

C:\word-texte\fzart\verlustarmetrafos.doc, emeko, 09.05.08

Trafo-Physik verstehen, nicht nur beim Trafoeinschalten, vermeiden von Verlusten im Trafo.

Es wird anschaulich erklärt, wie man verlustarme Transformatoren bauen kann, 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.!

Das Verstehen der Ursache des Einschaltstroms, erfordert ein physikalisches Verständnis darüber was im Trafo im Dauerbetrieb, beim Ausschalten und beim Einschalten passiert.

Aus diesem Grund wird zuerst das Verständnis für die Physik im Trafo Eisenkern vermittelt und dann die neue Einschalt-Technik erklärt, die es erlaubt den Einschaltstromstoß zu vermeiden. Denn die Vermeidung des Einschaltstromstoßes erlaubt es, die Transformatoren mit weniger Eigenverlusten zu bauen als dies bis jetzt möglich ist, weil durch die Verlustarme Auslegung der Einschaltstrom des Trafos alleine, unweigerlich größer und unbeherrschbar würde, durch das richtige Einschalten jedoch ganz entfällt.

Das richtige Einschalten und die Trafophysik hängen zusammen.

Durch das Verstehen der Wirkung der Vormagnetisierung, welche bei dem vorgestellten Einschaltverfahren benutzt wird, wird vom Leser dieses Beitrags wiederum die Trafophysik besser verstanden.

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 möchte es mit diesem Vortrag in kurzer und verständlicher Form weitergeben. Der Autor hat außerdem intensiv mit einem mittelständischen Trafobauer zusammengearbeitet und die Erkenntnisschritte mit diesem Trafobauunternehmen immer wieder abgeglichen.

Im Folgenden werden einige grundlegende Begriffe über die magnetischen Vorgänge im Transformator und die damit verbundene Arbeitsweise der Einschaltprozedur erklärt. Es werden die Begriffe Hystereskurve, Remanenz, Sättigung, Induktion, Magnetflussdichte, Magnetfeldstärke, die Wirkung der Spannungszeitfläche einer Netzspannungshalbwelle auf die Magnetisierung im Eisenkern anschaulich mittels gemessenen Spannungs- und Stromkurven erklärt.

Grundprinzip der Trafoarbeitsweise beim fast idealen Trafo, (Ein Ringkerntrafo ähnelt einem idealen Trafo).

Es wird vom Autor der Ringkerntrafo als Referenz eines fast idealen Trafos verwendet, weil sich am realen Ringkerntrafo auch reale Messungen machen lassen, welche zu den gefundenen Ergebnissen führten.

Leerlaufbetrieb eines fast idealen Ringkerntrafos: Die Primärspule magnetisiert das Trafoeisen ständig um. Diese Ummagnetisierung geschieht bei 50 Hz Netzfrequenz 50 Mal in der Sekunde. Die Netzspannung ändert sich dabei sinusförmig und treibt dabei einen kaum messbaren Strom durch die Primärspule. Das Eisen im Trafokern erfährt dabei durch das Einwirken der Spannungszeitfläche einer Sinushalbschwingung eine Änderung der magnetischen Flussdichte, Induktion genannt, die durch die Form der Hysteresekurve beschrieben ist. Gleichzeitig wird durch die ständige Änderung des Magnetflusses 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. Ein Ringkern-Trafo mit der Übersetzung 1, erzeugt auf der Sekundärseite im Leerlauf eine Spannung welche genau gleich der Primärspannung ist.

Die herrschende Lehrmeinung geht davon aus, dass die Hysteresekurve durch die Wirkung des Primärstromes angesteuert wird. – Darstellung der Hysteresekurve als B über H . H ist stromproportional. –

Nur ist dieser Strom beim Ringkerntrafo derart klein, beim Trafo mit Luftspalt im Kern jedoch groß, also für verschiedene Trafotypen sehr uneinheitlich, dass es bei der weiteren Betrachtung als Sinnvoll erscheint, von einer Spannungszeitflächen getriebenen Bewegung der Magnetisierung auf der Hysteresekurve zu sprechen. Diese zum Durchlaufen der Hysteresekurve nötige Spannungszeitfläche ist aber auch bei allen anderen für 50 Hz ausgelegten Trafotypen gleich einer Netzspannungshalbwelle und ist überhaupt nicht abhängig vom Typ des Trafos. Also unabhängig vom Kerntyp. Bei anderen Trafos als Ringkerntrafos ist bei gleicher Trafogröße dieser Primär-Strom allerdings ca. 100 Mal größer. Außerdem ist die Netzspannung auch deshalb als Ursache der Magnetisierung anzusehen, weil sie von der Rückwirkung des Trafos über den unterschiedlich hohen Leerlaufstrom nicht beeinflusst wird.

Im Weiteren Verlauf der Erklärung wird also davon ausgegangen, dass die auf die Primärspule einwirkende Spannungszeitfläche diejenige Größe ist, welche die Magnetisierung im Trafo Eisenkern auf der Hysteresekurve transportiert.

Das Verständnis über das elektrische und physikalische Verhalten eines Trafos wird damit erleichtert und sozusagen normiert.

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.

Das Eisen im Ringkerntrafokern dagegen vergrößert das L der Primärspule um ca. den Faktor 1000-10000, weshalb dann der Primärstrom auch um diesen Faktor kleiner ist. 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. Gelangt die Induktionsdichte jedoch in den Bereich der Sättigung, was durch eine zu große Spannungszeitfläche einer Sinushalbschwingung oder durch eine zu geringe Windungszahl oder durch eine zu geringe Kernfläche passieren kann, dann wird das L der Primärspule nahezu gleich Null.

Lastbetrieb eines fast idealen Ringkerntrafos: Erst bei Belastung auf der Sekundärseite stellt sich ein Strom durch die Last und im Verhältnis der Trafo – Übersetzung, auch auf der Primärseite ein.

Der Laststrom wirkt sich grob gesehen nicht auf den Verlauf der Magnetisierung aus. Außer, dass durch ohmsche Spannungsabfälle die treibende Primärspannung etwas kleiner und damit die Aussteuerung auf der Hystereseurve auch kleiner wird.

Trafogröße: Je größer die Primär- Spannung , die Frequenz und der Magnetfluß ist, desto größer ist die übertragbare Leistung des Trafos. Ein großer Magnetfluß wird durch eine große Eisenkernfläche erreicht. Für einen großen Strom braucht es dicke Drahtquerschnitte in den Wicklungen.

Ursache und Auswirkung des Trafo-Einschaltstroms:

Es erscheint paradox. Ein Ringkerntrafo mit einem fast vernachlässigbaren, sehr kleinen Leerlaufstrom hat einen riesigen Einschaltstrom.

Ein Trafo mit Luftspalt im Eisenkern hat einen erheblich größeren Leerlaufstrom und hat aber einen geringen Einschaltstrom. Schuld ist die Form der Hysteresekurven.

Durch die Restmagnetismusfähigkeit des Eisenkernes, Remanenz genannt, treten beim Einschaltfall gänzlich andere Betriebszustände als beim Dauerbetrieb auf. Der trafotechnische Laie glaubt zuerst an Zufall oder andere gleichzeitige Einwirkungen auf das Stromnetz, wenn beim Trafoeinschalten das eine Mal die Absicherung auslöst und das andere Mal nicht. Er kann das Sicherungsauslösen direkt beim Einschalten, nicht ohne weiteres mit dem Trafo-Verhalten in Zusammenhang bringen.

Der Einschaltstrom ist besonders bei einem Trafo ohne Luftspalt stark abhängig von der Vorgeschichte des Ausschaltens, was die Lage der Remanenz beeinflusst und vom Moment des Einschaltens, was die weitere Magnetisierung ab dem Remanenzpunkt beeinflusst. Hier wird das Verständnis erleichtert, wenn von der Magnetisierungs-Transport-Wirkung der vollen oder angeschnittenen Spannungszeitflächen in einer Netzhalbwelle ausgegangen wird.

Es existieren immer noch verschiedene Theorien über die Ursache und die Vermeidung des Einschaltstromstoßes. Manche Fachleute behaupten ein Trafo muss zur Vermeidung des Einschaltstromes im Spannungsnulldurchgang, andere behaupten im Spannungsscheitel einer Netzspannungshalbwellen eingeschaltet werden. Auch behaupten Hersteller von Halbleiterrelais, dass sich Nullspannungsschaltende Typen bestens zum Schalten von Transformatoren eignen.

Es existieren auch verschiedene Theorien wie man die Höhe des Einschaltstromes mit mathematischen Formeln berechnen kann. 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 dafür nicht von belang ist oder dass das Eisen die vom Trafo zu übertragende Energie zwischen - speichert oder dass der Magnetfluss sich verdoppelt beim Einschalten, unabhängig vom Remanenzpunkt und der Einschalttrichtung, usw.).

Alle vom Autor aufgestellten Thesen und Erkenntnisse sind durch Strom- und Spannungsmessungen mittels Stromzange und Speicher Oszilloskop am Trafo 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 sagt aus wo sich die Magnetisierung auf der Hystereseurve

gerade befindet, präzise zumindest dann wenn der Leerlaufblindstrom sein Maximum hat.

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.

(Die Netzimpedanz ist ungefähr 0,3 Ohm bei 230V für 16-32 Ampere Netze, der Widerstand der Primärwicklung hängt stark von der Bauart des Trafos ab und beträgt bei einem guten 1kVA Ringkern-Transformator ca. 0,2 1 Ohm. Dann ergeben $230V / 0,5 \text{ Ohm} = 640A_{\text{eff}}$ und ca. 900 A Spitze.)

Das liest sich so unscheinbar, stellt aber de Fakto einen kapitalen Kurzschluß für das Stromnetz dar, der allerdings nur wenige Millisekunden dauert, aber doch ausreicht die Spannungsstabilität des Stromnetzes zu stören und die Sicherung auszulösen.

Die Sicherung vor dem Trafo kann wegen diesem „Einschalt-Kurzschlussstrom“ nicht so ausgelegt werden, dass sie den Trafo wirklich schützt.

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 Um- Magnetisierung ihrerseits erzeugt und normalerweise einem plötzlichen Stromanstieg entgegensteht.

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. Siehe die Messkurven auf den folgenden Seiten.

