

## **Lehrgang: Wie funktioniert das Transformator-Schaltrelais, wie vermeidet man den Trafo- Einschaltstrom.**

Es wird anschaulich erklärt, was der Eisenkern im Trafo physikalisch gesehen bewirkt. Auch wird erklärt was im Trafo beim Einschalten und Ausschalten mit der Magnetisierung im Trafo-Eisenkern passiert, warum beim Einschalten nur manchmal 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 der Einschaltprozedur erklärt. Zusätzlich erklärt werden Begriffe wie Hystereskurve, Remanenz, Sättigung, Induktion, Magnetisierung im Eisenkern, Magnetfeldstärke, Wirkung der Spannungszeitfläche einer Netzspannungshalbwelle, usw.

Es wird vom Autor ein Ringkerntrafo, mit einem Eisenkern aus verlustarmem Trafoblech, als Referenz eines fast idealen Trafos verwendet. An diesem Trafo, der entweder nur eine Primärwicklung besitzt oder auch 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 erste Verständnis des Trafos 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 „böse“ 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 und nicht von einer theoretischen, vorgeschalteten Induktivität.

Der 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 also die Vorgänge im Trafoeisen sehr gut nachmessen und verstehen. Man benötigt dazu nicht die Sekundärwicklung und schon gar nicht eine daran angeschlossene Last.

### **Grundsätzlich gilt:**

Die von der Netzspannung gespeiste Primärspule magnetisiert das Trafoeisen ständig um. Diese Ummagnetisierung geschieht bei 50 Hz Netzfrequenz 100 Mal in der Sekunde. Die Magnetisierung dreht sich also 100 mal pro Sekunde in der Richtung um.

Die folgende Zeichnung auf der nächsten Seite zeigt anschaulich, wie Spannungshalbwellen, Magnetisierung und Strom zusammenhängen, bzw. in dieser Reihenfolge aufeinander folgen.

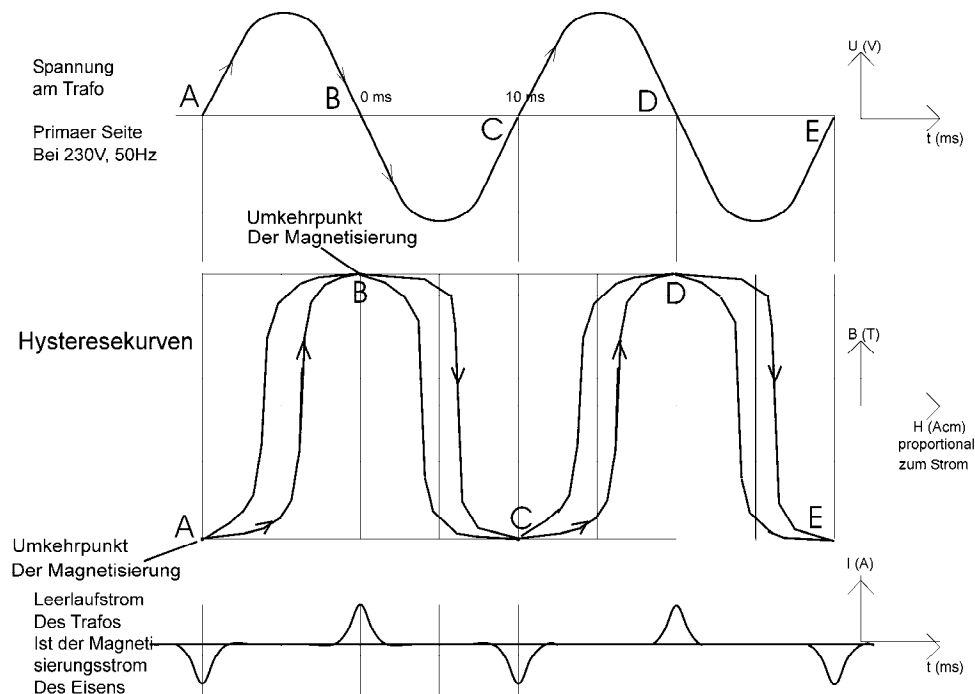
Die Spannung, die beim Trafodauerbetrieb, zum Beispiel beim Punkt A am Beginn der pos. Halbwelle beginnt, transportiert die Magnetisierung im Eisenkern zum Punkt B und das ist das Ende der positiven und maximalen Betriebs Magnetisierung, die auch maximale positive Induktion, oder maximale positive Magnet-Flussdichte genannt wird.

Mit der weiterführenden folgenden negativen Spannungshalbwelle wird der Eisenkern wieder umgepolt und erreicht bei C wieder die maximale negative Betriebsinduktion. Der Strom im Bild unten zeigt, dass er nur dann zu fließen beginnt, wenn sich die Hysteresekurve neigt, weil dabei der Eisenkern schon in eine leichte Sättigung getrieben wird. Von wem wird er getrieben? Von der Fläche der Kurve unter der Spannungshalbwelle, der Spannungszeitfläche. Das beweist eine einfache Kontrollmessung oder die Erfahrung der Trafofachleute, dass ein Trafo dann einen höheren Leerlaufstrom zieht, wenn entweder die Frequenz erniedrigt wird oder die Spannung erhöht wird oder gar beides gleichzeitig passiert. In allen Fällen wird die Spannungszeitfläche größer. Wird sie kleiner, so nimmt die Amplitude des Leerlaufstromes ab. Was man gut nachmessen kann. Und wenn man nicht nur mit einem Strommesser, sondern mit einem Oszilloskop und einer Stromzange misst, dann erkennt man, dass der Strom erst in der Nähe der Spannungsnulldurchgänge zu fließen beginnt. Der Leerlaufstrom hat aber auch keine Sinusform der der Spannung oder dem Wirkstrom um 90 Grad nacheilt, wie er in Lehrbüchern beschrieben ist, sondern hat die unten zu sehende Nadelform. (Beim Ringkerntrafo mist das aufgrund der geringen Eisenkernverluste am besten zu sehen.)

Der Strom ist damit nicht als Ursache der Trafobeeinflussung sondern als die Wirkung der Beeinflussung zu sehen, was im Gegensatz zur Theorie steht die in den Hochschulen gelehrt wird. Natürlich geht kein Magnetfeldaufbau ohne Strom und ist er noch so klein, aber er ist eben nur als Antwort des Trafos zu sehen. Weitere mathematische Ableitungen könnten die Beobachtungen vervollständigen, führen hier aber noch zu weit.

## Bild 2.

Fortlaufende Hysteresekurve im Eisenkern eines 50Hz Transformators im Leerlauf



Eine Spannungshalbwelle, (Spannungszeitfläche), 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. Bueero

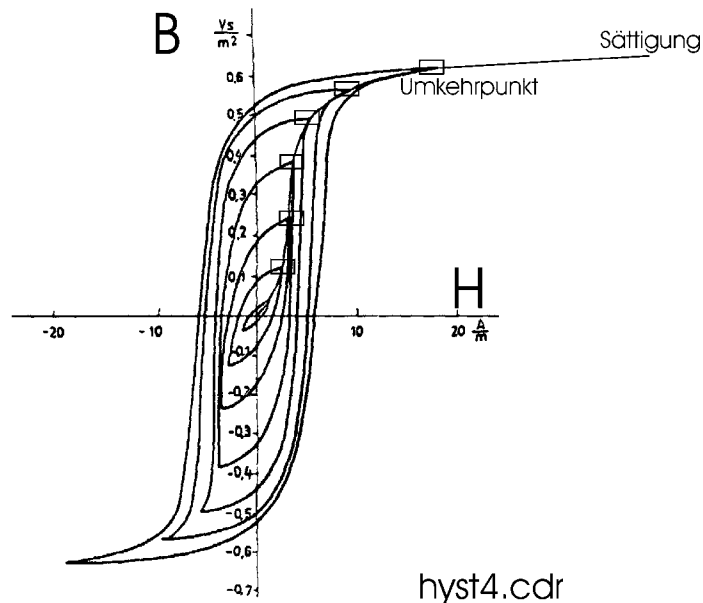
Die Netzspannung ändert sich sinusförmig und treibt dabei einen kaum messbaren Strom von wenigen Milli-Ampere durch die Primärspule, auch wenn die Trafoscheinleistung 1kVA bei 230V beträgt. Das Eisen im Trafokern erfährt dabei eine

permanente Änderung der magnetischen Flussdichte, Induktion genannt, deren Verlauf über die Zeit durch die Form der Hystereseurve beschrieben ist. Siehe Bild 2, 3, 6.

