nach dem Ausschalten bleibende Magnetisierung im Eisenkern, eine maximale Höhe und die gleiche Polarität besitzt wie sie die Polarität der einschaltenden Spannungshalbwelle hat und wenn im Nulldurchgang der Spannungshalbwelle eingeschaltet wird, weil dann die treibende Spannungszeitfläche am grössten ist.

Sogar beim Einschalten im Scheitel der Netzspannung entsteht ein großer Stromstoß, wie die folgenden Messkurven (Bild 1) es zeigen.

1 kVA Ringkerntrafo mit scheinbar-schaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet.



Tseme006.cdr

Scheitel-schalter-auf-trafo1.cdr

Bild 1 Einschalten im Scheitel der Netzspannung. Es entsteht ein hoher Einschaltstrom

Der Motorschutzschalter vor dem Trafo löst in weniger als 20 Millisekunden aus, weshalb die obere Kurve der Spannung am Trafo und auch des Stromes sofort wieder zu Null wird.

Leider wird, fälschlicherweise in der Literatur immer noch vom Einschalten im Scheitel der Spannung als dem besten Einschalt- Verfahren gesprochen. Was das bei Trafos mit hoher Remanenz bedeutet ist hier zu sehen.

Merke: Die in einem geschlossenen und luftspaltfreien Eisenkern maximal mögliche *Remanenzstärke* und Polarität hängt nur von der Ausschalt- Spannungszeitfläche und deren Polarität ab und ist von aussen nicht direkt messbar. Je nachdem zu welcher Polarität und momentaner Amplitude der Netzspannung der Trafo zuvor aus und dann wieder eingeschaltet wird, entsteht in Folge kein, ein kleiner oder ein grosser Einschaltstrom, je nachdem wie die Polarität der Einschalthalbwelle zur Remanenz liegt.

Hysteresekurve im Trafoeisen im Dauerbetrieb

Die Hysteresekurve zeigt den Verlauf der Magnetisierung, (Flussdichte B), aufgetragen über der Feldstärke H im Eisen.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

Die Formel: $B = \text{Spannung} \times \text{Zeit} / \text{Kernfläche}$, ist bei einem Ringkerntrafo innerhalb der Hysteresekurve, wo die Permeabilität μ des Eisen hoch ist, anschaulicher als die Formel:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I \cdot N}{l} \quad \left[\frac{Vs}{m^2} = T \right]$$

μ_r ist die magnetische Leitfähigkeit des Eisens, μ_0 die der Luft.

I ist der Strom

N ist die Windungszahl der Primärspule

L ist die Länge der Magnetfeldlinien im Eisen.

(Wenn wie beim Ringkerntrafo das μ_r sehr groß ist, dann kann I sehr klein sein, um die Hysteresekurve voll zu durchfahren. Die entsprechende Hysteresekurve, siehe Bild 3 rechts, ist dann wesentlich schmaler als die in Bild 2 dargestellte.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

je größer die Spannungsamplitude der Trafo-primärwicklung und je niedriger die Frequenz desto größer die Hystereseschleife

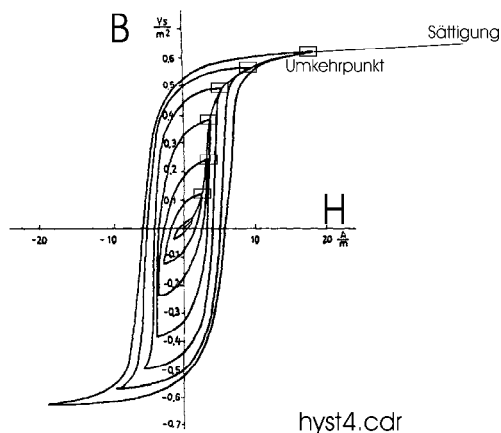


Bild 2 Hysteresekurvenfamilie im Eisenkern eines Trafos

Dargestellt ist in **Bild 2** die Hysteresekurve eines Trafos mit Luftspalt, wie ihn ein EI- Trafo besitzt. Ein Ringkerntrafo hat dagegen eine sehr schmale Kurvenschar, bei der man das Zwiebelprinzip in diesem Maßstab nicht darstellen könnte.

Normalerweise bezeichnet man eine solche Kurve als die Abhängigkeit der Induktion B von der Feldstärke H . Das macht Sinn wenn man bei grossen Feldstärken im Gleichspannungsbetrieb der Spule das Eisen in Sättigung treibt. Der Strom in der Spule verhält sich dabei proportional zur Feldstärke und steigt dann am Ende der Kurve sehr stark an. Das μ_r des Eisens ist dann ab der Sättigung gleich 1, wie bei einer Luftspule. In der Mitte der Kurve ist das $\mu_r \geq 50000$.

Innerhalb der Hysteresekurve ist es anschaulicher, B über der an der Spule einwirkenden Spannungszeitfläche zu betrachten. Die Feldstärke und damit der dazugehörige Spulen-Strom sind bei einem unbelasteten Ringkerntrafo innerhalb der Hysteresekurve verschwindend klein.

Der Ringkerntrafo kommt in seinem Verhalten nahe an einen idealen Transformator heran, wenn man den bis dato hässlichen, hohen Einschaltstrom ausser Acht lässt.

In der Elektrotechnik ist immer der Strom und auch andere Wirkungen des elektrischen Stromes, die Folge einer treibenden Spannung. Ohne Spannung fließt auch kein Strom. Diese Regel kann durch die Anwendung dieser Anschauungsweise nun auch auf den Trafo angewendet werden und ist jedem Elektrotechniker sehr sympatisch.

Auch aus diesem Grund sollte hier beim Wechselspannungs Betrieb über der Abhängigkeit der Induktion B von der einwirkenden Spannungszeitfläche gesprochen werden und die Spannungszeitfläche als die treibende Kraft für den Transport der Magnetisierung im Eisenkern angesehen werden. Das Verständnis darüber was im Trafoeisenkern geschieht wird dadurch sehr erleichtert.