Die **Remanenz**stärke 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 eingeschaltet wird, entsteht keiner, ein kleiner oder großer Einschaltstrom. Das zum Vermeiden des Einschaltstromes angewendete Verfahren, beweist diese Thesen.

Hysteresekurve im Trafoeisen im Dauerbetrieb.

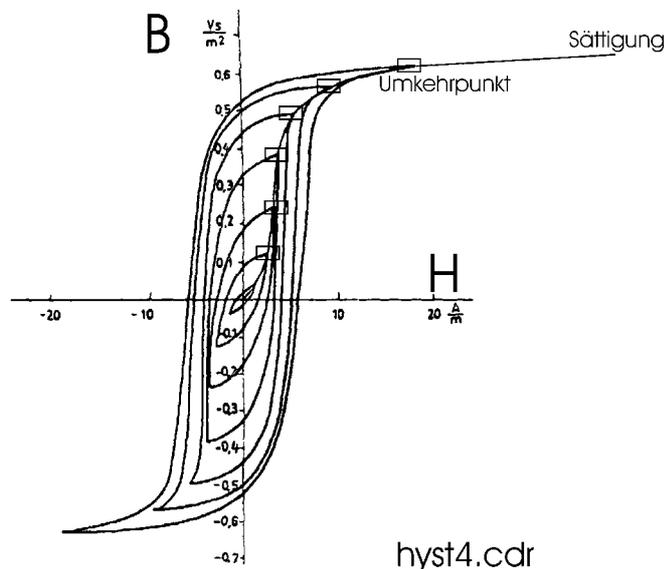
Die Hysteresekurve zeigt den Verlauf der Magnetisierung, (Flussdichte B), aufgetragen über der Feldstärke H im Eisen. $B = \mu_y * \mu_0 * H$. ($H = I * N / \text{Feldlänge}$)

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

$B = \mu_y * \mu_0 * I * N / \text{Feldlänge}$. (Dimension von B = Volt * Sekunden / cm * cm.)
(μ_y ist die magnetische Leitfähigkeitszahl des Eisens, μ_0 die der Luft.) I ist der Strom, N ist die Windungszahl der Primärspule. Feldlänge ist die Länge der Magnetfeldlinien im Eisen.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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



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 das Eisen in Sättigung treibt, der Strom verhält sich dabei proportional zur Feldstärke und steigt dann am Ende der Kurve sehr stark an. Das μ_y des Eisens ist dann ab der Sättigung gleich 1, wie bei einer Luftspule. In der Mitte der Hysteresekurve ist das μ_y gleich 10000 und höher.

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 besonders bei einem Ringkerntrafo innerhalb der Hysteresekurve verschwindend klein. Siehe Seite 7.

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

In der Elektrotechnik ist außerdem immer der Strom und auch andere sekundäre Wirkungen die Folge einer treibenden Spannung.

Auch aus diesem Grund sollte hier beim wechselfspannungs Betrieb über die 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..

Im Eingeschwungenen Zustand, also im Dauerbetrieb des Trafos gilt:

Eine Netzspannungshalbwelle transportiert die Magnetisierung von einem Umkehrpunkt zum anderen Umkehrpunkt der Hystereseurve!!! (Z.B. Von links unten nach rechts oben mit der pos. Netzhalbwelle.) Die Funktionsweise der TSR (Trafoschaltrelais) Einschaltprozedur legt ebenfalls diese Betrachtungsweise nahe.

Die Magnetisierung läuft also auf einer Hystereseurve im Takt der Spannungshalbwellen hin und her. Auf welcher Hystereseurve, Seite 5, die Magnetisierung genau läuft, hängt von der Höhe der Netzspannung und der Dauer einer Halbwelle ab. 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. Die Spannungszeitfläche der Halbwelle wird dann kleiner. Das wird auch durch die Erfahrung unterstützt, dass Trafos die mit 60 HZ ausgelegt sind, dann mit 50 HZ betrieben einen höheren Leerlaufstrom und Einschaltstrom haben. Bei einer kleineren als der Nennspannung, läuft die Magnetisierung auch auf einer kleineren Kurve. Deshalb nimmt der Leerlaufstrom mit steigender Netzspannung zu. Je nach Eisenkerntyp und Material sehen die Hysteresekurven in Ihrer Form völlig unterschiedlich aus.

Die oben auf Seite 5 dargestellte Kurve zeigt die Hystereseurve eines wechselseitig geschachtelten Trafos, der viele kleinste Luftspalte im Kern hat.

Durch die Induktionsänderung, das ist die Änderung der Flußdichte B , Verlauf auf der Hystereseurve, wird dabei in der Sekundärspule die Sekundärspannung induziert. In der Mitte der Hysterese-Kurve herrscht die Flußdichte = 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 Hystereseurve es zeigt. (Weil die Spannungszeitfläche die Induktion B transportiert, wird hier so und nicht wie üblich andersherum argumentiert.)

Die Feldstärke H ist also die Folge der Position von B auf der Hystereseurve.

Die Flußdichte B kann ab der beginnenden Sättigung im Eisen kaum noch erhöht werden, auch wenn die Spannung oder die Einwirkungszeit erhöht wird. Infolge dessen nimmt der Strom, welcher proportional der Feldstärke H ist, nichtlinear sehr stark zu. Er folgt dann der Konstanten der Induktionsdichte der Luft. $1\text{Tesla} = 800\text{A/m}$. Die Induktion nimmt dann in der Luft weiter zu, auch wenn das Eisen gesättigt ist, solange eine treibende Spannungszeitfläche zur Verfügung steht. Weil der Strom jedoch dafür dann um Faktor 1000 – 20000 größer ist, sind die Spannungsabfälle am Drahtwiderstand der Spule und der Zuleitungen groß, so daß keine die Induktion weiter treibende Spannungszeitfläche mehr zur Verfügung steht.

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 am besten ausgenutzt wird. Die

Hysteresekurve sollte nicht so weit ausgenutzt werden, dass das Eisen in eine leichte Sättigung fährt, weil dann der Leerlaufstrom nichtlinear stark ansteigt.

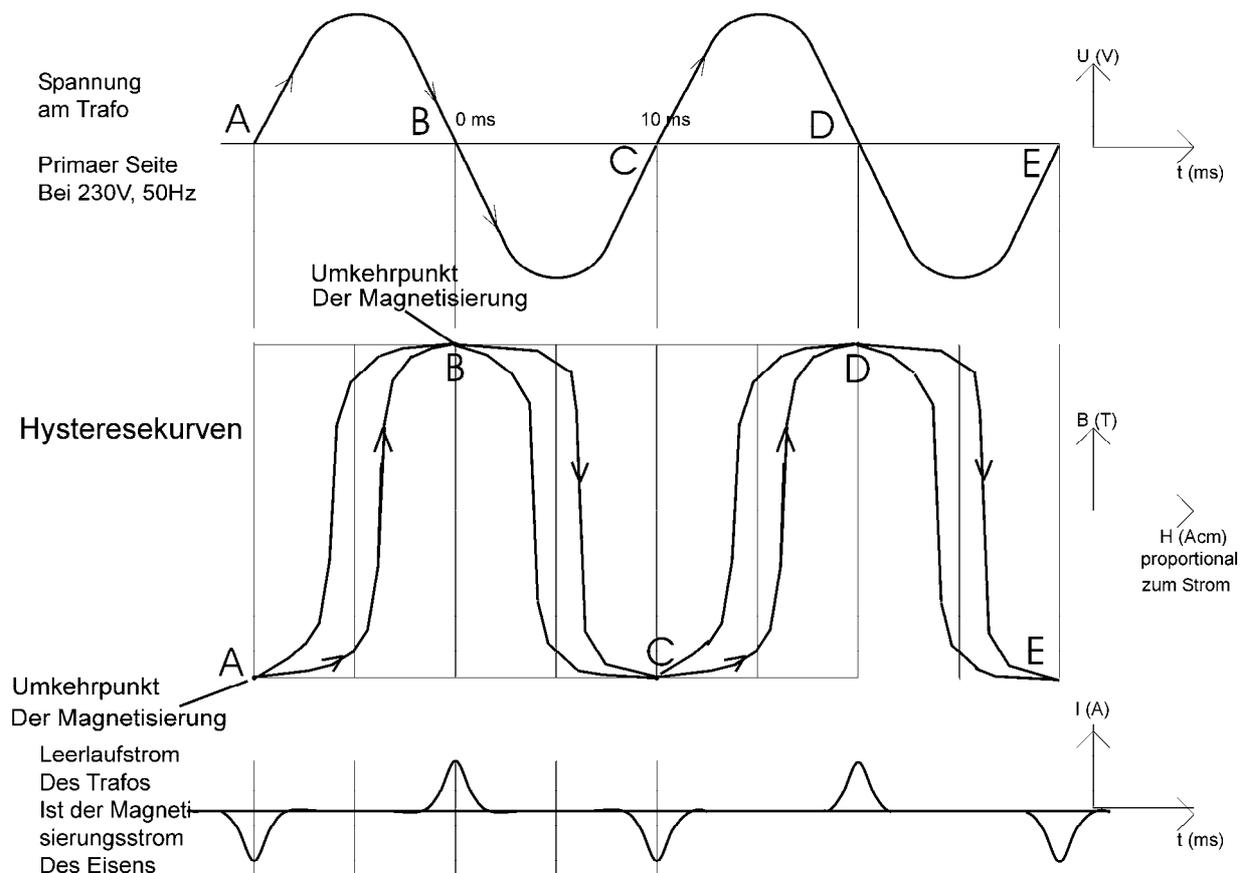
(Dieser der Spannung um 90 Grad nacheilende Leerlaufstrompeak fließt dann aber auch bei Last und hat mit dem Laststrom nichts zu tun. Der geringe Leerlaufstrom ist der zur Kernblech-Ummagnetisierung gehörende Strom und fließt annähernd in Phase zur Spannung.)

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 10 Tesla erzeugen. Dort ist kein Eisenkern verwendet, weil dieser wegen seiner Sättigung ab ca. 2,2 Tesla die gleichmäßige Feldverteilung nur stören würde.

Hysteresekurve im Dauerbetrieb mit Leerlaufstrom und treibender Netzspannung.