Bild 3.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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



Die Hystereseurve zeigt die Kennlinie eines Trafos mit EI-Kern. Die Hystereseurve eines Ringkerntrafos ist viel schlanker und steiler.

Gleichzeitig wird durch das sich im innern der Primär- und Sekundärspule ständig ändernde Magnetfeld die Windungs-Spannung induziert, welche mit der Windungsanzahl gleich der außen messbaren Spannung ist, was ja die eigentliche Aufgabe des Trafos ist.

Ein Primärseitiger Strom ist im Leerlauf kaum messbar, obwohl die Hystereseurve im linearen Teil voll angesteuert wird, weil die Ummagnetisierungsverluste beim Ringkerntrafo 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 und ist auch nicht lastabhängig.

Die herrschende Lehrmeinung geht davon aus, dass die Hystereseurve durch die Wirkung des Leerlauf-Primärstromes angesteuert wird. – Darstellung der Hystereseurve als B über H. - H ist stromproportional.- B- ist Spannungszeitflächenproportional.- Dann müsste jedoch die Hystereseurve als H über B dargestellt werden, was so nirgendwo zu finden ist.

Damit vom Praktiker die Vorgänge auf einfache Weise überschaut werden können, weil mit derart kleinen Leerlaufströmen sehr unhandlich umzugehen ist und weil bei einem EI Trafo, ein viel größerer Leerlauf-Strom für das gleiche Umlaufen der Hystereseurve fließt, als bei einem Ringkerntrafo gleicher Größe, wird dringend empfohlen eine für alle

Trafotypen gleiche Betrachtungsweise einzuführen. Und das ist die nachmessbare These der Beeinflussung der Magnetisierung durch die Spannungszeitflächen. (Bei der Berechnung von Übertragern für Schaltnetzteile, die Rechteckspannungen angelegt bekommen, ist die Auslegung nach Spannungszeitflächen inzwischen Standard. Alle Schaltnetzteil Trafokerne werden so berechnet.)

Diese zum Durchlaufen der Hysteresekurve nötige Spannungszeitfläche ist im stationären Betrieb bei allen für 50 Hz ausgelegten Trafos gleich einer Netzspannungshalbwelle 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 dieser Primär-Leerlauf-Strom allerdings um mehr als 100 Mal größer, die Hysteresekurve läuft dabei aber genauso nur der Spannungszeitfläche folgend, hat aber eine andere Form, weil die Magnetfeldstärken bei einem EI Kerntrafo im Eisenkern viel größer sind als bei einem Ringkerntrafo.

**Im weiteren Verlauf** wird also 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 und damit auch die Sekundärspannung erzeugt.

**In der Trafoberechnungsformel kommt der Leerlauf- oder Last-Strom nicht vor:**

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

$B_{max}$  hängt also nur von einer Konstanten 4,44, der Frequenz  $F$ , der Windungszahl  $N$  und der Eisenkernfläche  $A$  ab. Wobei  $N$  als die Größe zur Spannungsanpassung verstanden werden kann. Die Eisenkernfläche wird quer zur Flussrichtung des Magnetflusses gemessen.

**Es kann nur immer wieder der Satz zitiert werden:** Der Leerlauf Strom ist die Antwort des Trafos auf seine Behandlung mit Spannungszeitflächen und sagt außerdem etwas über seine Bauart aus.

Das Verständnis über das elektrische und physikalische Verhalten eines Trafos besonders in Beziehung zu Spannungsanomalien und dem Einschalten des Trafos wird damit wesentlich erleichtert und sozusagen normiert. Siehe die Einschaltprozedur Demonstration weiter unten im Bild 4.

**Die Anwesenheit des Eisenkerns hat große Auswirkungen, auch 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. Die Elektriker sagen es fehlt dann der induktive Widerstand, wobei für diesen auch beim Trafo mit Eisenkern von einem linearen Verlauf über die Spannungszeitfläche ausgegangen wird, was aber nicht der Fall ist. Nur beim Lufttrafo ist der induktive Widerstand linear, weil die Luft keine Sättigungserscheinung kennt. Eine Hysteresekurve, die der von einem Eisenkern vergleichbar ist, existiert dabei nicht, weil die Induktion über dem Strom aufgetragen, einer Geraden folgt.

**Hier mal die Beschreibung mit der Stromtheorie:** Das Eisen im Ringkerntrafokern dagegen wird schon mit geringsten Amperewindungen, das ist das Produkt aus dem 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 ist natürlich sehr umständlich erklärt und kaum von Laien verstanden worden.) Das damit gesagte 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 verschwindet. Fazit der induktive Widerstand der Trafoprimärspule ist also über den Verlauf einer Spannungshalbwelle extrem nichtlinear und wird bei Übersteuerung am Ende der Spannungshalbwelle zu Null.

Mit der Spannungszeitflächen Beeinflussung ist das direkt und einfacher verständlich und für alle Trafotypen mit total unterschiedlichen Leerlaufstromverläufen gleich verständlich. **Bei leichter Übersteuerung der Magnetisierungskurve durch zu große Spannungszeitflächen verschwindet am Ende der Spannungshalbwelle der Induktive Widerstand, weil das Eisen dann komplett ummagnetisiert ist.** ( Bei großer Übersteuerung passiert der Vorgang schon mitten im VERLAUF einer Spannungshalbwelle. )Man braucht hier nicht die Gegeninduktionsspannung für die Primärspule einzuführen, die übrigens noch nie gemessen werden konnte.

### **Lastbetrieb eines fast idealen Ringkerntrafos:**

Erst bei Belastung auf der Sekundär-Seite stellt sich ein Strom durch die Last und im Verhältnis der Trafo – Übersetzung, auch auf der Primär-Seite ein. Bisher argumentierte man: Die in der Primärspule wirkende Gegeninduktionsspannung, die der Speisespannung entgegengerichtet ist, wird mit zunehmender Last kleiner, wodurch der der Strom in der Primär- Spule zunimmt, was aber schwer verständlich ist.

**Einfach zu verstehen ist:** 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 des Ringkerntrafos wird dabei nicht durch die sehr geringen Eisenkernverluste erwärmt. Die Erwärmung des Trafos kommt allein von den Ohmschen Verlusten in den Kupferwicklungen der Primär und Sekundärseite, die sich im Quadrat zu 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 hohe Flussdichte also einer hohen Induktion B und eine große Eisenkernfläche erreicht. Für einen großen Strom braucht es dicke Drahtquerschnitte in den Wicklungen, damit diese nicht zu heiß werden. Dicke Drähte brauchen auch wiederum mehr Platz und einen größeren Wickelkörper. Eine hohe Primär-Spannung braucht viele Windungen auf der Primärspule. Die Frequenz ist von außen vorgegeben. Siehe auch die Trafoberechnungs-Formeln auf den folgenden Seiten.

### **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, wegen der Remanenz und nicht eine „*unterschiedliche vor gelagerte böse 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 Trafoeinschalten 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 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 oder nur eine geringe 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 Einschalttrichtung, usw.).

Alle vom Autor hier aufgestellten 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 sagt aus wo sich die Magnetisierung auf der Hysteresekurve gerade befindet, präzise zumindest dann wenn der Leerlaufblindstrom sein Maximum hat, weil da die Magnetisierung genau auf einem Endpunkt der Hysteresekurve und der Spannungshalbwelle angekommen ist.