Im eingeschwungenen, stationären Zustand, also im Dauerbetrieb des Trafos gilt:

Eine Netzspannungshalbwelle transportiert die Magnetisierung von einem Umkehrpunkt zum anderen Umkehrpunkt der Hysteresekurve! (Zum Beispiel Von links unten nach rechts oben mit der pos. Netzhalbwelle.) Siehe Bild 2 und 4. Die Funktionsweise der weiter unten beschriebenen TSR Einschaltprozedur legt diese Betrachtungsweise nahe. Die Magnetisierung läuft also auf einer Hysteresekurve im Takt der Spannungshalbwellen hin und her. Auf welcher der zwiebelschalen-artigen Hysteresekurven, siehe Bild 2, die Magnetisierung genau läuft, hängt von der Höhe der Netzspannung und der Dauer einer Halbwelle bei einem gegebenen Trafo ab. Siehe Seite 4. Bei 60Hz läuft die Magnetisierung auf einer kleineren, weiter innen liegenden Kurve als bei 50Hz. Bei 60 Hz und gleicher Spannungshöhe ist die Einwirkungszeit kürzer als bei 50 Hz. Die Spannungszeitfläche der Halbwelle wird dann bei 60 Hz kleiner. Das wird auch durch die Erfahrung unterstützt, dass Trafos die für 60 Hz ausgelegt sind, dann mit 50 Hz betrieben, einen höheren Leerlaufstrom und Einschaltstrom haben, weil diese die Hysteresekurve weiter in die Umkehrpunkte aussteuern. Bei einer kleineren als der Nennspannung, läuft die Magnetisierung auch auf einer kleineren Kurve. Deshalb nimmt der Leerlaufstrom mit fallender Netzspannung ab und umgekehrt.

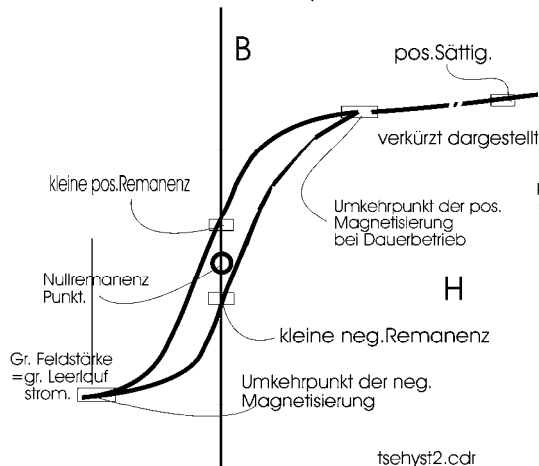
Je nach Eisenkern-Typ sehen die Hysteresekurven in Ihrer Form völlig unterschiedlich aus.

Hysteresekurve eines EI-Trafos
der drei definierte Luftspalte im Kern hat.

Hysteresekurve eines Ringkerntrafos
der keinerlei Luftspalte im Kern hat.

Hysteresekurve

bei Trafos mit Luftspalt, wie z.B. geschweißte Trafos, ist die Kurve gesichert, das heißt flacher und die Remanenz ist deutlich kleiner als bei Trafos ohne Luftspalt.



Hysteresekurve

bei Ringkern-Trafos (Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz

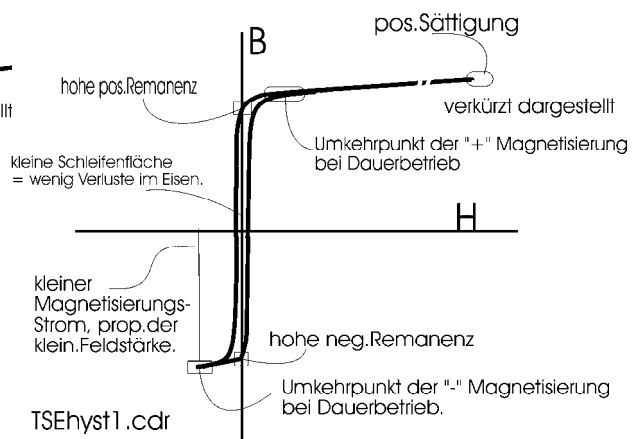


Bild 3 Je nach Eisenkern-Typ sehen die Hysteresekurven, links und rechts in Ihrer Form völlig unterschiedlich aus.

Die links in **Bild 3** dargestellte Kurve zeigt die Hysteresekurve eines geschachtelten Trafos mit E-I Kern, der an den Stossstellen der Bleche 3 Luftspalte im Kern hat. Die maximale positive oder negative Remanenz ist dabei klein. (Die Breite dieser Hysteresekurve ist im Vergleich zu der Kurve vom Ringkerntrafo, zu schmal gezeichnet.)

Die rechts in **Bild 3** dargestellte Kurve zeigt die Hysteresekurve eines Ringkerntrafos der keine Luftspalte im Kern hat. Die maximale Remanenz ist dabei groß. In Wirklichkeit ist die Hysteresekurve des Ringkerntrafos noch schmaler als im Bild 3 rechts gezeichnet. Die Fläche in der Kurve spiegelt die Höhe der Verluste im Kern wieder.

Durch die Induktionsänderung, das ist die Änderung der Flussdichte B , im Verlauf auf der Hysteresekurve, wird dabei in der Sekundärspule die Sekundärspannung induziert. In der Mitte der Hysteresekurve herrscht die Flussdichte $B = 0$. An den Umkehrpunkten herrscht die pos. oder neg. maximale Flußdichte.

Die magnetische Feldstärke „ H “ im Trafo Eisenkern ist mit der magnetischen Flussdichte „ B “ im Kern verkoppelt, wie die Hysteresekurve es zeigt. (Weil die Spannungszeitfläche die Induktion B transportiert, wird hier nun so und nicht wie üblich andersherum argumentiert.) Die Feldstärke H ist also die Folge der Position von B auf der Hysteresekurve. Natürlich ist zum Aufbau des Magnetfeldes der Strom durch die Primärspule nötig. Er ist jedoch in seiner Höhe sehr stark abhängig von der Form der Hysteresekurve, was seine Verwendung zur Beurteilung der Traforeaktion unübersichtlich macht. Die Spannungszeitflächen wirken dagegen auf alle Trafotypen in gleicher Weise.

Die Flussdichte B kann ab der beginnenden Sättigung kaum noch erhöht werden, auch wenn die Spannung oder die Einwirkungszeit erhöht wird. Infolgedessen nimmt der Strom, welcher proportional der Feldstärke H ist, nichtlinear sehr stark zu. Das gesättigte Eisen verliert dabei seine Wirkung im Trafo. - Siehe auch Betrieb mit 50 oder 60Hz oder Kurven vom Trafoeinschalten.-

Der Trafo sollte konstruktiv so ausgelegt sein, dass die Magnetisierung bei Nennbedingungen einerseits annähernd linear läuft und andererseits eine möglichst grosse Amplitude hat, weil damit der Trafo-Eisenkern am besten ausgenutzt wird. Die Hysteresekurve sollte nicht so weit ausgenutzt werden, dass das Eisen in die Sättigung fährt, weil dann der Leerlaufstrom nichtlinear stark ansteigt.

Dieser, der Spannung um 90 Grad nacheilende Leerlaufstrom, fließt dann aber auch bei Last und hat aber mit dem Laststrom nichts zu tun. Der Leerlaufstrom ist alleine der zur Ummagnetisierung gehörende Strom. Die Ummagnetisierung findet immer statt, egal ob der Trafo belastet oder im Leerlauf ist.