Fortlaufende Hysteresekurve im Eisenkern eines 50Hz Transformators im Leerlauf



Eine Spannungshalbwelle, (Spannungszeitflaeche), transportiert die Magnetisierung von einem zum andern Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve, der Strom zeigt dabei die Position an

hystku-sp-str-01.cdr

EMEKO
Ing. Buero

Oben ist der Verlauf der Netzspannung zu sehen, von links nach rechts laufend.

Eine abgewinkelte Hysteresekurve für den Dauerbetriebsfall eines Trafos, ist mit der zur Netzhalbwellen 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.

Daher kommt auch die spitze und nichtsinusförmige typische Form des Leerlaufstromes, die erst dann erscheint, wenn die treibende Netzspannungshalbwellen 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.

Das kann mit einigem Aufwand genauso nachgemessen werden.

Hysteresekurve und Remanenz:

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

Magnetfluß = $\mu_{r0} * \mu_0 * I * N * A / L$.

I= strom, N= Windungen, A= Kernfläche, L= Magnetkreis-feldlinienlänge.

Bei der Speisung mit Wechselstrom, jetzt korrekterweise mit Wechselspannung bezeichnet, stellt sich der Primärstrom **beim guten** Ringkerntrafo, erst bei einer sekundärseitigen Belastung ein.

Ein realer Transformator dagegen benötigt auch ohne Belastung Energie, $U * I * t$, zum umpolen des Eisenkernes. 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 Seite 7.

- In der Literatur findet man Schaltvorschläge zum Aufzeichnen der Hysteresekurve mittels Lissajous Figuren auf einem Oszilloskop.-
- <http://gpr.physik.hu-berlin.de/Skripten/Elektrodynamik%20und%20Optik/PDF-Dateien/E11.pdf>

Eine Hysteresekurve beschreibt den Verlauf der Flussdichte, hier auch Magnetisierung genannt, über der magnetischen Feldstärke im Eisenkern, bei einer bestimmten Amplitude und Frequenz der Speisespannung an einem bestimmten Eisenkern. Siehe Seite 7 , wo Spannung, Hysteresekurve und Strom übereinander gestellt sind.

Die Magnetisierung im Eisenkern läuft also ab einer bestimmten magnetischen Feldstärke im Eisen nicht mehr linear weiter, sondern nimmt auch bei steigender Feldstärke nicht mehr zu. Dann sagt man, fängt das Eisen an gesättigt zu werden.

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 um-magnetisiert werden.)

Die Spannung der Primär und Sekundärspule lässt sich mit folgender Formel berechnen.

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

F = Frequenz, N = Windungszahl, A = Eisenquerschnittsfläche, B_{max.} = Max. Induktion ist 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.

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 Kupfer spart.

Die Magnetisierung läuft dabei auf der Hysteresekurve von einer Netzhalbwelle angetrieben, (Spannungsintegral = Spannungszeitfläche), von einem Umkehrpunkt zum gegenüberliegenden Umkehrpunkt. Durch die wechselnde Polarität der Spannung wird das Eisen damit ständig umgepol.

Durch die ständige Ummagnetisierung des Trafoeisens mittels der Primärspule im Takt der Speisespannung, wird durch das sich ändernde Magnetfeld gleichzeitig in der Sekundärspule die Sekundär-Spannung induziert, was ja die eigentliche Aufgabe des Trafos ist.

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 Seite Nr. 5 und 7.

Der zeitliche Verlauf des Stromes der in den Trafo hineinfließt, beschreibt also in Verbindung mit der Primärspannung, den momentanen Zustand der Magnetisierung im 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 sehr große Luftspalte und sind für 50 HZ Trafos unwirtschaftlich.

Nur Hier ist das Einschalten im Scheitel der Netzspannung richtig, egal mit welcher Polarität.

Mit Remanenz:

Siehe die Seiten, 15-20 hat fast jeder 50 HZ Trafo eine Remanenz im Eisenkern.

Bei einem 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 Seite 15 - 20, und zusätzlich dazu vom Ausschaltzeitpunkt ab.

Wird genau im Nulldurchgang der Speisespannung ausgeschaltet, wenn also die Magnetisierung auf dem Umkehrpunkt der Hystereseurve steht, dann läuft die Magnetisierung von dort aus zum höchsten möglichen **Remanenzpunkt** auf der B-Achse bei Feldstärke Null. Siehe die Seiten 15-20 .

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

Der Weicheisenkern ist hier also auch etwas dauermagnetisch. Diese dauermagnetische Energie bleibt aber nur erhalten solange der dazu gehörige Magnetfluß im Eisen erhalten wird. Nach dem Auftrennen des Eisenkerns verflüchtigt sich dann sofort dieser kleine Dauermagnetismus.

Siehe ein eindrucksvoller Versuch zum Beweis der **Remanenz** unter: www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/e_lehre_1/induktion/trafo.htm oder die Erklärung eines ähnlichen Versuchs auf Seite 26.

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 Ausschalttrichtung merken und den Einschaltzeitpunkt damit steuern. Aber beim ersten Mal einschalten geht das nicht.

Eisenkerne mit großem Luftspalt haben nur eine geringe Remanenz,

Ringkerne dagegen haben eine hohe Remanenz weil sie luftspaltfrei sind. Siehe weiter unten beschrieben.

Die Magnetisierung kann wie schon gesagt nach dem Ausschalten nicht im Umkehrpunkt stehen bleiben. Bei Gleichspannungsbetrieb könnte man sagen, weil kein Primärstrom mehr fließt. Technisch betrachtet, weil dieser Dauermagnetismus nur schwach ist

Nach dem Ausschalten des Trafos, läuft die Magnetisierung zum **Remanenzpunkt** auf der B Achse bei $H = 0$, dann fließt auch kein Strom mehr, weil H stromproportional ist. Abhängig vom Ausschaltzeitpunkt auf der Netz-Spannungshalbwelle ist dieser Punkt höher oder tiefer gelegen und kann pos. oder neg. sein. Der **Remanenzpunkt** ist grob gesagt stabil und bleibt lange erhalten. Es gibt allerdings eine noch höhere Kurzzeitremanenz die bei ganz kurzen Netzunterbrüchen von 2 - ca. 80 Millisekunden 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. ---

Eine sehr kleine **Remanenz** ist auch bei Magnetischen Kreisen mit großen Luftspalten vorhanden. Also zum Beispiel an einem tiefgezogenen Blechteil aus Eisen.

Die Störung der **Remanenz** durch Fehler im Material kann bei der zerstörungsfreien Prüfung von magnetisch leitenden Werkstoffen gemessen werden. (Vorwiegend bei Stahllegierungen).

Es gibt auch Prüf-Vorrichtungen welche zu diesem Zweck das magnetische Rauschen der Barkhausensprünge im Material messen können. Das erfordert jedoch sehr empfindlicher Magnetfeldsensoren. Auch Seile im Spannbetonbau können so auf Risse untersucht werden.

Die Kernverluste, auch als Leerlaufverluste bezeichnet, sind umso größer, je breiter die Hysterese-Kurve ist, (Fläche unter der Kurve) und haben nichts mit der Höhe der **Remanenz** zu tun, sondern entstehen durch die magnetischen Widerstände im Eisen, hervorgerufen durch den für den Magnetfluß entstehenden Richtungs-Wechsel entgegen der magnetischen Vorzugsrichtung, wie sie bei eckigen Blechen vorkommt.

(Quer zur magnetischen Vorzugsrichtung ist der magnetische Widerstand größer und die Sättigung tritt früher, also schon bei geringeren Induktionsdichten ein.)

Gesättigte Zonen im Eisenkern wirken wie ein Luftspalt.

Siehe Datenblätter der Trafo- Blech-Hersteller.

Übrigens sagt die Angabe der Remanenz des Trafoblechs in den Tabellen der Blech-Hersteller nichts aus über die tatsächliche Remanenz wenn das Blech im Trafo eingebaut ist. Außerhalb des Trafos hat das Blech 200m Tesla und im Luftspaltlosen Ringkerntrafo beträgt die Remanenz dann 1,5 Tesla.

Praktischer Beweis dafür, dass Remanenz nichts mit Verlusten zu tun hat:

Ein Ringkerntrafo mit hoher **Remanenz** hat viel kleinere Leerlaufverluste als ein eckiger Trafo der eine niedere **Remanenz** hat. Also eine hohe Remanenz bedeutet **nicht** hohe Verluste im Eisen.

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 dann hohe Einschaltstromstoß wird mit dem TSR vermieden.

Die Gesamt -Verluste sind dann so gering, dass der Trafo im geschlossenen Gehäuse bei Belastung nur handwarm wird.

Siehe auch der Text am Ende des Berichts.

Außerdem müsste die Verlustwärme, die zum Beispiel in einem Reinraum entsteht, der eine hohe Luftdurchsatzrate hat und klimatisiert ist, mit hohem Aufwand mittels teurer Kühlung im Sommer abtransportiert werden.

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 TSRL vor den Trafo geschaltet wird der Einschaltstrom unterbunden. Siehe die Bilder zuvor.

Dann hat der Ringkerntrafo nur noch Vorteile.

Ursache von Trafoschäden in der Vergangenheit:

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 große Magnetkräfte dabei entstehen.

Deshalb bekommen unvergossene Ringkerntrafos ohne Einschaltstromvermeidung dadurch nach und nach das Problem des Windungsschlusses und werden zerstört.

Das führte in der Vergangenheit zu unzufriedenen Kunden, wenn die Wicklungen nicht mit Gießharz getränkt sind.