#### **Höhe des Einschaltstromes:**

Im Fall der Eisensättigung – welche mehr oder weniger fast immer entsteht beim unkontrollierten Trafo Einschalten – ist vor allem beim Ringkerntrafo der Kupferwiderstand der Primärwicklung, zusammen mit dem Netz-Innenwiderstand, der einzige strombegrenzende Widerstand im Stromkreis. Also je verlustärmer der Trafo ist und je kräftiger der Netzanschluss 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  $230V / 0,5 \text{ Ohm} = 640 \text{ Aeff}$  und ca. 900 A Spitze.) Das liest sich so unscheinbar, stellt aber de- facto einen kapitalen Kurzschluss für das Stromnetz dar, der allerdings nur 2-5 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 schützt.

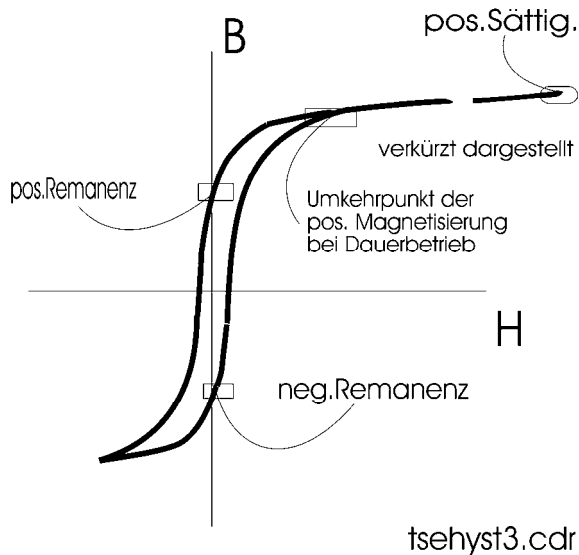
Anschauliche These: Während dem Einschaltstromstoss scheint das Eisen bei einem Ringkern-Trafo wie nicht vorhanden zu sein, weil die Magnetisierung des Eisens in diesem Fall der Sättigung der Induktion nicht mehr durch die Netzspannung geändert werden kann und deshalb der induktive Widerstand fehlt,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

Bild 10:

## Hysteresekurve bei geschachtelten Trafos

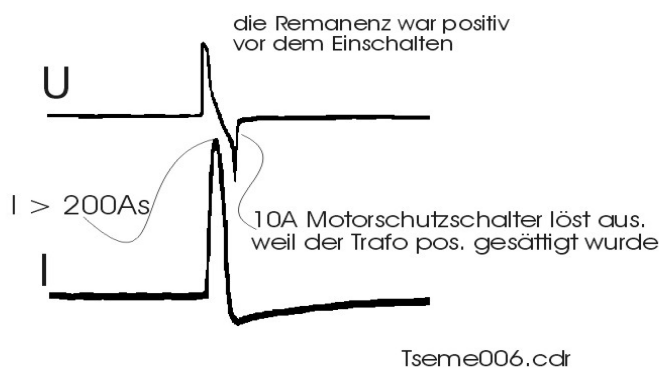
kleinere Remanenz als bei Ringkerntrafos  
jedoch größere als bei geschweißten Trafos  
die immer einen kleinen Luftspalt haben.



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.



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 des Trafos im Scheitel der Spannung als dem besten Einschalt- Verfahren gesprochen.**

**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. Die Remanenz bleibt ohne Einwirkung von Außen sehr lange, viele Jahre, erhalten.

### 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 Dimension der Formel:  $B = [\text{Spannung} \times \text{Zeit} / \text{Kernfläche}]$ , zeigt bei einem Ringkerntrafo innerhalb der Hysteresekurve, wo die Permeabilität  $\mu$  des Eisen hoch ist, besser als die dazugehörige Formel, dass für das B der Strom I keine Rolle spielt:

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

$\mu_r$  ist die magnetische Leitfähigkeit des Eisens,  $\mu_0$  die der Luft.

I ist der Strom

N ist die Windungszahl der Primärspule

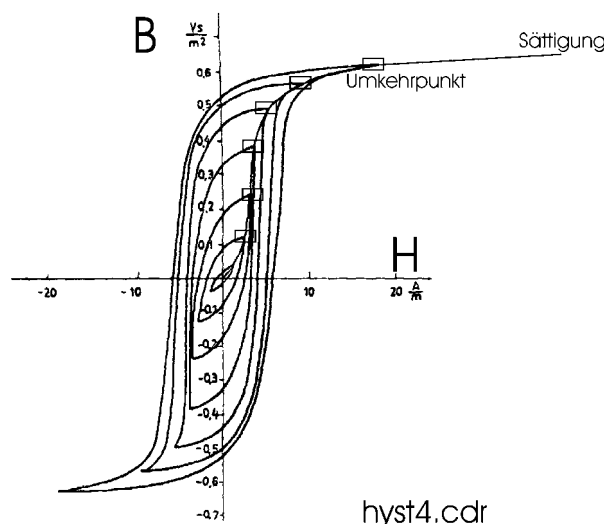
L ist die Länge der Magnetfeldlinien im Eisen.

Natürlich ist der Strom wiederum nötig um die Hysteresekurve auszusteuern, sprich das Bmax. zu erreichen. Die Formel zeigt ja auch den Zusammenhang.

( Wenn wie beim Ringkerntrafo das  $\mu_r$  sehr groß ist, dann kann I sehr klein sein, um die Hysteresekurve voll zu durchfahren. Die entsprechende Hysteresekurve, siehe Bild 11 weiter unten, ist dann wesentlich schmaler als die in Bild 1 dargestellte.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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



**Bild 1.**

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  $M_y$  des Eisens ist dann ab der Sättigung gleich 1, wie bei einer Luftspule. In der Mitte der Kurve ist das  $M_y$  gleich 10000 und höher.

**Innerhalb der Hystereseurve 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 Hystereseurve verschwindend klein. Siehe die Bilder 2 und 11.

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 auch immer der Strom und auch andere sekundäre Wirkungen die Folge einer treibenden Spannung.**

Auch aus diesem Grund sollte hier beim AC 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..

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. ) Siehe Bild 2. Die Funktionsweise der TSR Einschaltprozedur legt ebenfalls diese Betrachtungsweise nahe.

Die Magnetisierung läuft also auf einer Hystereseurve im Takt der Spannungshalbwellen hin und her. Auf welcher Hystereseurve, Bild 1, 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, weil die Hystereseurve dann weiter angesteuert wird.

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 in Bild 1 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 Hysteresekurve.

Die Flußdichte  $B$  kann ab der beginnenden Sättigung 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.

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 Leerlaufstrom fließt dann aber auch bei Last und hat mit dem Laststrom nichts zu tun. Entgegen seiner Bezeichnung. Der Leerlaufstrom ist der zur Ummagnetisierung gehörende Strom.)

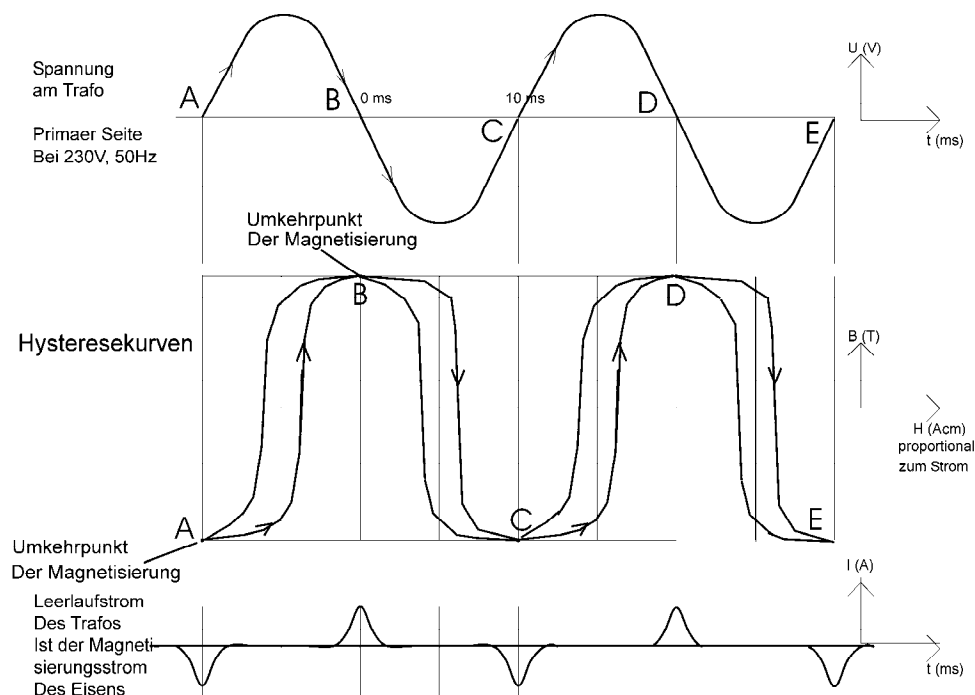
Der folgende aufgeführte praktische Beweis dient dafür, dass sich die Flussdichte  $B$  im Eisen eines Trafo nicht über die Sättigung erhöhen lässt, auch wenn die treibende Spannung, die Einwirkungszeit und damit der Spulenstrom beliebig groß wird:

Bei Magnetresonanz-, auch Kernspin-Anlagen genannt, werden supraleitende, in sich kurzgeschlossene Luftspulen benutzt, welche eine permanente oder pulsierende 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.

**Bild 2.**

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

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.

## Definition der Größen:

### Magnetfluß:

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

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

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

Bei der Speisung mit Wechselstrom, jetzt korrekterweise mit Wechselspannung bezeichnet, stellt sich ein im Verhältnis zum Laststrom messbarer Primärstrom **beim verlustarmen** Ringkerntrafo, erst bei einer sekundärseitigen Belastung ein.

**Ein eckiger** Transformator dagegen benötigt auch ohne Belastung nicht wenig Energie,  $U * I * t$ , zum „umpolen“ des Eisenkernes. Es fließt dabei der primärseitige Leerlaufstrom, der sich nicht 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.

- In der Literatur findet man Schaltvorschläge zum Aufzeichnen der Hysteresekurve mittels Lissajous Figuren auf einem Oszilloscop.-
- [WWW.fh-duesseldorf.de/DOCS/FB/MUV/staniek/dokumente/hysteresse.htm](http://WWW.fh-duesseldorf.de/DOCS/FB/MUV/staniek/dokumente/hysteresse.htm).
- 

**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, die aber dabei nicht dargestellt ist, an einem bestimmten Eisenkern.

Siehe Bild 2 , 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, weil alle Weißschen Bezirke im Eisen bereits ummagnetisiert sind.

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.

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

F = Frequenz, N = Windungszahl, A = Eisenquerschnittsfläche, B<sub>max.</sub> = 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. ( Bei Pulverkernen liegt die max. Induktion niedriger.)

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 über die weniger Windungen 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 umgepolt.

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 Bild 1 und 2.

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 folgenden Seiten, 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 Hystereseurve. Wo die Magnetisierung hinläuft hängt von der Form der Hystereseurve, siehe die Bilder 9, 10, 11, und zusätzlich dazu vom Ausschaltzeitpunkt ab.

Wird genau im Nulldurchgang der Speisespannung ausgeschaltet, wenn also die Magnetisierung auf einem Umkehrpunkt der Hystereseurve steht, dann läuft die Magnetisierung von dort aus zum höchsten möglichen **Remanenzpunkt** auf der B-Achse bei Feldstärke Null. Siehe die Bilder 9, 10, 11.

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 Daueromagnetismus.

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 Erklärung eines ähnlichen Versuchs in Bild 13.

Im **Remanenzpunkt** ist damit die Polarität und die Amplitude der letzten Ummagnetisierung und damit der letzten vor dem Ausschalten wirkenden Spannungshalbwellenzeitfläche gespeichert. Das gilt natürlich auch für den Fall einer Ausschaltung nicht zum Ende einer Spannungshalbwelle.

Es gibt Einschaltvorrichtungen, die sich diesen Umstand zunutze machen, sich die Ausschaltzeit merken und den Einschaltzeitpunkt damit steuern. Aber beim ersten Mal einschalten oder einem neuen Netzanschluss 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 geht die Magnetisierung zurück.

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 bis zu 10 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, bzw. danach wieder hergestellt. 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 innen liegende Risse untersucht werden.

Die Kernverluste, auch als Leerlaufwirkverluste 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 bei geschichteten Kernen 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.

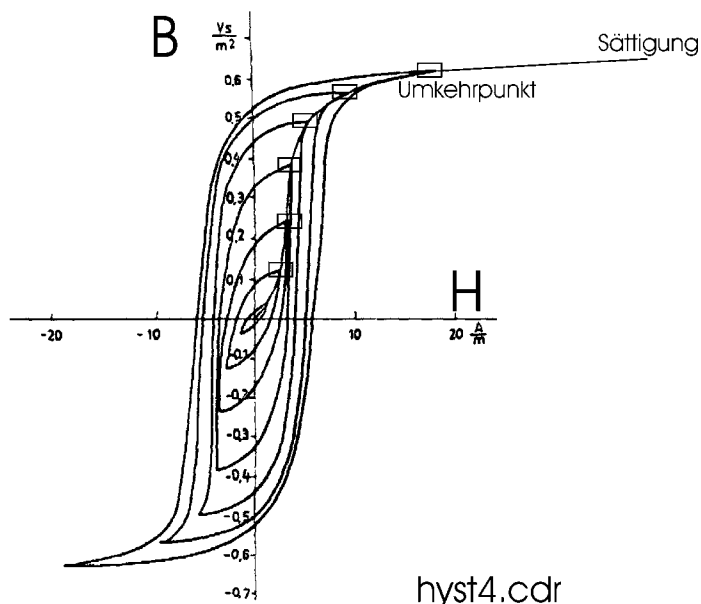
Praktischer Beweis dafür, dass Remanenz nichts mit Verlusten zu tun hat: Ein Ringkerntrafo mit hoher **Remanenz** hat viel kleinere Leerlaufverluste als ein eckiger Trafo der eine niedere **Remanenz** hat. Also eine hohe Remanenz bedeutet **nicht** hohe Verluste im Eisen.

**Hysteresekurve im Eisenkern und Wirkungsweise der TSR Einschaltprozedur.** Siehe auch das Bild 4 mit der Einschaltprozedur.

**Bild 3.**

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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



**Die Position der Remanenz-punkte**, 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, siehe Bild 4, wird die Magnetisierung im Eisenkern, zuerst schrittweise zu dem max. Umkehrpunkt der Hysteresekurve hin transportiert und dann wird gegen phasig dazu voll eingeschaltet. Das Trafoeisen integriert dabei die Spannungszeitflächen mal dem zugehörigen Leerlaufstrom als Ummagnetisierungsenergie, aber nur solange bis die Max. Ind. Erreicht wird. Danach ist die Integration beendet und weitere Spannungszeitflächen bewegen die Magnetisierung nur noch von dem max. Remananzpunkt zu der max. Induktion hin. In der Pause läuft die Magnetisierung wieder zum Remananzpunkt zurück.

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 dazugehörigen Betriebs-Umkehrpunkt hin und her.

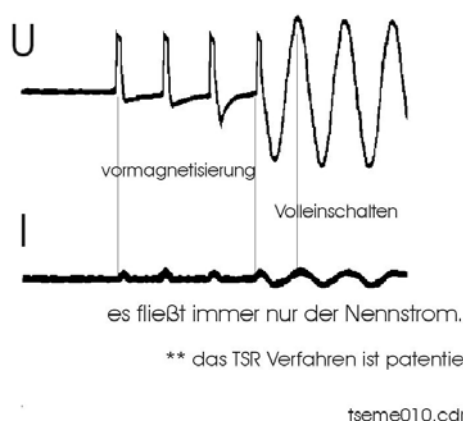
Zu viele Vormagnetisierspannungszipfel schaden dabei nicht, das heißt das Eisen summiert sie nicht mehr auf, es reagiert dabei wie eine magnetische Feder. Die Magnetisierung läuft dabei mit dem Spannungszipfel immer nur zum Max. Umkehrpunkt und in der Pause, bis der nächste gleichpolige Spannungszipfel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

max. **Remanenzpunkt** zurück. Es entsteht dabei nur der Leerlaufblindstrompeak 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 2. 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 **Remanenzpunkt** 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.