Ob sich das Eisen leicht oder nur schwer ummagnetisieren lässt, ist stark abhängig vom Trafokern-typ und vom Kernmaterial.

Der folgende aufgeführte **praktische Beweis** dient dafür, dass sich die Flussdichte B im Eisen eines Trafo nicht über die Sättigung erhöhen lässt, auch wenn die treibende Spannung, die Einwirkungszeit und damit der Spulenstrom, beliebig gross wird: Bei Magnetresonanz-, auch Kernspin-Anlagen genannt, werden supraleitende, in sich kurzgeschlossene Luftspulen benutzt, welche eine permanente Induktionen B von mehr als 20 Tesla erzeugen. Dort ist kein Eisenkern verwendet, weil dieser wegen seiner Sättigung ab ca. 2,2 Tesla die gleichmässige Feldverteilung nur stören würde. Diese Erkenntnis wird nicht von allen Fachleuten als selbstverständlich angesehen, weil diese bisher davon ausgehen das Eisen ließe sich beliebig stark magnetisieren, wenn nur die Energie dazu bereitgestellt wird.

Bild 4, beim Transformator im Leerlauf.

Oben. Verlauf der Netzspannung. Mitte: Abgewinkelte Hysteresekurve, Unten: Leerlaufstrom = Magnetisierungsstrom.

Fortlaufende Hysteresekurve im Eisenkern eines 50Hz Transformators im Leerlauf

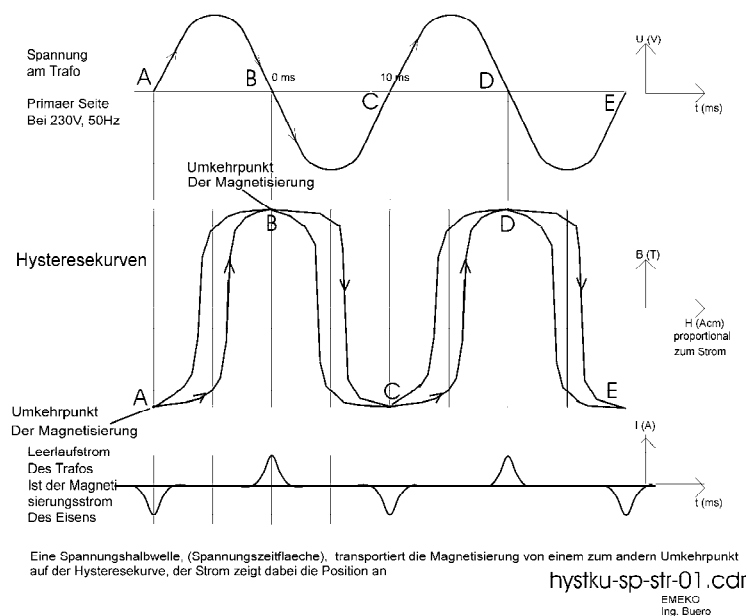


Bild 4, zeigt die folgenden Verhältnisse

- Oben ist der Verlauf der Netzspannung zu sehen, von links nach rechts laufend.
- Eine „abgewinkelte“ Hysteresekurven für den Dauerbetriebsfall eines Trafos, ist mit der zur Netzhalbwelle gehörenden Laufrichtung der Magnetisierung in der Mitte zu sehen.
- Unten sieht man den dazu gehörende Leerlaufstrom, auch Magnetisierungsstrom genannt.

Der typische Leerlaufstrom-Peak entsteht erst wenn die Magnetisierung nichtlinear wird und in Richtung Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve läuft. Beim Durchlaufen des linearen Teils der Hysteresekurve ist kaum ein Strom messbar. Beim Ringkerntrafo schon gar nicht.

Daher kommt auch die spitzige und nichtsinusförmige typische Form des Leerlaufstromes, die erst dann erscheint, wenn die treibende Netzspannungshalbwelle genügend lange gewirkt hat, also fast zu Ende ist und die Hysteresekurve sich neigt.

Deshalb liegt der Magnetisierungsstrom-Scheitel auch im Nulldurchgang der Spannung und ist damit ein induktiver Blindstrom, welcher der Spannung um 90 Grad nacheilt. Dieses Nacheilen des Stromes gilt aber nur für den eingeschwungenen Zustand und überhaupt nicht für den Einschaltfall. Was leider in der Literatur nicht immer so gesehen wird.

Hysteresekurve und Remanenz

Der Magnetfluss im luftspaltlosen Eisenkern eines Elektromagneten wird durch die primärseitigen „Ampere-Windungen“ erzeugt. Bei der **Speisung mit Gleichspannung** ist das einfach auszurechnen.

$$\Phi = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I \cdot N \cdot A}{l} \quad [Vs = Wb]$$

Φ = Magnetfluss, I = Strom, N = Windungen, A = Kernfläche, l = Magnetkreisfeldlinienlänge, μ_r = Materialabhängiger Faktor.

Bei der **Speisung mit Wechselspannung**, stellt sich ein messbarer Primärstrom *beim guten* Ringkerntrafo, erst bei einer sekundärseitigen Belastung ein. Der Laststrom hat jedoch mit dem Magnetisierungsstrom nichts zu tun. Für den Strom I ist deshalb der Leerlaufstrom in die Formel einzutragen.

Ein realer Transformator benötigt auch ohne Belastung etwas Energie, $U \times I \times t$, zum magnetischen umpolen des Eisenkernes und zur deckung der Wirbelstromverluste im Eisenkern. Es fliesst dabei der primärseitige Leerlaufstrom, der sich erst zum Ende der Primärseitigen Spannungshalbwellen mit nennenswertem Betrag zeigt. Das liegt an der Form der Hysteresekurve, welche die Magnetisierung im Eisenkern bei Wechselspannungs-Betrieb beschreibt. [Siehe Bild 2, 3 und 4.](#)

In der Literatur findet man Schaltvorschläge zum Aufzeichnen der Hysteresekurve mittels Lissajous Figuren auf einem Oscilloscop.- zum Beispiel bei:

WWW.fh-duesseldorf.de/DOCS/FB/MUV/staniek/dokumente/hysteresese.htm.

Trafos werden bei der Berechnung so ausgelegt dass keine nennenswerte Sättigung im Eisen beim Nennbetrieb entsteht. (Das Eisen soll möglichst nur im linearen Teil der Hysteresekurve ummagnetisiert werden.)