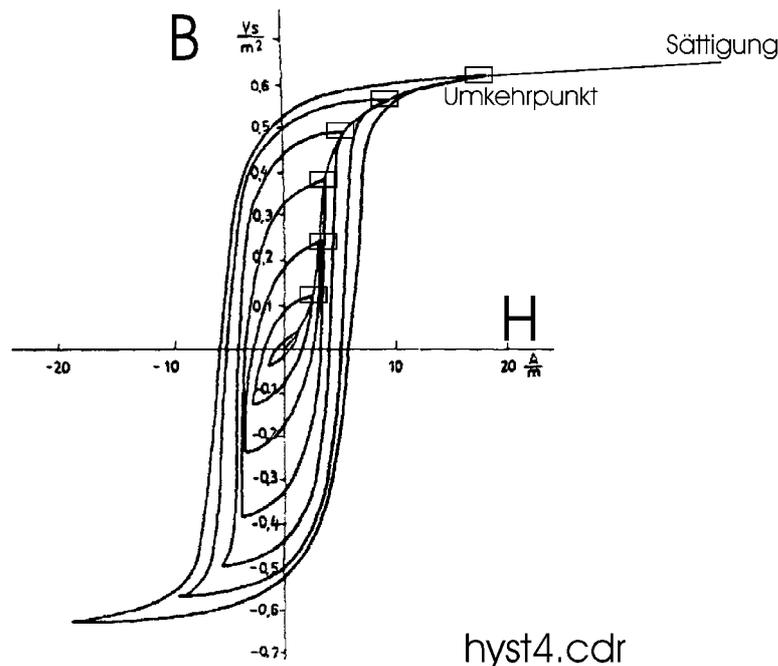
Durch das Vermeiden der Einschaltströme ist diese Schadensursache auch ohne Gießharztränkung an der Wurzel behoben.

Hystereskurve im Eisenkern und Wirkungsweise der TSR Einschaltprozedur.

Siehe auch nächstes Bild auf Seite 13 mit der Einschaltprozedur.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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



Die Position der Remanenzpunkte, das ist die stabile Lage der Magnetisierung B nach dem Ausschalten der Spannung, die sich nach dem zufälligen ausschalten einstellt, ist unbekannt beim Einschalten. Sie kann pos. oder neg sein, sie kann auf unterschiedlichen Höhen der B -Achse liegen.

Am Ende einer pos. Halbwelle steht die Magnetisierung rechts oben im Umkehrpunkt. Wenn dort ausgeschaltet wird läuft sie auf den max. pos. **Remanenz** Punkt.

Mit den unipolaren Vormagnetisier-impulsen vom TSR, wird die Magnetisierung im Eisenkern, zuerst schrittweise zu dem max. Umkehrpunkt der Hysteresekurve hin transportiert und dann wird gegenphasig dazu voll eingeschaltet.

Wenn die Remanenz ganz unten steht:

Mit jedem Spannungs-zeitflächen Zipfel wird so die Magnetisierung ein Stück auf einen höheren **Remanenzpunkt** gehoben. Bei einer permanenten Vor-Magnetisierung dieser Art läuft sie irgend wann nur noch zwischen dem oberen **Remanenzpunkt** und dem dazugehörenden Betriebs Umkehrpunkt hin und her.

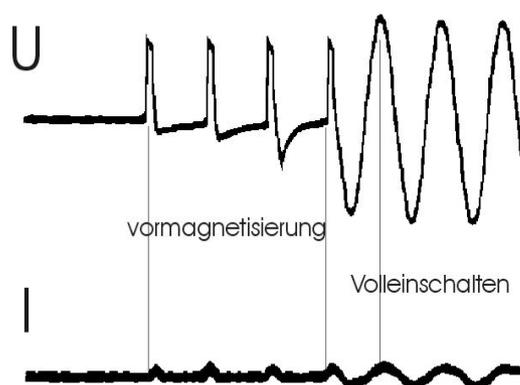
Zu viele Vormagnetisierspannungszipfel schaden dabei nicht, das heißt das Eisen summiert sie nicht auf, es reagiert dabei wie eine magnetische Feder. Die Magnetisierung läuft dabei mit dem Spannungszipfel immer nur zum Max. Umkehrpunkt und in der Pause, bis der nächste gleichpolige Spannungszipfel kommt, wieder auf den

max. **Remanenz**punkt zurück. Es entsteht dabei nur der Leerlaufblindstrompeak des Trafos, der immer dann seinen Scheitel erreicht, wenn der max. Umkehrpunkt auf der Hystereseurve erreicht ist. Siehe Messungen vom Einschalten von Trafos im Leerlauf und Grafik auf Seite 7. Dieses Beaufschlagen des Trafos, nur mit den Vormagnetisierzipfeln, könnte wie gesagt permanent passieren, also ohne voll einzuschalten. Es fließt dann immer nur der Leerlaufstrompuls, siehe Grafik unten. Das richtige Aussteuern vom **Remanenz**punkt zum Umkehrpunkt ist der Grund weshalb die Zipfelbreite am TSR justiert werden und damit an die Trafotype angepasst werden kann. Die Justage ist einfach und kann ohne Messgeräte geschehen. 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.



es fließt immer nur der Nennstrom.

** das TSR Verfahren ist patentiert

tseme010.cdr

Die unipolaren Vormagnetisier- Spannungspulse auf der U-Achse, das sind die hier positiven Spannungszacken vor dem Volleinschalten, transportieren die Magnetisierung zu dem Wendepunkt rechts oben auf der Hystereseurve. Siehe vorige Bilder. Anschliessend schaltet das TSR in die entgegengesetzte Richtung der Magnetisierung voll ein. Deshalb wird die Hystereseurve dann nicht verlassen und es entsteht kein Einschaltstrom. Das ist auf der, I-Messkurve für den Strom, untere Kurve, eindrucksvoll zu sehen, weil überhaupt keine Blind-Stromspitze entsteht.

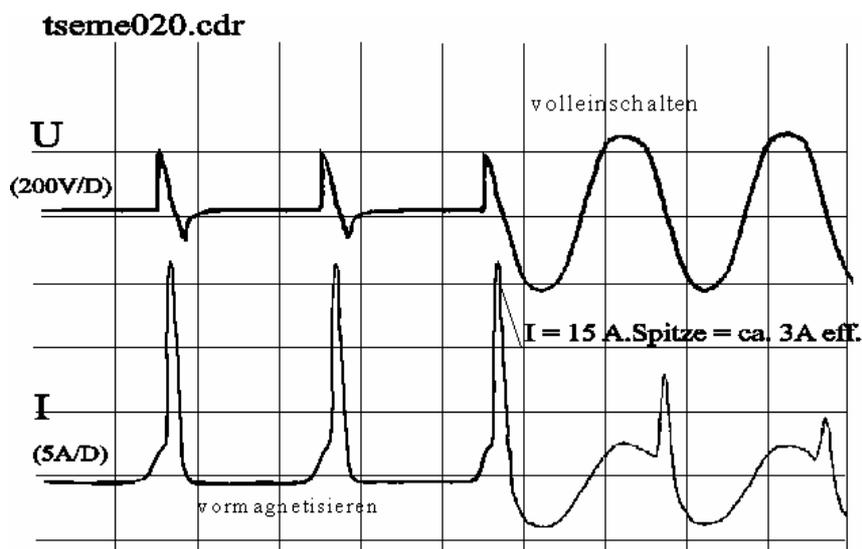
Das preiswerte Trafo Schalt Relais, TSRL Gerät wird von Fa. FSM-Elektronik seit 1998 hergestellt. L steht für Low cost.

Bis Mitte 2005 gerechnet sind über 10.000 Stück der TSRL bei hunderten von zufriedenen Kunden weltweit im Einsatz.

Die Spannungs-Zipfelbreite und damit auch die Anzahl der Spannungszipfel wird an einem Poti einmal auf die Trafotype eingestellt. **Die Einstellung ist unabhängig von der ohmschen Belastung.**

Hierbei muß in der Regel lediglich grob zwischen EI-Kern oder Ring-Kerntrafos unterschieden werden. Siehe Seite 14 bis 19.

Die Last beeinflusst die Vormagnetisierung und damit die richtige Einstellung überhaupt nicht. Das Einschaltverfahren ist damit last-unabhängig.



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..

Die positive Vormagnetisierung ist zu stark, Das Poti auf dem TSRL steht hier zu weit rechts. Siehe nächstes Bild der zugehörigen Hysteresekurve.

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

Nach dem Volleinschalten klingen die Stromspitzen schnell ab.

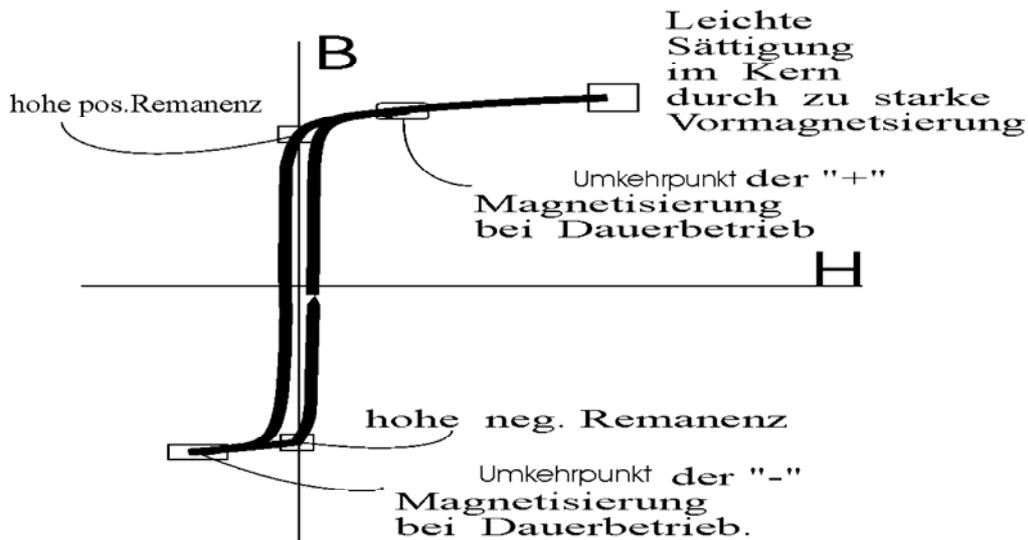
Die Strommessung belegt die Wirkungsweise des TSR der mit angeschnittenen unipolaren Spannungszeitflächen die Magnetisierung transportiert und stützt die hier dargelegte Trafo Theorie auf anschauliche Weise.

Für die Justage der TSR gilt:

lieber etwas zu stark Vormagnetisieren als zu wenig. Die Vormagnetisierung ist gut hörbar am Trafo, durch ein leichtes Brummen, was nach dem Volleinschalten sofort abklingt.

Einstellungsbeispiel am TSR.