### Bild 4.

Die unipolaren Vormagnetisier- Spannungspulse auf der U-Achse, das sind die hier positiven Spannungs-Zacken vor dem Volleinschalten, transportieren die Magnetisierung zu dem Umkehrpunkt rechts oben auf der Hysteresekurve. Siehe vorige Bilder 2-4. Anschliessend schaltet das TSR in die entgegen-gesetzte Richtung der Magnetisierung voll ein. Deshalb wird die Hysteresekurve 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. Die STROMANTWORT des Trafos schon beim Vormagnetisieren zeigt eindrücklich, dass die Remanenz schon auf dem max. pos. Punkt angekommen war bevor der Trafo vormagnetisiert wurde.

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

Bis Mitte 2010 gerechnet sind schon viele tausend 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.**

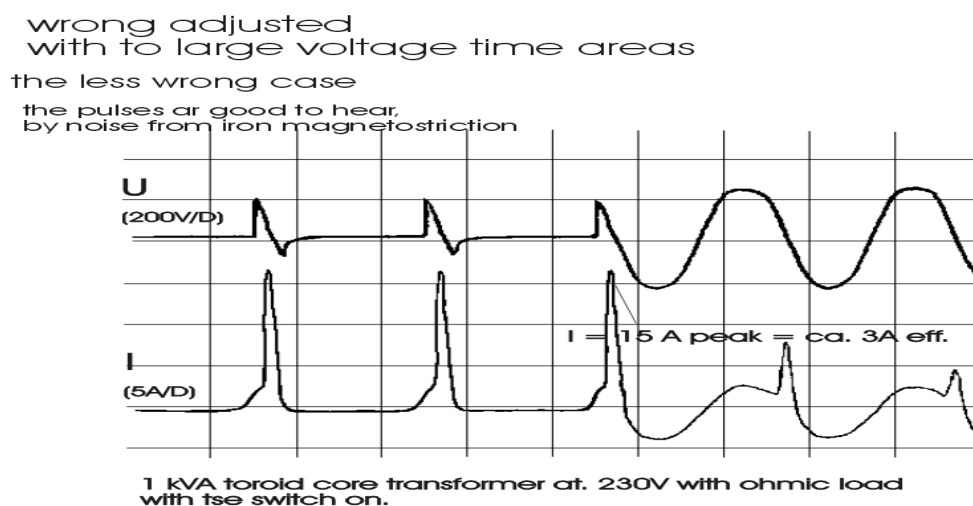


Hierbei muß in der Regel lediglich grob zwischen EI-Kern oder Ring-Kerntrafos unterschieden werden. Siehe die Bilder 5 bis 11.

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

**Die positive Vormagnetisierung ist zu stark**, das Poti auf dem TSRL steht zu weit rechts, siehe auch nächstes Bild 6.

19



tsem020e.cdr

Bild 5.

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.

Das Poti auf dem TSRL steht hier zu weit rechts. Siehe Bild 6.

Nach dem Volleinschalten klingen die Stromspitzen schnell ab.

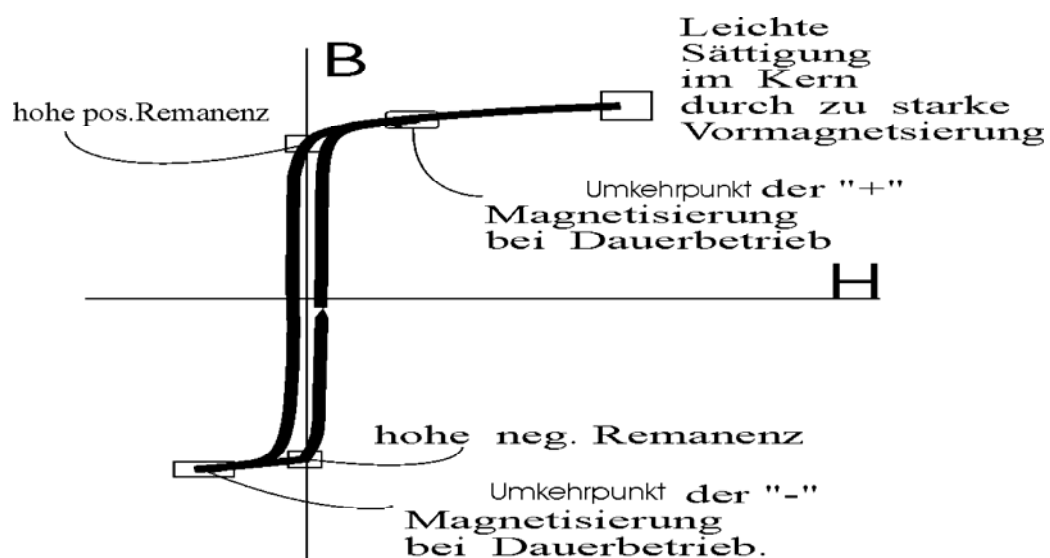
Die Strommessung belegt die Wirkungsweise des TSR und stützt die hier dargelegte Trafo Theorie auf anschauliche Weise.

### 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



**Bild 6.**

Hier wird das Trafoeisen mit dem TSR zu stark vormagnetsiert. Siehe Bild 5.

Jeder Spannungsabschnitt der Vormagnetsierung fährt die Magnetisierung von der pos. **Remanenz ausgehend** über den Umkehrpunkt hinaus zum Punkt der leichten pos. Sättigung und wieder zurück zur pos. Remanenz.

Siehe voriges Bild 5, zeigt das eindrücklich die dazugehörige Strommessung.

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

20

**wrong adjusted with voltage time areas to small**

the worst case.

1kVA toroid core transformer switch on with tse in no load state at 230V. The voltage time areas for premagnetizing are to small adjusted. The magnetization don't reach the positive remanence point.



negative inrush current peak.

indicates that the remanence befor switch on was negative

Bild 7

tsem026e.cdr

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 Hysteresekurve wird hier nicht erreicht, was zum richtigen Einschalten nötig wäre.

Beim Volleinschalten wird die Magnetisierung in eine neg. Sättigung getrieben, weil die Hysteresekurve 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.

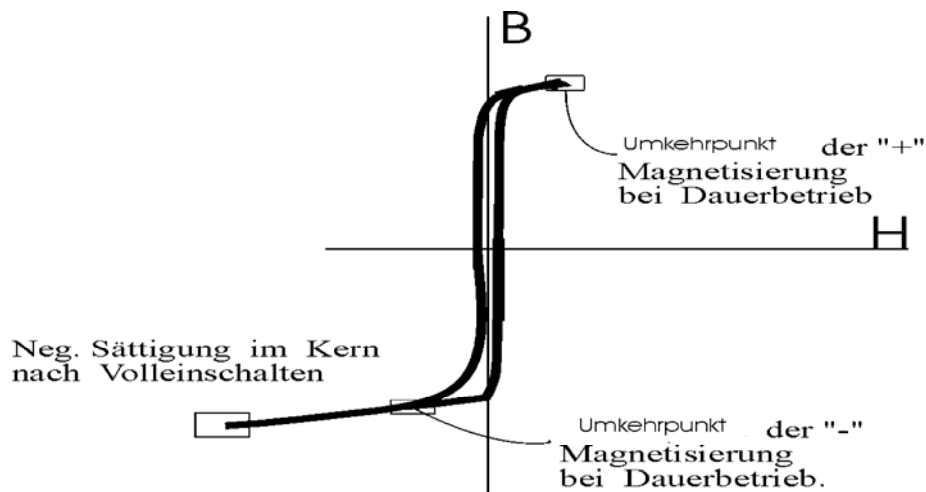
Beim ersten Mal Netzeinschalten dauert die Vormagnetisierung deutlich länger, als wenn das TSR mit dem Steuereingang wiederholt geschaltet wird. Weil beim Schalten mit dem Steuereingang definiert in Richtung der Vormagnetisierung ausgeschaltet wird.