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

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

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

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

Man sieht in obiger Formel ebenfalls: Je grösser die Eisenkernfläche die senkrecht zum Magnetfluss steht und je grösser die Induktion ist, desto *weniger Windungen* sind für eine bestimmte Betriebs-Spannung nötig. Damit ein Trafo kostengünstig wird nutzt man die mögliche Induktion je nach Kern-Bauform, von 1,4 - 1,7 Tesla deshalb voll aus, weil man damit Eisen und indirekt, weil die Windungsumläufe kurzer werden, auch Kupfer spart. Zum Nulldurchgang der Spannung befindet sich die Magnetisierung wie gesagt genau im zugehörigen Umkehrpunkt der Hysteresekurve, wie es der Magnetisierungs- oder Leerlaufstrom anschaulich zeigt. [Siehe Bild 4.](#) Der zeitliche Verlauf des Leerlauf-Stromes der in den Trafo hineinfliesst, beschreibt also in Verbindung mit der Primärspannung, den momentanen Zustand der Magnetisierung im Eisenkern über die Zeit.

Eisenkern ohne Remanenz:

Bei einem Trafo ohne bleibende Magnetisierung, Remanenz genannt, bleibt die Magnetisierung nach dem Ausschalten des Trafos nicht dort auf der Hysteresekurve sitzen wo sie sich zum Ausschaltzeitpunkt der Primärspannung gerade befindet.

Hier läuft die Magnetisierung nach dem Ausschalten der Primärspannung auf direktem Weg genau zur symmetrischen Mitte der Hysteresekurve. Eisenkerne ohne *Remanenz* haben grosse Luftspalte und sind für 50 HZ Trafos unwirtschaftlich.

Nur hier ist das Einschalten im Scheitel der Netzspannung richtig, egal mit welcher Polarität, weil ja dann am Anfang nur die halbe Hysteresekurve durchfahren wird, wofür die halbe Spannungszeitfläche gerade richtig ist, siehe [die Bilder 2 und 3.](#)

Eisenkern mit Remanenz:

[Siehe](#) die Hysteresekurven in den Bildern 2 und 3, hat fast jeder 50 HZ Trafo eine mehr oder weniger grosse Remanenz im Eisenkern.

Bei jedem Trafo mit Remanenzverhalten läuft die Magnetisierung nach dem Ausschalten nicht einfach wie oben geschildert zur Mitte der Hysteresekurve. Wo die Magnetisierung hinläuft hängt von der Form der Hysteresekurve, [Siehe die Bilder 2 und 3](#), und zusätzlich dazu vom Ausschaltzeitpunkt ab.

Wird genau im Nulldurchgang der Speisespannung ausgeschaltet, wenn also die Magnetisierung auf dem Umkehrpunkt der Hysteresekurve steht, dann läuft die Magnetisierung von dort aus auf der rückwärts laufenden Hysteresekurve zum höchsten möglichen *Remanenzpunkt* auf der B-Achse bei Feldstärke Null. Das ist der Schnittpunkt der Kurve mit der senkrechten Achse. [Siehe die Bilder 2 u. 3](#)

Remanenz heisst bleibende Magnetisierung und verkörpert das magnetische Gedächtnis des Eisenkerns in Form einer geringen gespeicherten dauermagnetischen Energie.

Der Weicheisenkern ist hier also auch etwas dauermagnetisch. Diese kleine dauermagnetische Energie bleibt aber nur erhalten solange der dazu gehörige Magnetfluss im Eisen erhalten bleibt. Nach dem Auftrennen des Eisenkerns verflüchtigt sich dann sofort dieser kleine Dauermagnetismus, der übrigens um mehrere Größenordnungen kleiner ist als bei einem echten Dauermagneten.

[Siehe ein eindrucksvoller Versuch zum Beweis der Remanenz unter: www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/e_lehre_1/induktion/trafo.htm](http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/e_lehre_1/induktion/trafo.htm) . Oder die Beschreibung am Ende dieses Vortrags in Bild 10.

Im *Remanenzpunkt* ist damit die Polarität und die Amplitude der letzten Ummagnetisierung und damit der letzten vor dem Ausschalten wirkenden Spannungshalbwellenzeitfläche gespeichert.

Es gibt Einschaltvorrichtungen, die sich diesen Umstand zunutze machen, sich die Ausschaltichtung merken und den Einschaltzeitpunkt damit steuern. Aber beim ersten Mal einschalten, mit unbekannter Remanenz geht das überhaupt nicht und ganz ohne Einschaltstrom einschalten geht damit auch nicht.

Die Magnetisierung kann wie schon gesagt nach dem Ausschalten nicht im Umkehrpunkt der Hysteresekurve stehen bleiben. Weil kein Primärstrom mehr fließt, kehrt die Kurve auf den Wert der Induktion B bei Strom- und Feldstärke- Null zurück.

Der Remanenzpunkt ist stabil und bleibt lange erhalten. Es gibt allerdings eine noch höhere und zeitlich instabile Kurzzeitremanenz die bei ganz kurzen Netzunterbrüchen von 2 - ca. 20 Millisekunden erschwerend für die Beherrschung des dann folgenden hohen Einschaltstrom zum Tragen kommt.

[Die Remanenz in Eisenkernen wurde schon in den ersten Computern bei den Ringkernspeichern ausgenutzt. Nach dem Einschreiben blieb die Binäre Information per Remanenz erhalten. Beim Auslesen wurde die Remanenz nicht beeinflusst. Beim Löschen wurde der Kern entmagnetisiert.](#)

Trafo einschalten ohne Einschaltstromstoß: (Das Verfahren beweist anschaulich die Vorgänge im Trafo.)

Mit den unipolaren Vormagnetisierimpulsen vom Trafoschaltrelais, TSR, wird die Magnetisierung im Eisenkern, zuerst schrittweise zu dem max. Umkehrpunkt der Hysteresekurve hin transportiert und dann wird gegenphasig dazu voll eingeschaltet. Es wirken hierbei nur die Primär-Spannungszeitflächen.

Mit jedem einzelnen Spannungs- Zeitflächen Zipfel wird so die Magnetisierung ein Stück auf einen höheren **Remanenzpunkt** gehoben. Bei einer permanenten Vor-Magnetisierung dieser Art, also ohne das folgende Volleinschalten, läuft die Magnetisierung auf der Kurve irgendwann nur noch zwischen dem oberen **Remanenzpunkt** und dem dazugehörigen etwas höher liegenden Betriebsumkehrpunkt hin und her. [Siehe Bild 5 und 6](#). Zu viele Vormagnetisiererspannungszipfel schaden dabei nicht, will heißen führen zu keinem höheren Leerlaufstrom. Was nachmessbar ist.