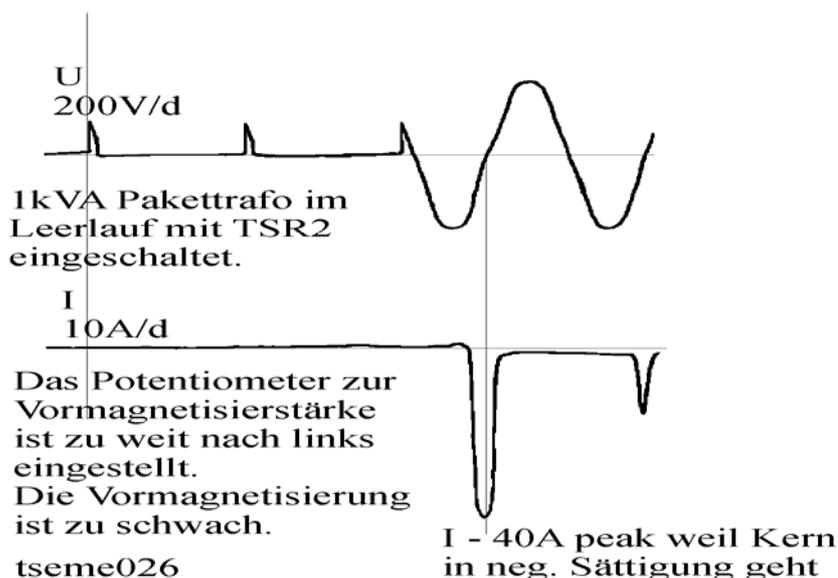
Hysteresekurve mit geringer pos. Sättigung



Hier wird das Trafoeisen mit dem TSR zu stark vormagnetsiert. Siehe vorige Seite mit der zugehörigen Spannungs- und Strommesskurve.

Jeder Spannungsabschnitt der Vormagnetsierung fährt die Magnetisierung von der pos. Remanenz ausgehend, wenn sie dann erreicht ist, über den Umkehrpunkt hinaus zum Punkt der leichten pos. Sättigung und in der Pause fällt die Magnetisierung wieder zurück zur pos. Remanenz. Siehe voriges Bild, zeigt das eindrücklich die dazugehörige Strommessung.

Positive Vormagnetsierung zu schwach, Poti steht zu weit links, siehe auch nächstes Bild.



Hier steht das Poti auf dem TSRL zu weit links.

So sieht der Stromverlauf bei zu schwacher positiver Vormagnetisierung aus. Der positive Umkehrpunkt auf der Hystereseurve wird hier nicht erreicht, was zum richtigen Einschalten nötig wäre.

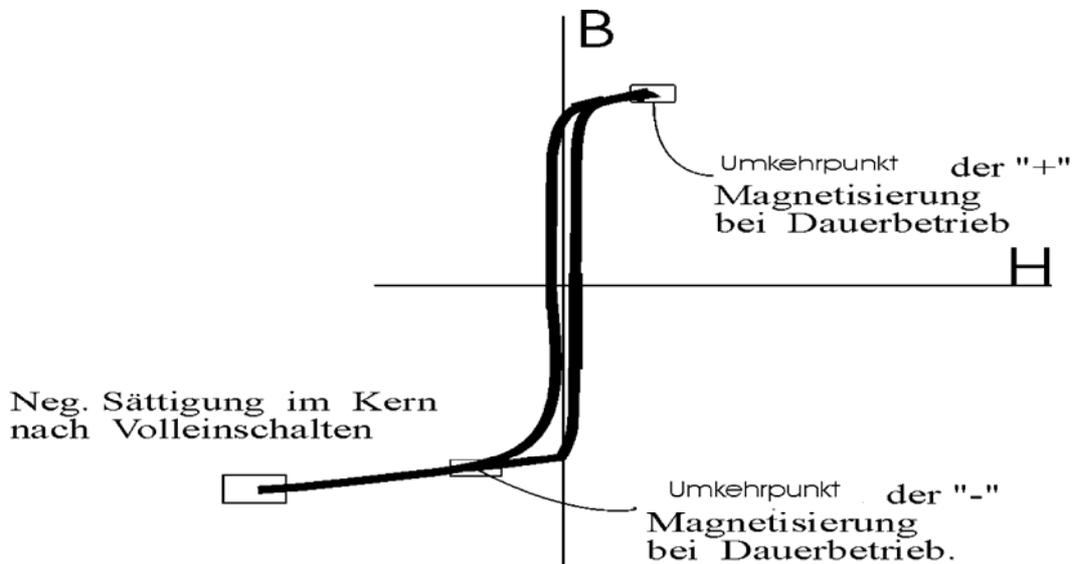
Beim Volleinschalten wird die Magnetisierung dann in eine neg. Sättigung getrieben, weil die Hystereseurve noch nicht symmetrisch durchlaufen wird. Hierbei kann eine träge Sicherung jedoch noch nicht auslösen, denn es fließen nur ca. 40A peak, bei einem Nennstrom von 4A.

Im Gegensatz zum zu starken Vormagnetisieren, wo die kleinen Überstromspitzen beim Vormagnetisieren auftreten, was direkt nach dem Netz einschalten zu beobachten ist, tritt der hier abgebildete Fall des Überstromes erst nach dem Volleinschalten auf.

Beim ersten Mal Netzeinschalten dauert die Vormagnetisierung deutlich länger, als wenn das TSR mit dem Steuereingang wiederholt geschaltet wird. Weil beim Schalten mit dem Steuereingang definiert in Richtung der Vormagnetisierung ausgeschaltet wird. 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.

Siehe die Hystereseurve im nächsten Bild.

Hystereseurve für: durch das TSRL zu wenig pos. Vormagnetisiert



So sieht die Hystereseurve für das Volleinschalten mit zu schwacher Vormagnetisierung aus.

Beim Vormagnetisieren wurde der obere Umkehrpunkt der Magnetisierung auf der Hystereseurve nicht erreicht.

Das Volleinschalten startet von einem Punkt der ungefähr in der Mitte der Hysteresekurve liegt.

„Ungefähr“ deshalb, weil man mit der Strommessung nur erfassen kann, wenn die Betriebs-Umkehrpunkte der Hysteresekurve erreicht oder verlassen werden und sich infolge dessen ein messbarer Blindstrom zeigt.

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

Die stabile und sichere Arbeitsweise wird mit einer etwas zu starken Vormagnetisierung erreicht.

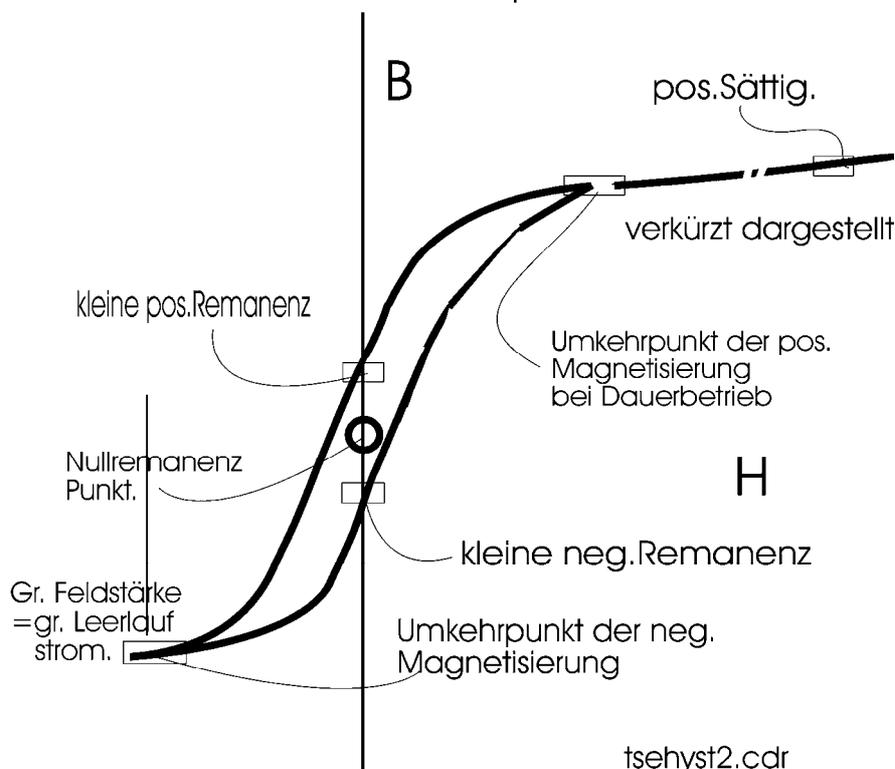
Die leichte positive Sättigung ist wie eine begrenzende Wand, an welche die Magnetisierung vor dem Volleinschalten gefahren wird. Siehe Seite 14.

Der Leerlaufstrom bleibt dabei noch weit unter der Höhe des

Nennstromes. **Hysteresekurve eines geschweißten E-I Trafos:**

Hysteresekurve

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



Der Trafo hat 3 Luftspalte zwischen den E-I Kern-Schenkeln. (Außen, Mitte, Außen.) Die **Remanenz** ist niedrig. Man spricht hier von einer "gescherten Hysteresekurve". Siehe einschlägige Literatur. Der Leerlaufstrom ist groß, weil die Auslenkung der

Betriebs-hysteresekurve im Dauerbetrieb weit heraus läuft auf der H Achse, die Stromproportional ist.

Das ist der Grund des dann hohen Leerlaufstromes. (Der Primärstrom ist proportional zur Feldstärke H).

Bei diesem Trafo reichen 1 –2 breite Vormagnetisier-Spannungsabschnitte vom TSRL zum richtigen Vormagnetisieren.(Was die Theorie unterstützt.)

Das Poti auf dem TSRL sollte dafür auf ca. 16-17 Uhr stehen.

Siehe die Einschalt-Prozedur des TSR auf Seite 13 und 14.