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 Hysteresekurve im nächsten Bild 8.

## Hysteresekurve für: durch das TSRL zu wenig pos. Vormagnetisiert



**Bild 8**

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

Beim Vormagnetisieren wurde der obere Umkehrpunkt der Magnetisierung auf der Hysteresekurve 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 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.

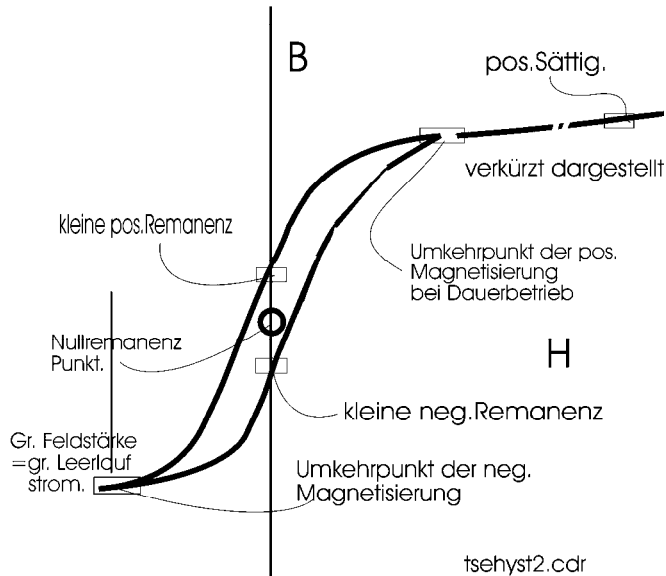
Die stabile und sicher Arbeitsweise wird mit einer etwas zu starken Vormagnetisierung erreicht.

Die leichte positive Sättigung ist wie eine begrenzende Wand, an welche die Magnetisierung vor dem Volleinschalten gefahren wird. Siehe die Bilder 5 und 6. 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 geschernt, das heißt flacher und die Remanenz ist deutlich kleiner als bei Trafos ohne Luftspalt.



**Bild 9.**

Der Trafo hat 3 Luftspalte zwischen den E-I Kern-Schenkeln. ( Außen, Mitte, Außen.)

Die **Remanenz** ist niedrig. Man spricht hier von einer "geschernten 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 im Bild 4 und 5.

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.

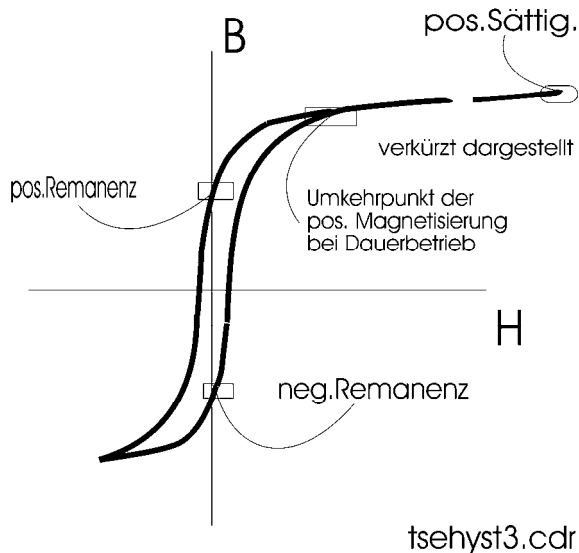
Ein Scheitelschalter wäre ideal wenn die **Remanenz** immer gleich Null ist. So ein Trafo hat aber kein Eisen im Kern oder einen übergroßen Luftspalt oder viele kleine, verteilte Luftspalte. Es gibt TRAFOS welche den Luftspalt als viele kleine Luftspalte verteilt im Kern haben. Diese sind aber teuer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

## Hysteresekurve eines geschachtelten Trafos:

### Hysteresekurve

#### bei geschachtelten Trafos

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



**Bild 10.**

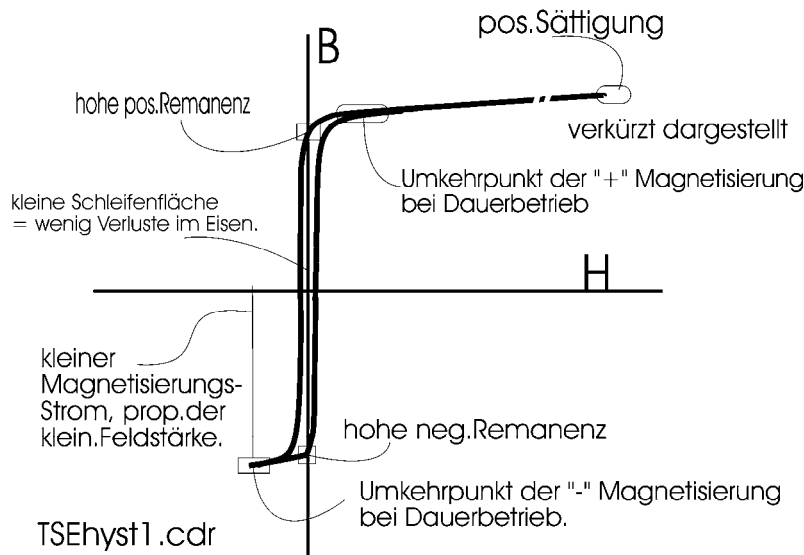
Die **Remanenz** ist höher als beim geschweißten Trafo, aufgrund der geringeren Restluftspalte, aber nicht so hoch wie beim Ringkerntrafo. Die Magnetisierung läuft auf den max. möglichen positiven **Remanenzpunkt** wenn der Trafo im Nulldurchgang der Netzspannung ausgeschaltet wird und bleibt dort erhalten.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

Der Nachweis der **Remanenz** ist im Bild 13 mit einem Versuchsaufbau erklärt. Die Kern-Sättigung wird beim „falschen Einschalten“ erzielt.

## Hysteresekurve eines Ringkerntrafos:

# Hysteresekurve

bei Ringkern-Trafos  
(Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz



**Bild 11.**

Die Hysteresekurve steht hier fast senkrecht. Die **Remanenz** ist hoch, sie steht fast so hoch wie der BetriebsUmkehrpunkt. 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 im Bild 3, 4, 5.

(Die unipolaren Spannungsabschnitte transportieren die Magnetisierung. Im Falle wenn sie schon oben steht, vom oberen **Remanenzpunkt** zum oberen Umkehrpunkt.

In der Sannungsabschnitts-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.

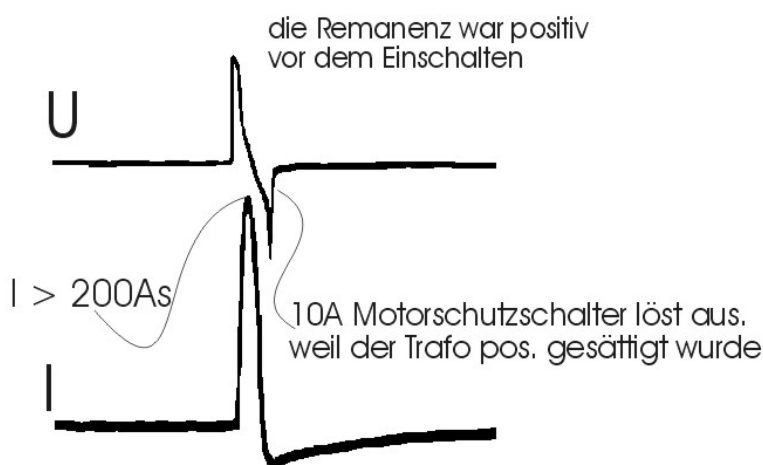
Das kann man selber beobachten, wenn in einem Haushalts-Stromnetz, gleichzeitig mit dem Trafo, Lasten betrieben werden welche nur die eine, hier die negative Halbwelle nutzen. (Widerstandslast in Sparschaltung über eine Diode betrieben.) Wenn der Trafo ein Ringkerntrafo mit hoher Ausnutzung der Induktion 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.