Das Eisen summiert dabei die unipolaren Spannungszipfel nur bis zum Erreichen der max. Remanenz auf, es reagiert dann ab der max. Remanenz wie eine magnetische Feder. Die Magnetisierung läuft dabei mit dem Spannungszipfel immer nur zum Max. Umkehrpunkt und in der Pause, bis der nächste gleichpolige Spannungszipfel kommt, wieder auf den max. **Remanenzpunkt** zurück. [Siehe Bilder 5, 6, 7](#). Es entsteht dabei nur der Leerlaufblindstrom- peak des Trafos, der immer dann seinen Scheitel erreicht, wenn der max. Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve erreicht ist. [Siehe Messungen vom Einschalten von Trafos im Leerlauf und Grafik im Bild 5](#). Natürlich ist die Prozedur so gestaltet dass, für den Fall dass die Remanenz vor dem Einschalten entgegengesetzt gepolt war, die nötige Menge und ein oder zwei Vormagnetisierzipfel mehr als nötig zum Trafo geschickt werden. Dann wird gegen polig zu der Vormagnetisierung voll eingeschaltet und der Trafo verursacht damit überhaupt keinen Einschaltstromstoß.

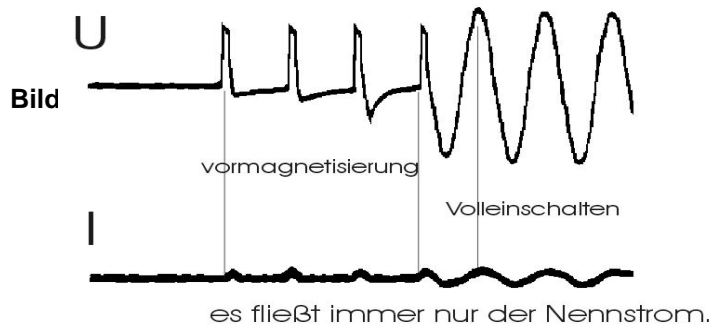
Das richtige Aussteuern vom **Remanenzpunkt** hin zum Umkehrpunkt ist der Grund weshalb die Zipfelbreite am TSR justiert werden und damit an die Trafotype angepasst werden kann. Die Justage ist ein-

fach und kann ohne Messgeräte, nur nach dem Gehör geschehen. **Die Einstellung ist unabhängig von der ohmschen Belastung.** (Früher untersuchte automatisch arbeitende Anpassungen waren bisher zu kostenaufwendig.)

Messkurven der TSR Einschalt-Prozedur.

1kVA geschachtelter Trafo mit TSR Verfahren ** eingeschaltet. Mit Nennlast belastet.

mit unipolaren fixen Spannungsabschnitten vor-magnetisiert für 60msec.

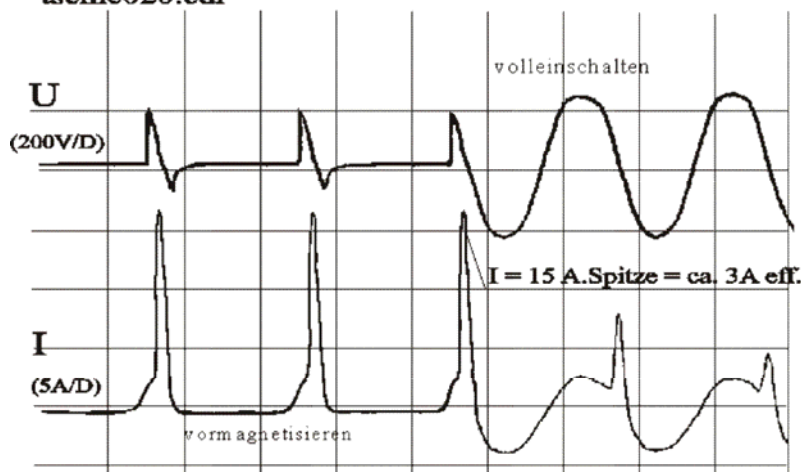


** das TSR Verfahren ist patentiert

tseme010.cdr

Wenn die positive Vormagnetisierung zu stark ist, das Poti auf dem Trafoschaltrelais steht zu weit rechts, zeigen sich Stromspitzen.

tseme020.cdr



1 kVA Ringkerntrafo mit 230V mit ohm. Teillast, mit TSR2 eingesch. Das Potentiometer für die Vormagnetisierung ist zu weit nach rechts gedreht. Die Vormagnetisierung ist zu stark, was die Blindstromspitzen am Ende jeder positiven Halbwelle deutlich zeigen..

Bild 6, zeigt die zu starke Vormagnetisierung

Bild 7 zeigt eine zum Bild 6 gehörende Hysteresekurve mit geringer pos. Sättigung.

Eine stabile und sichere Arbeitsweise der Einschaltprozedur wird mit einer etwas zu starken Vormagnetisierung erreicht, so dass beim Vormagnetisieren etwas mehr als der Leerlaufstrom zum fließen kommt.

Die leichte positive Sättigung wirkt hier wie eine begrenzende Wand, an welche die Magnetisierung vor dem Volleinschalten gefahren wird. Siehe **Bilder 6 und 7**. Der effektive Leerlaufstrom bleibt dabei noch weit unter der Höhe des Nennstromes.

Zugehörige Hystereseurve zum etwas zu starken Vormagnetisieren.

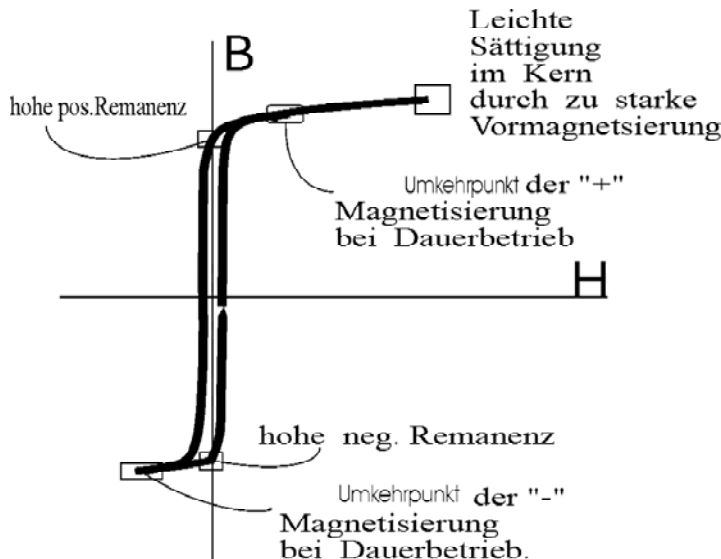


Bild 7, Zugehörige Hystereseurve beim etwas zu starken positiven Vormagnetisieren.

So wie im Bild 6 sieht der Leerlaufstrom, das ist die untere Kurve, bei zu starker positiver Vormagnetisierung durch das TSR aus, wenn die Magnetisierung in eine leichte positive Sättigung getrieben wird. Ein Strom von 3 A eff. als Vormagnetisierstrom sind trotzdem nicht viel für diesen 1kVA Trafo, dessen Nennstrom bei 4A liegt.