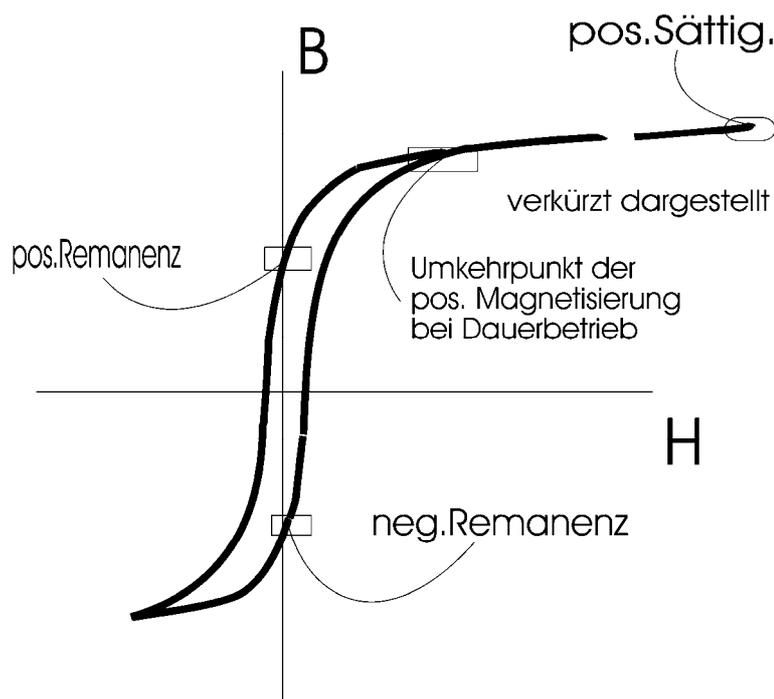
Mit einem Scheitelschalter kann man diesen Trafo auch einschalten, hat dabei aber immer noch kleine Einschaltstromstöße, weil die Richtung der Einschaltung nicht auf die vorhandene, wenn auch kleine, **Remanenz** Polaritäts-Lage Rücksicht nimmt und die halbe Halbwelle zu breit ist zum richtigen Einschalten.

Ein Scheitelschalter wäre ideal wenn die **Remanenz** immer gleich Null ist. So ein Trafo hat aber kein Eisen im Kern oder einen übergroßen Luftspalt oder viele kleine, verteilte Luftspalte. Es gibt TRAFOS welche den Luftspalt als viele kleine Luftspalte verteilt im Kern haben. Diese sind aber teuer und bauen größer.

Hysteresekurve eines geschachtelten Trafos:

Hysteresekurve bei geschachtelten Trafos

kleinere Remanenz als bei Ringkertrafos
jedoch größere als bei geschweißten Trafos
die immer einen kleinen Luftspalt haben.



tsehyst3.cdr

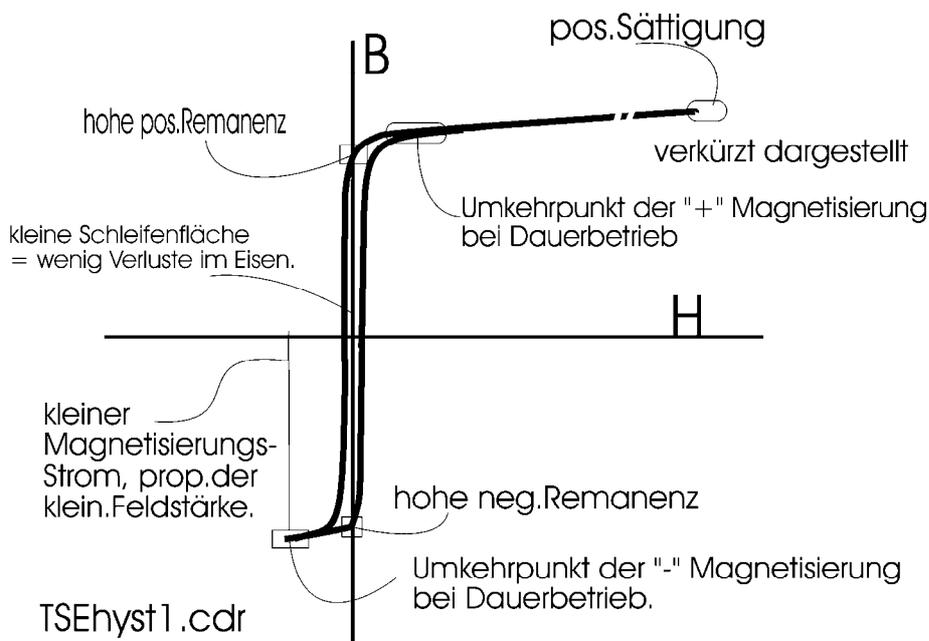
Die **Remanenz** ist höher als beim geschweißten Trafo, aufgrund der geringeren Restluftspalte, aber nicht so hoch wie beim Ringkerntrafo. Die Magnetisierung läuft auf den max. möglichen positiven **Remanenzpunkt** wenn der Trafo im Nulldurchgang der Netzspannung ausgeschaltet wird und bleibt dort erhalten. Der max. mögliche **Remanenzpunkt** ist die Stelle wo die Hysteresekurve die senkrechte Achse bei Null Feldstärke schneidet.

Die **Remanenz** ist auf Seite 26 mit einem Versuchsaufbau erklärt. Die Kern-Sättigung wird beim „falschen Einschalten“ erzielt.

Hysteresekurve eines Ringkerntrafos:

Hysteresekurve

bei Ringkern-Trafos
(Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz



Die Hysteresekurve steht hier fast senkrecht. Die **Remanenz** ist hoch, sie steht fast so hoch wie der Betriebs Umkehrpunkt. Deshalb werden vom TSRL zum richtigen Vormagnetisieren nur kleine Spannungsabschnitte aber dafür mehr als beim geschachtelten Trafo benötigt.

Siehe die Beschreibung der Einschaltprozedur des TSR auf Seite 12 und 13.

(Die unipolaren Spannungsabschnitte transportieren die Magnetisierung. Im Falle wenn sie schon oben steht, vom oberen **Remanenzpunkt** zum oberen Umkehrpunkt. In der Spannungsabschnitts-Pause, (20 msec.), läuft die Magnetisierung wieder zurück auf den oberen **Remanenzpunkt**). Ein breiter Vormagnetisierzipfel würde die Magnetisierung schon in die leichte Sättigung treiben.

An dem Einstellpoti am TSRL werden beide Werte, die Zipfelbreite und die Zipfelanzahl zusammen verstellt. Für Ringkerntrafos sollte das Poti auf dem TSRL zwischen „9 und

10 Uhr“ stehen, das heißt es werden viele aber dafür schmale Spannungszipfel zum Trafo zum Vormagnetisieren geschickt beim Einschalten.

Die Eisenverluste sind gering aufgrund der Restluftspalt Freiheit und vor allem wegen des Verlaufs der Magnetisierung immer in Magnetisierungs-Vorzugsrichtung des verlustarmen Eisenblechs. Eine schmale Hysteresekurve zeigt geringe Leerlaufverluste an. Die Fläche innerhalb der Kurve ist ein Maß für die Verlustarbeit. Bei einem Ringkerntrafo sind die Leerlaufverluste und damit die Leerlaufströme ca. 100 Mal geringer als bei üblichen geschachtelten oder geschweißten Trafos. (Ein 1 kVA Trafo hat nur ca. 30mA Leerlaufstrom.) Ein Ringkerntrafo bleibt deshalb im Leerlauf völlig kalt. Die Einschaltströme im schlechtesten Fall sind aber umso höher, weil die Ummagnetisierungsarbeit durch die Spannungszeitfläche, vom **Remanenzpunkt** bis zur vollen Sättigung gering ist. Schon wenig mehr Spannungszeitfläche bei Einschalten als vom **Remanenzpunkt** bis zum Umkehrpunkt nötig reichen, um das Eisen in leichte Sättigung zu bringen. Siehe Bild oben. Aus diesem Grund sind diese Trafos schwierig einzuschalten. Mit dem TSR Verfahren geschaltet, verhalten sich diese Trafos jedoch völlig harmlos beim Einschalten. Was die folgenden Messungen anschaulich zeigen.

Die permanente positive Sättigung auf eine Seite 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 negative Halbwelle die auf die Trafoprimärspule wirkt.

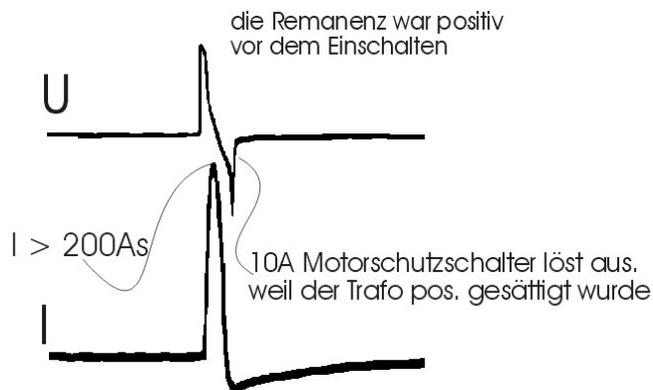
Das kann man selber beobachten, wenn in einem Haushalts-Stromnetz, gleichzeitig mit dem Trafo, Lasten betrieben werden welche nur die eine, hier die negative Halbwelle nutzen. (Widerstandslast in Sparschaltung über eine Diode betrieben.) Wenn der Trafo ein Ringkerntrafo mit hoher Ausnutzung der Induktion ist, der nur geringe DC Anteile verträgt, und gleichzeitig ein Föhn mit 1kW in dieser Sparschaltung betrieben wird ist das zu beobachten.

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. Wohlgermerkt der Föhn wird nicht über den Trafo sondern nur am gleiche Netz betrieben! Die positive Seite der Hysteresekurve wird dabei bei jeder Netzperiode stärker angesteuert. Die oben abgebildete Hysteresekurve entspricht genau diesem Beispiel.

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 Halbwelle dann mehr Strom zieht als in der anderen.

Trafo einschalten mit einem Scheitelschalter-Halbleiterrelais aus positiver Remanenzlage heraus.

1 kVA Ringkerntrafo mit scheidel-schaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet.



Der
Ein

Tseme006.cdr

ertrafo (Primär 230V.)

Scheitel-schalter-auf-trafo1.cdr

Scheitelschalter, das sind spezielle Halbleiterrelais welche immer im Scheitel der Netzspannungshalbwelle einschalten, eignen sich nur für Trafos mit einem definierten großen Luftspalt, wie ihn z.B. Trafos mit Konstantstromcharakter haben.

Weshalb entsteht im Bild oben ein positiver Einschaltstromstoß?