1kVA Ringkerntrafo mit scheidel-schaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet.



Tseme006.cdr

Scheitel-schalter-auf-trafo1.cdr

Bild 12.



Der **Scheitelschalter ist nicht gut für den 1kVA Ringkerntrafo** (Primär 230V.)  
Ein 10A Motorschutzschalter löst flink aus

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 12 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 BetriebsUmkehrpunkten. Das lässt sich auch tatsächlich so nachmessen. Siehe Hysteresekurve im Bild 9.

**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 BetriebsUmkehrpunkt auf der Hysteresekurve 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 Hysteresekurve es zeigt. Siehe weiter unten.

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

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

Die Spannungszeitfläche einer Netzhalbwelle transportiert dabei die Magnetisierung von einem zum anderen Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve.

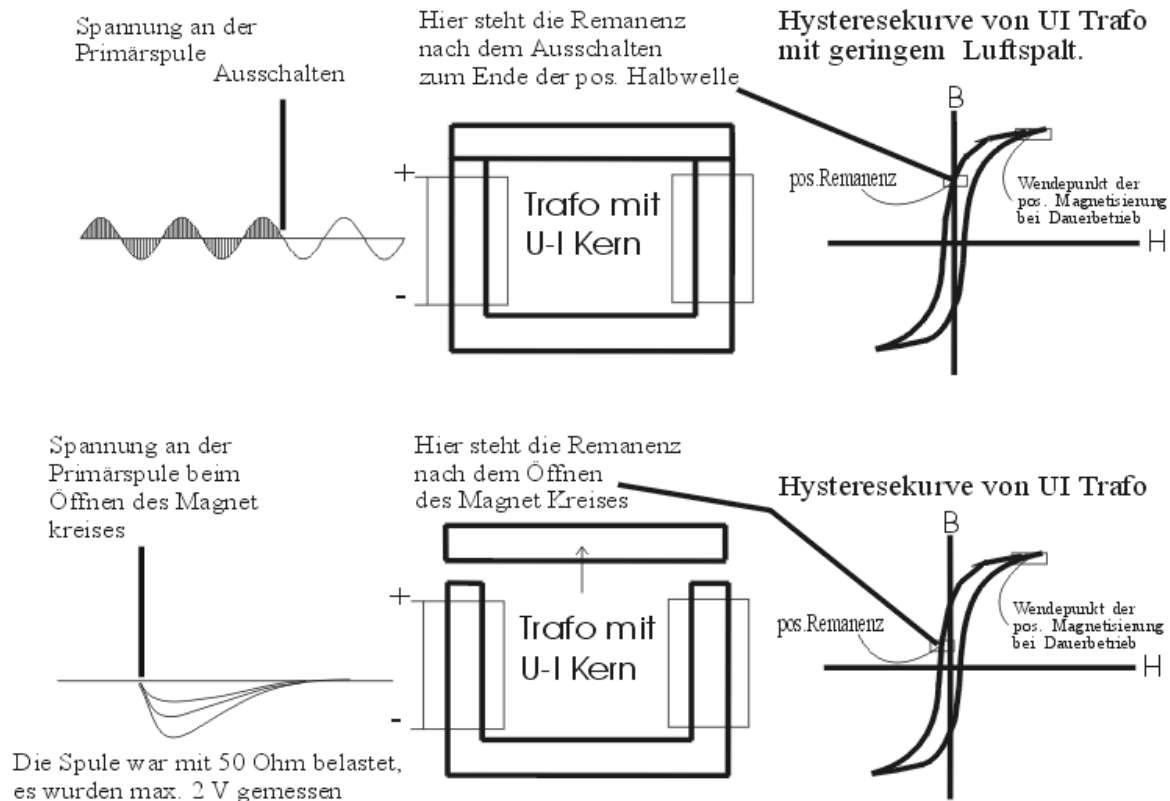
Die Flußdichte  $B$ , hier auch Magnetisierung genannt, kann ab der beginnenden Sättigung nur noch unwesentlich weiter erhöht werden, auch wenn die treibende Spannungszeitfläche dazu vergrößert wird, indem die Spannung erhöht wird oder längere Zeit einwirkt. (Man nimmt an, dass dann alle Weißschen Bezirke im Eisen, das sind Mini-Magnete, längs dem Magnet-Feld ausgerichtet sind.) Die Hysteresekurve 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 Oscilloscop und zum Beispiel mit

einem Trafoschaltrelais, welches absichtlich dejustiert wird, selber Einschaltversuche macht.

## 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.

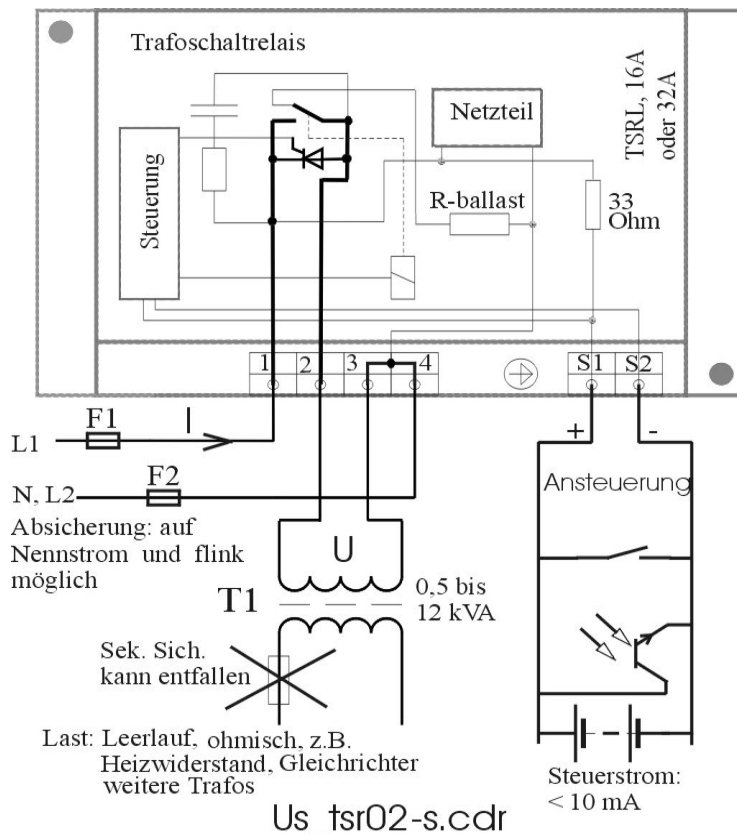
Die Remanenz verkörpert eine im Magnetkreis gespeicherte Energie, die beim Entladen frei wird, wie an der Erzeugung des Spannungsimpulses sichtbar wird. Wird der Magnetkreis mehrmals wieder geschlossen und geöffnet, dann wird der Spannungspuls kleiner, verschwindet aber nicht ganz, weil eine geringe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

Remanenz-vers-1.cdr

### Bild 13.

Bei dem Versuch ist nur die Primärspule benutzt worden.

## Blockschaltbild und Anschluss - Plan des TSR-L.



**Bild 14.**

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 400 Optionen gestatten die Anpassung an viele Gegebenheiten.

Immer gleiches Einschaltverhalten bei Transformatoren die belastet oder unbelastet sind.

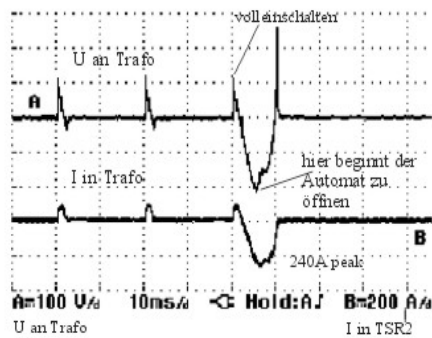
Das Einschaltverfahren ist lastunabhängig. Die Kombination von Thyristor und sehr präzise schaltendem elektromechanischem Relais ergibt ein verschleissfreies Hybridrelais.