Bei einer permanenten Beaufschlagung des Trafos, nur mit den zu breiten positiven Vormagnetisierungsspannungszipfeln, wie im Bild 6 gezeigt, und keine darauf folgenden Volleinschaltung, würde die in Bild 7 abgebildete Hystereseurve nur zwischen dem hohen pos. Remanenzpunkt und dem Umkehrpunkt bei leichter positiver Sättigung durchfahren. Das kann auch nachgemessen werden und ist damit eine gut beweisbare Theorie.

Die Spannungs- und Strommesskurven belegen somit eindrucksvoll die Wirkungsweise des TSR und der Funktionen im Trafo und stützen die hier dargelegte Trafo-Theorie auf anschauliche Weise. Die bisherige Vernachlässigung der Auswirkung der Remanenz auf die Höhe des Einschaltstromes kann damit als Fehler bezeichnet werden.

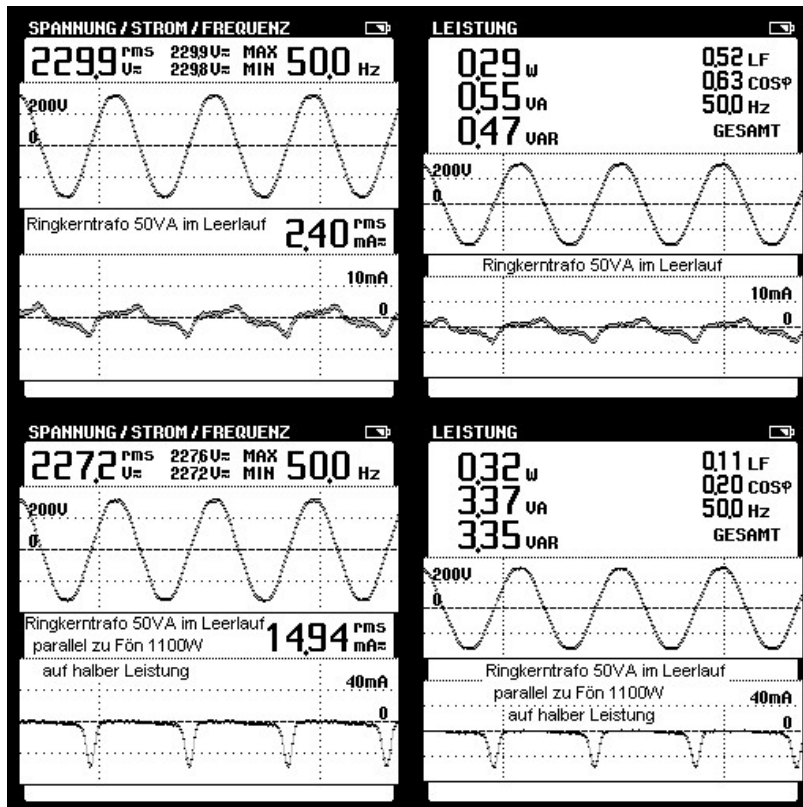
Praktisches Beispiel für die Magnetisierungstheorie aus dem Alltag:

Die permanente positive Sättigung auf eine Seite der Hystereseurve hin wird zum Beispiel auch dann erzielt, wenn ein Trafo mit einem positiven Gleichspannungsanteil betrieben wird, wie es in manchen Stromnetzen leider vorkommt. Das passiert zum Beispiel dann, wenn die positive Halbwelle etwas grösser ist als die zum Beispiel durch eine fremde Last stärker belastete negative Halbwelle. Das kann man selber beobachten, wenn in einem Haushalts-Stromnetz, gleichzeitig mit dem Trafo, Lasten betrieben werden welche nur die eine, hier die negative Halbwelle nutzen. (Haarföhn-Widerstandslast in Sparschaltung über eine Diode betrieben.) Wenn der Trafo ein Ringkerntrafo mit hoher Ausnutzung der Induktion ist, der nur geringe DC Anteile verträgt, und gleichzeitig am Netz, nicht über den Trafo, ein Föhn mit 1kW in dieser Sparschaltung betrieben wird ist das zu beobachten. Die dabei durchlaufene Hystereseurve ähnelt dann der in Bild 7 gezeigten.

Der Trafo fängt dann an zu brummen, was ein Anzeichen für die Kernsättigung ist. Die pos. Spannungshalbwelle wird dabei durch den Föhn **nicht** belastet und ist deshalb wegen der Netzimpedanz von ca. 0,5 Ohm etwas höher als die negative Halbwelle die belastet wird. Wohlgemerkt der Föhn wird nicht über den Trafo sondern nur am gleichen Netz betrieben! Die positive Seite der Hystereseurve wird dabei bei jeder Netzperiode stärker angesteuert. Man kann das auch mit einer Stromzange und einem Oszilloscop sehr schön nachmessen und findet dann diese Beschreibung bestätigt, die besagt,

dass der Trafo in einer Halbwellen, in der Nähe vom Nulldurchgang dann mehr Strom zieht als in der anderen Halbwellen. Das untenstehende Bild zeigt den umgekehrten Fall.

Wenn ein Trafo mit Wechselspannung mit einem kleinen positiven Gleichspannungsanteil betrieben wird, zeigt sich das wie in den unteren beiden Bildern zu sehen ist, an einem unipolar erhöhten Leerlaufstrom.



Die negative- ist hier größer als die positive Spannungszeitfläche. Verursacht durch Belastung nur der positiven Netzhalbwellen mit einer Einweg Gleichrichterschaltung mit 1 kW Leistung, beim Föhn in Sparschaltung, halbe Leistung..

Messkurven wenn die positive Vormagnetisierung beim Einschalten mit dem TSR Prinzip für diesen Transformator zu schwach ist: Das Poti steht zu weit links.

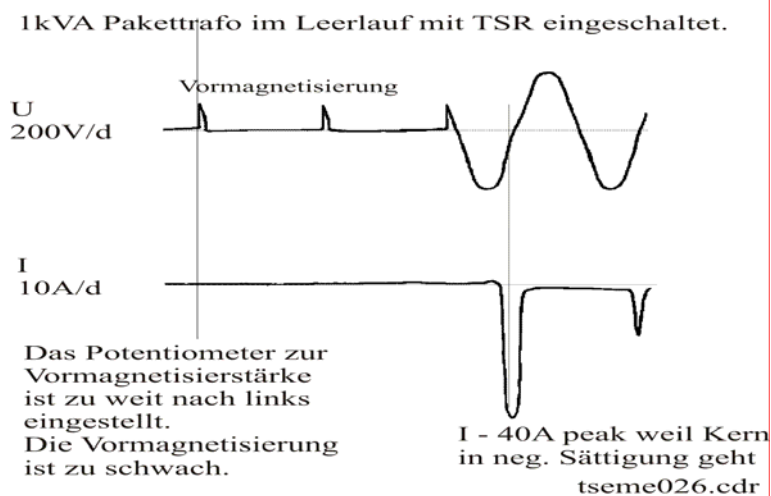


Bild 8 zeigt Messkurven wenn die positive Vormagnetisierung beim Einschalten mit dem TSR Prinzip für diesen Transformator zu schwach ist: Das Poti steht zu weit links.