Die **Remanenz** im Trafoeisen war positiv vom Ausschalten her. Es wurde hier in Richtung positive Magnetisierung mit einer halben positiven Spannungshalbwelle eingeschaltet.

Das bringt dann unweigerlich die Sättigung im Eisenkern und damit den Einschaltstromstoß. Auch dann wenn nur die halbe Netzspannungshalbwelle anliegt, weil zum Aussteuern der Hysteresekurve vom positiven **Remanenzpunkt** aus nur eine kleine positive Spannungszeitfläche nötig ist beim Ringkerntrafo.

Der Ringkerntrafo hat wegen seiner Luftspaltfreiheit im Eisenkern eine hohe **Remanenz** und eine sehr nichtlineare Hysteresekurve in Richtung Sättigung.

Auch die Einschaltung in die andere Richtung hätte einen Einschaltstrom erzeugt der allerdings kleiner gewesen wäre.

Einschaltbeispiele:

Beim Einschalten eines Trafos mit **Nullremanenz**, also mit sehr großem Luftspalt, müsste zum richtigen Aussteuern der Hysteresekurve von Anfang an, also ohne dass die Hysteresekurve in eine Richtung zur Sättigung hin verlassen wird, genau im Scheitel der Netzspannung eingeschaltet werden. (Halbe Hysteresekurve gleich halbe Spannungshalbwelle.) Die Einschalt-Richtung wäre dabei egal weil es von der Mitte aus nach beiden Richtungen gleich weit ist auf der Hysteresekurve bis zu den Betriebs Umkehrpunkten. Das lässt sich auch tatsächlich so nachmessen. Siehe Hysteresekurve auf Seite 18.

Beim Einschalten eines Trafos mit hoher Remanenz hängt die Stärke der sich einstellenden Sättigung im Eisen von der Polarität der Remanenz und deren senkrechter Abstand zur Induktion beim Betriebs Umkehrpunkt auf der Hystereseurve ab. Siehe Seite 11 . Die Lage der **Remanenz** ist jedoch von außen, zumindest beim aller ersten Einschalten nicht erkennbar.

Wird mit der gleichen Polarität eingeschaltet, welche auch die **Remanenz** hat, so darf die Spannungszeitfläche die bis zum Nulldurchgang der Spannung wirkt nur klein sein, damit die Sättigung vermieden wird.

Wird mit der gegensätzlichen Polarität eingeschaltet, muß die Spannungszeitfläche wesentlich größer aber kleiner der von einer vollen Halbwelle sein.

Es existieren Vorrichtungen für große Drehstromtrafos welche die Remanenz beim Ausschaltvorgang errechnen und das richtige Einschalten darauf abstimmen. Beim aller ersten Einschalten geht das aber auch nicht.

Allgemein ausgedrückt:

Kommt das Trafoeisen beim Einschalten in die Sättigung steigt der Strom parallel der Feldstärke H sehr stark an. Man spricht dann vom Einschaltstrom.

Das passiert grob gesagt dann, wenn die Einschalttrichtung der Spannungszeitfläche dieselbe Polarität wie die **Remanenz** im Eisenkern hat. Das Eisen wird dann nicht ummagnetisiert. Die zur Verfügung stehende Spannungszeitfläche ist nicht zum Ummagnetisieren verbraucht worden und steht zum in die Sättigung treiben zur Verfügung.

Das selbe geschieht wenn man einen Trafo mit Gleichspannung betreibt. Die zur Sättigung nötige Gleichspannung ist dabei sehr viel kleiner als die Nennwechselspannung und liegt im Bereich der Kurzschlusswechselspannung des Trafos.

(Die Kurzschlussspannung ist die Wechsel-Spannung die auf der Primärseite angelegt werden muss, damit der am sek. Ausgang kurzgeschlossene Trafo, auf der Primärseite den Nennstrom fließen lässt. Sie ist nur wenige Prozent, (1-8%) der Nennspannung groß.)

Zusammenfassung:

Eine große Feldstärke im Eisen wird im Wechselspannungsbetrieb durch einen großen Blind-Strom angezeigt. Der Einschaltstrom ist ein Blindstrom.

Die magnetische Feldstärke „ H “ im Trafo Eisenkern ist mit der magnetischen Flußdichte „ B “ im Kern verkoppelt, wie die Hystereseurve es zeigt. Siehe weiter unten.

Die Feldstärke H ist die Folge der Position von B auf der Hystereseurve.

Die Magnetisierung wird mit den Spannungszeitflächen Abschnitten, welche an der Primärspule wirken, auf der Hystereseurve transportiert. (Im Normalbetrieb ist das eine Netzspannungshalbwelle mit abwechselnd pos. Und neg. Polarität.)

Die Spannungszeitfläche einer Netzhalbwellen transportiert dabei die Magnetisierung von einem zum anderen Umkehrpunkt auf der Hystereseurve.

Die Flußdichte B , hier auch Magnetisierung genannt, kann ab der beginnenden Sättigung nur noch unwesentlich weiter erhöht werden, auch wenn die treibende Spannungszeitfläche dazu vergrößert wird, indem die Spannung erhöht wird oder längere Zeit einwirkt. (Man nimmt an, dass dann alle Weißschen Bezirke im Eisen, das sind Mini-Magnete, längs dem Magnet-Feld ausgerichtet sind.) Die Hystereskurve läuft ab der beginnenden Sättigung fast nur noch waagrecht weiter. Die Flussdichte B erhöht sich dabei kaum noch, aber die Feldstärke H und mit ihr der Strom erhöhen sich weiter. Die magnetische Leitfähigkeit des Eisens ist ab der Sättigung gleich der magn. Leitfähigkeit der Luft. $\mu_{\text{Eisen}} = 1$.

Der Trafo antwortet dabei mit einem stark überhöhten Strom. (Das ist in Beziehung zur treibenden Spannungszeitfläche ein nichtlinearer Vorgang).

Anmerkung: Richtig verstanden hat man das ganze hier nur wenn man es einige Male selber ausprobiert, das heißt mit Stromzange und Oszilloscop und zum Beispiel mit einem Trafoschaltrelais, welches absichtlich dejustiert wird, selber Einschaltversuche macht.

Vermeiden von Einschaltstromstößen beim Schalten von Transformatoren, durch Schalten mit dem TSR, (Trafo Schalt Relais)

Einschaltstromstöße von Transformatoren ganz zu vermeiden ist ein bisher nicht befriedigend gelöstes Problem sagte vor ca. 30 Jahren Herr Steinbuch im Fachbuch für Nachrichtenverarbeitung. Bis zur Erfindung der Trafoschaltrelais war dieses Zitat gerechtfertigt.

Viele Kompromisse bei der Konstruktion von Transformatoren und viele Arten von verschiedenen Einschaltstrombegrenzern haben die Einschaltströme nur begrenzt, das Problem aber bisher nicht grundsätzlich gelöst.

Eine neue und einfache Einschalt-Technik mit einem Trafoschaltrelais vermeidet das Entstehen von Einschaltstromstößen und gestattet es Transformatoren ohne Kompromisse mit mehr Leistung bei gleicher Baugröße, verlustärmer und energiesparender als bisher zu bauen.

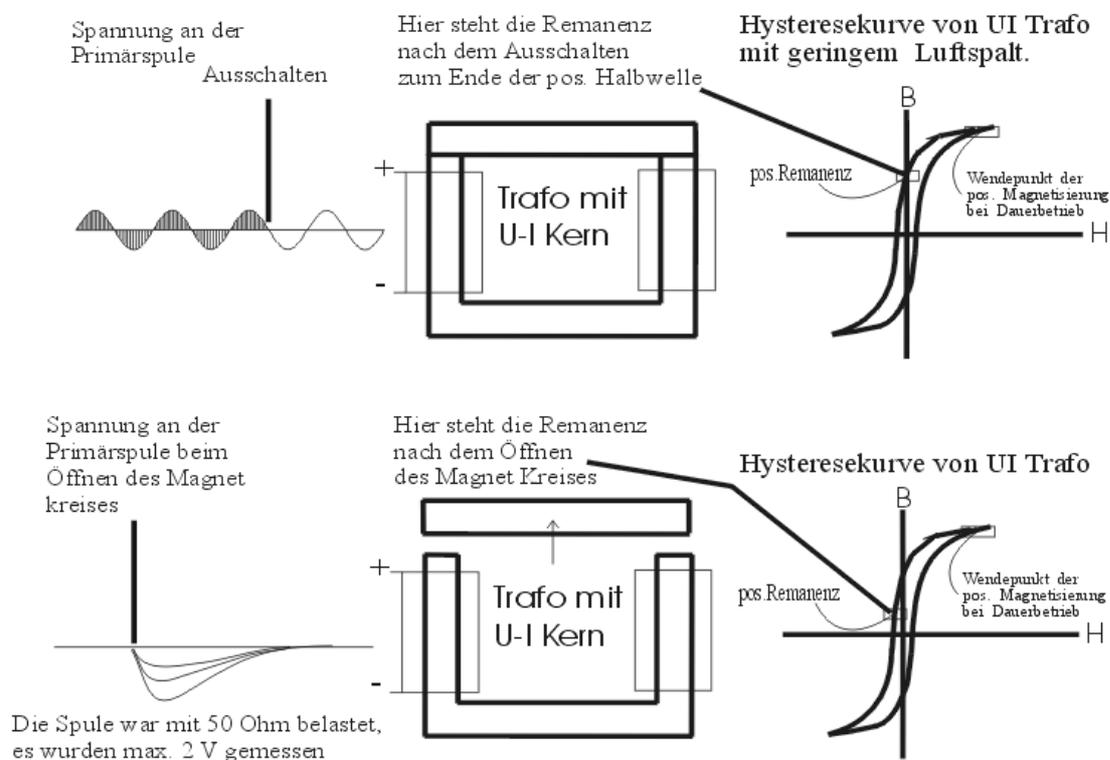
Der Schalter vor dem Trafo, der den Trafo „immer“ physikalisch richtig einschaltet heißt Trafo-Schalt-Relais, TSR.

Er beeinflusst den Zustand der Magnetisierung im Transformator-Eisenkern und synchronisiert diesen mit der Netzwechselfspannung vor dem Einschalten.