So sieht der Stromverlauf beim Einschalten nach einer zu schwacher positiver Vormagnetisierung aus. Die Spannungszipfel sind nicht breit genug, die Magnetisierung bis zum positiven Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve, siehe unten, zu transportieren.

Der positive Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve, siehe unten, wird hier nicht erreicht, was zum richtigen Einschalten nötig wäre. Die Magnetisierung auf der Hysteresekurve erreicht im positiven Teil nur „ungefähr“ die obere Mitte.

Das Volleinschalten startet dann von diesem Punkt aus in der oberen Mitte der Hysteresekurve. „Ungefähr“ deshalb, weil man mit der Strommessung nur erfassen kann, wenn die Betriebs-Umkehrpunkte der Hysteresekurve verlassen werden und sich infolge dessen ein dann erst messbarer Blindstrom zeigt.

Der Lauf der Magnetisierung im linearen Teil der Hysteresekurve stellt sich nicht durch einen nennenswerten und messbaren Blindstrom dar.

Beim Volleinschalten mit der vollen negativen Spannungshalbwellen ab diesem Punkt auf der Hysteresekurve, wird dann die Magnetisierung in eine negative Sättigung getrieben, weil die Hysteresekurve nicht symmetrisch durchlaufen wird. (Merke: Die Spannungszeitfläche einer vollen Spannungshalbwellen transportiert die Magnetisierung von einem zum anderen Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve und wenn die volle Spannungshalbwellen nicht vom Umkehrpunkt auf der Kurve ausgeht, wird die Magnetisierung in die Sättigung getrieben.) Bei dem hier entstehen negativen Einschaltstrom-Peak kann eine träge Sicherung jedoch noch nicht auslösen, denn es fließen nur ca. 40A peak, was hier, wegen der schmalen Stromzeitfläche in etwa einem Nennstrom von 4A_{eff} entspricht.

Im Gegensatz zum zu starken Vormagnetisieren, wo die kleinen Überstromspitzen schon beim Vormagnetisieren auftreten, was direkt nach dem Netz einschalten zu beobachten ist, tritt der hier abgebildete Fall des Überstromes erst nach dem Volleinschalten auf. Die Hysteresekurve im Bild 9 macht es anschaulich, weshalb der Überstrom dann entsteht.

Hysteresekurve wenn durch das TSRL zu wenig pos. Vormagnetisiert und dann voll- eingeschaltet wird.

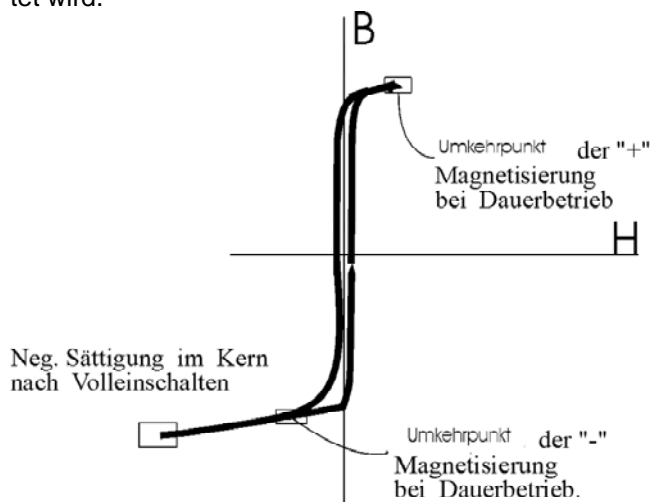


Bild 9 zeigt die Hysteresekurve wenn durch das TSRL zu wenig pos. Vormagnetisiert und dann voll- eingeschaltet wird. Siehe auch Bild 8.

Beim **Zu wenig Vormagnetisieren** wird die Hysteresekurve nur etwa bis zur Mitte der oberen senkrechten Hälfte durchfahren. Die dem Vormagnetisieren folgende volle negative Spannungshalbwellen treibt dann das Eisen in die negative Sättigung. Siehe Bild 8 der TSR Einschaltprozedur.

Die hier gezeigten Strom und Spannungs- Messungen mit der TSR- Einschaltprozedur, bei verschiedenen Einstellungen der Vormagnetisierstärke, beweisen unmissverständlich:

1.) Dass die Magnetisierung nur durch die Spannungszeitflächen der Primärspannung bewegt wird

und

2.) Dass der Remanente Magnetfluss im schlechtesten Einschaltfall eben nicht gleich Null ist, sondern entsprechend der Remanenzhöhe von diesem Betrag ausgeht von dem aus dann die weitere Magnetisierung bis zur Eisen- Sättigung erfolgt.

Weitere Beschreibung des TSR Prinzips.

Beim ersten Mal Netzeinschalten dauert die Vormagnetisierung deutlich länger, als wenn das TSR mit dem Steuereingang wiederholt ein und ausgeschaltet wird. Weil beim Schalten mit dem Steuereingang immer nur definiert in Richtung der Vormagnetisierung ausgeschaltet wird. (Der Weg auf der Hysteresekurve ist dann beim erneuten Einschalten, jeweils nur vom oberen Remanenzpunkt bis zum oberen Umkehrpunkt durch die Vormagnetisierung zurückzulegen, was damit eine kurze Einschaltverzögerung ergibt.)

Deshalb kann besonders beim Netzeinschalten, vom Beobachter der Fall der zu starken Vormagnetisierung deutlich vom Fall der zu schwachen Vormagnetisierung unterschieden werden, weil der Zeitpunkt des Brumm-Geräusches als Reaktion auf die Stromspitzen ein anderer ist. Die Einstellung des TSR ist jedoch völlig unkritisch.

Die hier gezeigten Extreme sind hier nur für das bessere Verständnis so eingestellt und gemessen worden und treten in der Praxis nicht so deutlich in Erscheinung.

Credo für verlustarme Trafos.

Wenn keine Wärmeabfuhr mit Lüftern aus dem Schaltschrank erlaubt ist dann müssen Trafos verlustarm sein. Z.B. in einem Reinraum oder umgekehrt in einer sehr staubreichen Umgebung .

Der beste Weg ist es, dann einen verlustarmen Ringkerntrafo mit mehr als doppelter Leistung als benötigt zu nehmen.

Der dann doppelte aber immer noch sehr kleine Leerlaufstrom fällt nicht ins Gewicht, weil der Leerlaufstrom beim Ringkerntrafo eben 100 mal kleiner ist als beim eckigen Trafo. Der beim Ringkerntrafo dann auftretende hohe Einschaltstromstoss wird mit dem TSR unter allen Umständen vermieden. Die Gesamt -Verluste sind dann so gering, dass der Trafo im geschlossenen Gehäuse bei Belastung nur handwarm wird.

Der beste verlustarme Trafo ist ein Ringkerntrafo.

Ein Ringkerntrafo bringt viele Vorteile. Geringste Eisenverluste, sehr geringer Leerlaufstrom, kleines Gewicht, kleines Streufeld, grosses Wickelfenster, weshalb geringe Kupferverluste einfach machbar sind. Wenn der Einschaltstrom durch physikalisch richtiges einschalten unterbunden wird braucht ein sonst nötiger erhöhter Wicklungswiderstand nicht mehr den Einschaltstrom zu begrenzen. Der Einschaltstrom ist beim Ringkerntrafo von Natur aus viel höher als bei eckigen Trafos. Er beträgt bis zum 80-fachen des Nennstromes für die Dauer einer Netzhalbwelle, wenn die Kupferwickel verlustarm ausgelegt sind.

Aber mit einem TSR vor den Trafo geschaltet wird der Einschaltstrom gänzlich unterbunden. **Dann hat der Ringkerntrafo nur noch Vorteile.**

Ursache von Schäden an Ringkerntrafos in der Vergangenheit durch den Einschaltstromstoß:

Lockere Windungen führen zu Reibung der Drähte aneinander durch die Kraftwirkung der grossen Einschaltstromstösse.

Durch den grossen Einschaltstrom scheuern die Drähte der Primärwicklung aneinander, weil bei hohem Strom grosse Magnetkräfte entstehen, welche an den Drähten zerren.

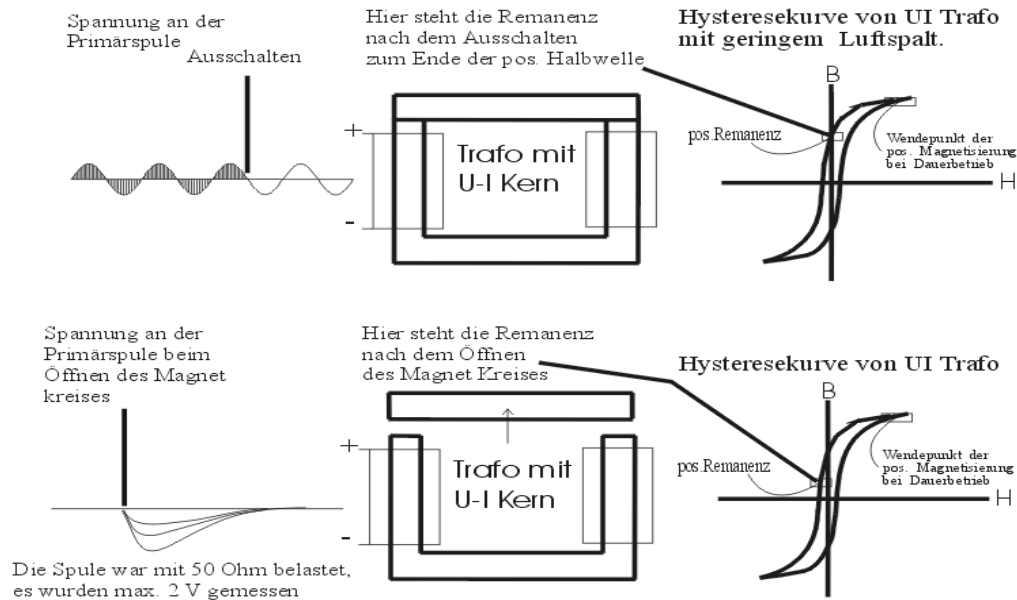
Deshalb bekommen unvergossene Ringkerntrafos ohne Einschaltstromvermeidung dadurch nach und nach das Problem des Windungsschlusses, weil irgendwann die Lackisolation durchgescheuert ist und werden zerstört.

Das führte in der Vergangenheit zu unzufriedenen Kunden, wenn die Wicklungen nicht mit Giessharz durch- getränkt waren.

Durch das Vermeiden der Einschaltströme ist diese Schadensursache auch ohne Giessharztränkung an der Wurzel behoben.

EMEKO, Version vom 10.02.08

Versuchsbeschreibung zum Nachweis der Remanenz im Trafo Eisenkern



Beim Öffnen des Magnetkreises durch schnelles abheben des I-Schenkels, entsteht eine Selbstinduktions-Spannung an der Primär und Sekundärspule. Dieser Spannungsimpuls entsteht durch den Abbau der Remanenz. Die Remanenz kann sich nur im geschlossenen Magnetkreis halten. Im entstehenden Luftspalt reicht die magnetische Spannung nur noch, um einen wesentlich kleineren Magnetfluß aufrecht zu erhalten. Nach einem erneuten Schließen bleibt die Remanenz auf diesem niedrigeren Niveau stehen. Die anfangs hohe Remanenz wurde durch das Öffnen des Magnetkreises abgebaut.

Die Remanenz verkörpert eine im Magnetkreis gespeicherte Energie, die beim Entladen frei wird, wie an der Erzeugung des Spannungsimpulses sichtbar wird. Wird der Magnetkreis mehrmals wieder geschlossen und geöffnet, dann wird der Spannungspuls kleiner, verschwindet aber nicht ganz, weil eine geringe Remanenz erhalten bleibt..

Remanenz-vers-1.cdr

Bild 10 , Versuch für Remanenznachweis

Autorenbeschreibung:

Der Autor und Erfinder des Einschaltverfahrens hat zuerst als Mitarbeiter der Fraunhofer Gesellschaft und später als selbstständiger Ingenieur, in jahrelanger Arbeit untersucht was im Trafo beim Dauerbetrieb, beim Ausschalten und vor allem beim Einschalten abläuft und hat dabei eine Menge über den Trafo gelernt und hat versucht es mit diesem Vortrag in kurzer und verständlicher Form weiterzugeben. Der Autor hat ausserdem intensiv mit mittelständischen Trafobauern zusammengearbeitet und die Erkenntnisschritte mit diesen Trafobauunternehmen immer wieder abgeglichen. Der Autor ist seit über 20 Jahren Inhaber eines Ingenieurbüros und beschäftigt sich heute im Wesentlichen mit der Kunden Beratung, der Vermarktung und der Weitere Entwicklung für die Trafoschaltrelais.

Einzig aktiver Lizenznehmer und Hersteller der Trafoschaltrelais ist die Fa. FSM-Elektronik.

Weitere Infos unter www.emeko.de