Damit können Transformatoren verlustärmer gebaut werden, was Stromkosten spart. Ringkerntrafos können größer ausgelegt werden als nötig, weil der dann zwar etwas größere Leerlaufstrom nicht ins Gewicht fällt, weil er ca. 100 Mal geringer ist als bei „eckigen“ Transformatoren. Ein 1kVA Ringkerntrafo hat zum Beispiel einen Leerlaufstrom von 25mA. Ein geschweißter EI Kern Trafo dagegen hat einen Leerlaufstrom von ca. 2,5A. Dieser Strom belastet auch im Trafoleerlauf das Stromnetz und verursacht an allen Leiterwiderständen eine Erwärmung und verursacht damit Kosten. Solche Trafos werden oft im Leerlauf schon so heiß, dass man sie nicht mehr anfassen kann, weil sie schon im Leerlauf große Leerlaufverluste haben.

Wird ein Ringkerntrafo dagegen um Faktor 2 größer ausgelegt als nötig, so steigt sein Leerlaufverlust dann von 2 auf 4 Watt, seine Vollastverluste fallen dagegen um Faktor 4 von zum Beispiel 100 auf 25 Watt. Solche Trafos haben dann den Namen Energiespartrafo verdient. Durch die Vergrößerung des Trafos nimmt aber leider auch der Einschaltstrom zu und überschreitet dabei oft eine beherrschbare Grenze. Mit einem TSRL davor geschaltet, ist der Einschaltstrom jedoch in allen Fällen eliminiert. Die primärseitige Absicherung kann dann trotzdem auf den Nennstrom der halben Leistung des Trafos, also die Nennleistung des Trafos mit der Nennleistungsgröße sogar flink auslösend ausgelegt werden.

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.

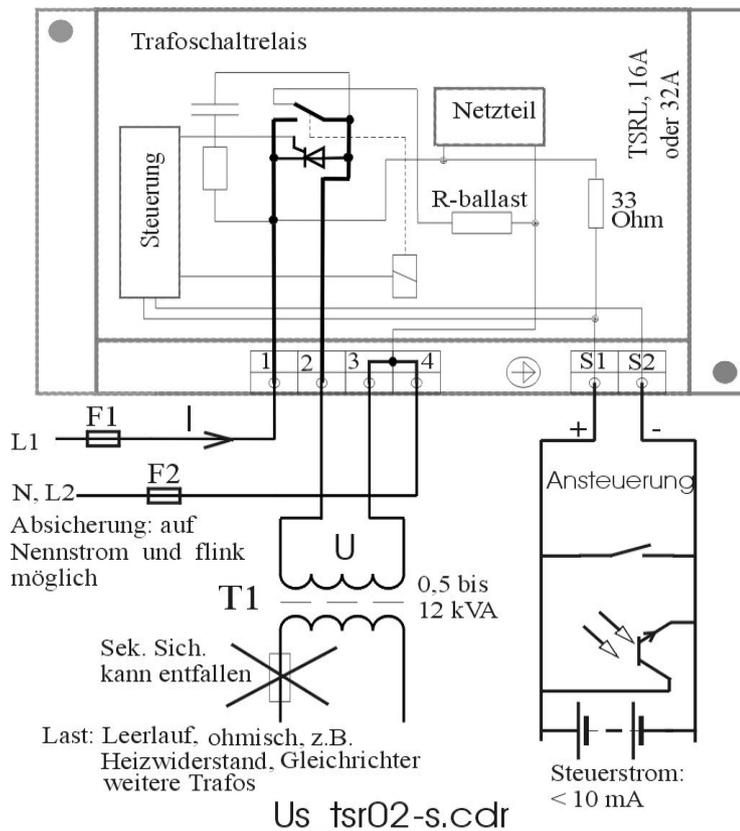
Im entstehenden Luftspalt reicht die magnetische Spannung nur noch, um einen wesentlich kleineren Magnetfluß aufrecht zu erhalten.

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..

Bei dem Versuch ist nur die Primärspule benutzt worden.

Blockschaltbild und Anschluss - Plan des TSR-L.



Die Mikro-Kontroller Steuerung im TSRL erlaubt es auf einfache Weise, das TSRL in vielen Varianten zu bauen.

Standardmäßig sind TSRL lieferbar für:

90-500V, 16-32A.

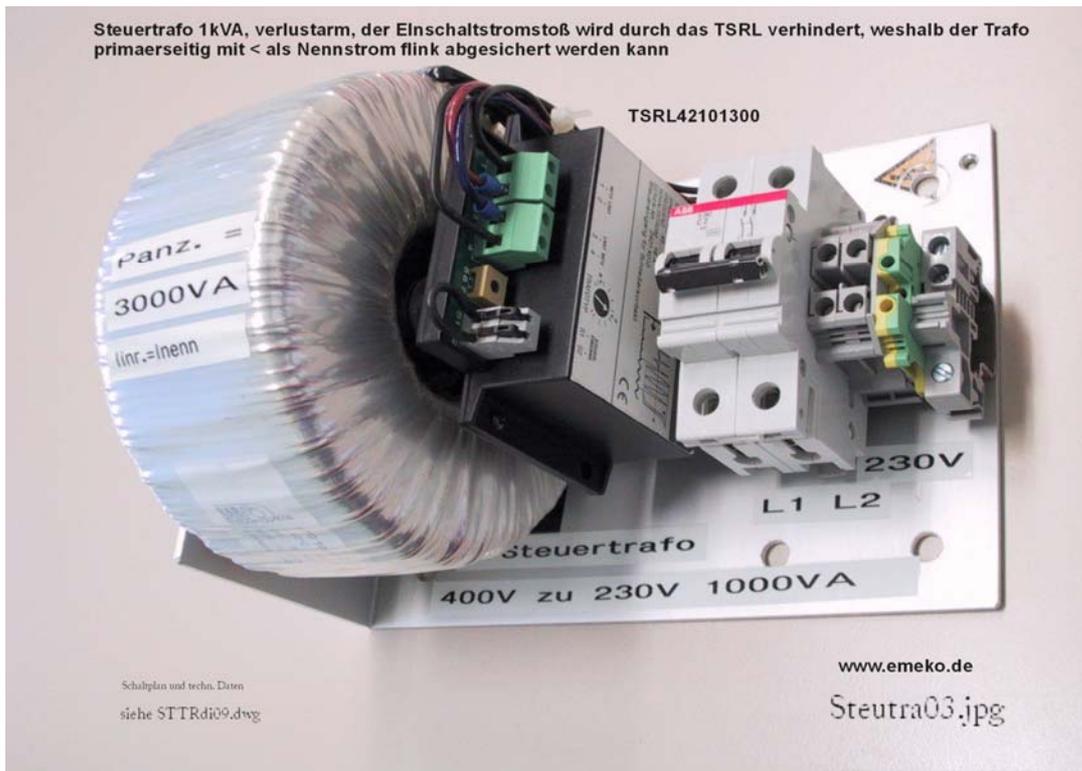
Über 20 Optionen gestatten die Anpassung an viele Gegebenheiten.

Immer gleiches Einschaltverhalten bei Transformatoren die belastet oder unbelastet sind.

Das Einschaltverfahren ist lastunabhängig. Die Kombination von Thyristor und sehr präzise schaltendem elektromechanischem Relais ergibt ein verschleissfreies Hybridrelais.

Die Steuerbarkeit des Ein und Ausschaltens erlaubt einen vielseitigen Einsatz. Die Steuerung kann auf verschiedene Weise erfolgen: Mit einem externen Kontakt, mit einer Steuerspannung, mit einem Transistor eines externen Opto-kopplers. Die TSRL sind in vielen Varianten lieferbar. Siehe Bestellschlüssel im Datenblatt und die Sonderversionsliste des TSRL. Für verschiedene Spannungen, für Weitbereichsspannungen, für 16 oder 32 A. Mit oder Ohne Halbwellenausfallerkennung. Mit langsamem Andimmen für das sanfte Einschalten von Siebkondensatoren nach dem Trafo Gleichrichter usw. Zum schnellen schalten oder takten eines Trafos eignet sich das TSRLF, welches zum Beispiel ein momentanschaltendes Halbleiterrelais so ansteuert, dass das Einschaltverfahren den Einschaltstrom des Trafos immer vermeidet.

Neuartiger Typ eines Steuertransformators.



Ein 1 kVA, 400VRingkern-Trafo ist **nur** mit zwei B2 A Automaten abgesichert auf der Primärseite.

Das geht nur wenn der Einschaltstrom unterbleibt.

Der Trafo ist primärseitig mit nur mittelträgen Sicherungen ausgerüstet, welche kleiner als der Nennstrom sind und hat sekundärseitig keine Sicherungen nötig um geschützt zu sein.

Im Leerlauf oder bei Teillast bleibt der Trafo kalt, aufgrund der geringen Eisen und Kupferverluste die er hat.

Das ergibt einen sehr steifen Steuertrafo, dessen Ausgangsspannung bei Belastung kaum einbricht.

Gerne geben wir Ihnen in Zukunft weitere Informationen über die Technik wie man Einschaltstromstöße von Trafos vermeidet.

Auch für große Drehstromtrafos bis zu 500kVA in D oder Y Schaltung liefern wir Trafoschaltrelais.

Einige Applikationsschaltungen für alle Trafoschaltrelais Typen finden sie auf der Homepage.

www.emeko.de

Erfinder der TSR und Kunden Berater für die TSR ist Dipl. Ing.(FH), Michael Konstanzer.

Erreichbar unter : **www.emeko.de**, **Info@emeko.de**

Hersteller der TSR (Trafo-Schalt-Relais.) ist ausschließlich die Firma: **www.fsm-elektronik.de**

Gerne beraten wir sie bei der Auswahl der Trafoschaltrelais.

Gerne entwickeln wir für sie auch die Technik zur Vermeidung von Einschaltstromstößen in Ihre eigenen Apparate hinein.

Weitere interessante Details zum Geschehen im Transformator, siehe auch unter:

http://de.wikibooks.org/wiki/vom_Umgang_mit_Einphasentransformatoren
oder

<http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Emeko/Spielwiese>

Quelle: emeko/C:\word-texte\fzart\Verlustarmetrafos.doc, EMEKO, Erstelldatum 09.05.08