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.

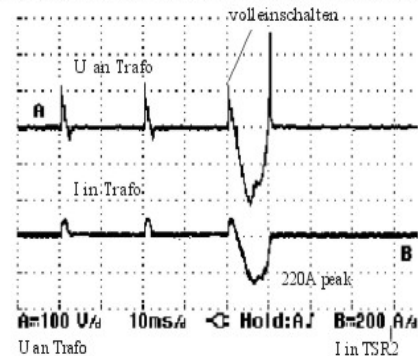
## Ein TSRL schaltet ohne Schaden auf einen Kurzschluß ein. Das TSRL ist sehr robust.

### Einschalten von kurzgeschlossenem Ringkerntrafo mit dem TSR

2 kVA Ringkerntrafo mit sekundären Kurzschluß mit TSR2 eingeschaltet.  
Mit 16A B-Typ Leitungsschutzschalter abgesichert, der erst bei volleinschalten auslöst.  
(Ein R-10A Automat hätte schon beim Vormagnetisieren ausgelöst.)  
Der TSR und natürlich der Leitungsschutzschalter bleiben dabei unbeschädigt.  
Der vorgeschaltete C 16A Automat hat dabei auch ausgelöst.



2 kVA Ringkerntrafo mit sekundären Kurzschluß mit TSR2 eingeschaltet.  
Mit 10A B-Typ Leitungsschutzschalter abgesichert, der erst bei volleinschalten auslöst.  
(Ein R-10A Automat hätte schon beim Vormagnetisieren ausgelöst.)  
Der TSR und natürlich der Leitungsschutzschalter bleiben dabei unbeschädigt.  
Der vorgeschaltete C 16A Automat hat dabei auch ausgelöst.



Fazit: nur ein R 10A Automat verhindert das Auslösen des vorgeschalteten C 16A Automaten.  
Mit dem B 10A Automaten entsteht eine 20A weniger hohe Stromspitze als mit dem B 16A Automat.

Emeko Ing. Büro M. Konstanzer 11.12.98  
981211.cdr

### Bild 15.

Auch ein Kurzschluß stellt für das TSR-L kein Problem dar, wenn es richtig abgesichert ist, weil die Kombination von robustem Thyristor und robustem Relais sich hierbei bewährt. Der Thyristor widersteht für 10 msec. mehr als 500A eff. Der Überstrom wird beim Volleinschalten vom Relais übernommen, welches über 1000A eff. aushält.

Mehr als 240A peak kommen nicht zum fließen. Der 16A B typ Leitungsschutzschalter öffnet dabei schon nach 5 msec. Und begrenzt zusätzlich den Strom.

Auch ein C 16A Automat ist geeignet das 16A TSRL abzusichern.

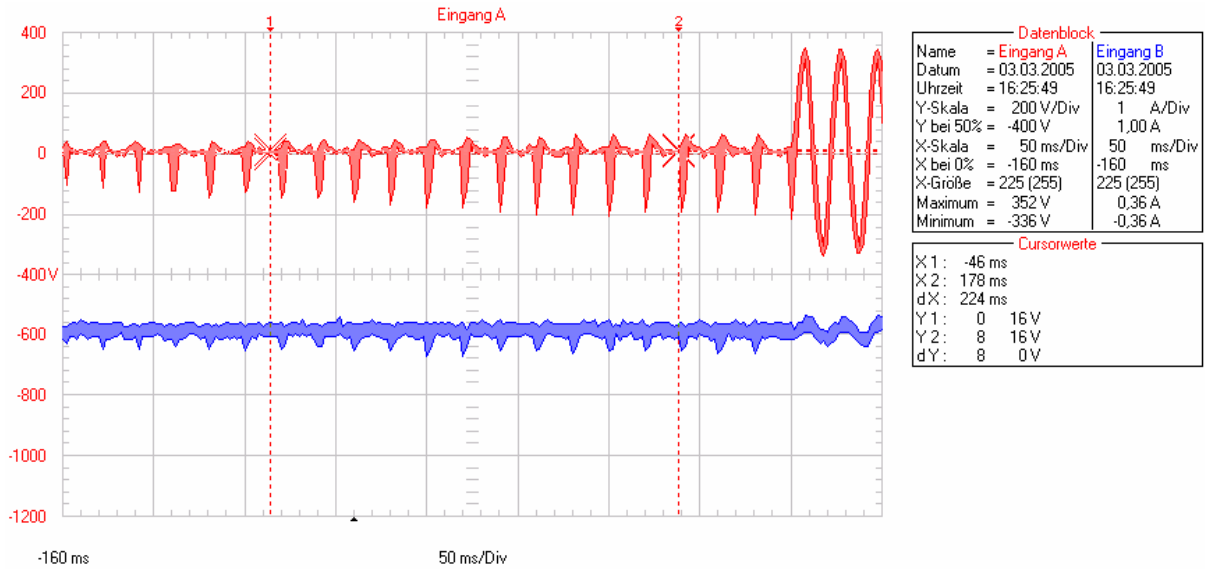
Der Thyristor sieht bei diesem Beispiel nur einen Strom von ca. 80 A peak, während der Vormagnetisierungspulse.

Weil das Relais in der Mitte des letzten Pulses schliesst und weniger als 1 msec. lang prellt, geschieht das Kontaktschließen hier bei weniger als 50 A peak, was den Relaiskontakt hierbei kaum verschleißt und natürlich auch nicht verschweißen läßt.

Der Kontakt kann laut Datenblatt ohne Thyristorhilfe einen Strom von 1400A Peak beim schließen aushalten ohne zu verschweißen.

## TSRL für 600VA Ringkern-Röhrenheiztrafos im Leerlauf eingeschaltet

Mit Option: langsames Andimmen



TSRL-030305-01.fvf, TSRL mit langsamem Andimmen, Last = Ringkerntrafo im Leerlauf

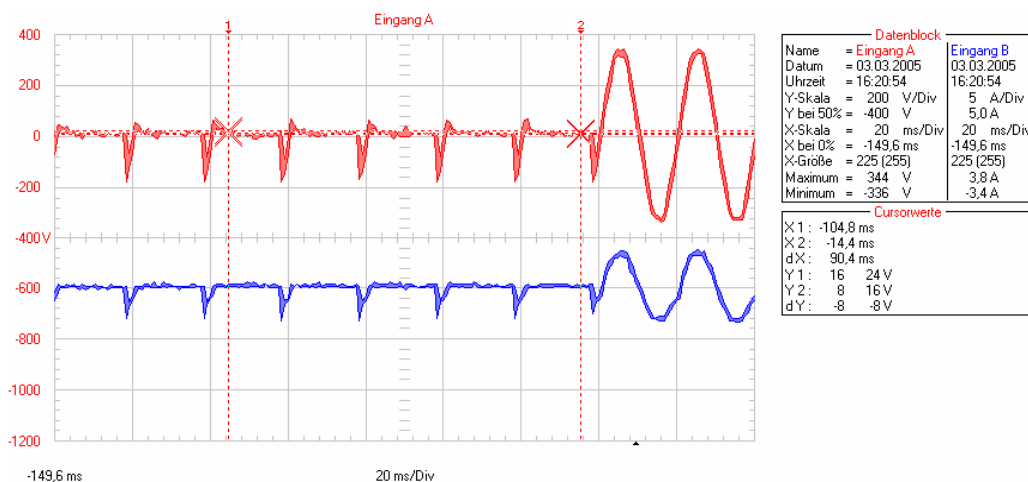
**Bild 16.**

Im Leerlauffall ist nur der Leerlaufstrom zu sehen. Er beträgt ca. 40mA eff. und hängt nur vom Trafotyp ab und ist beim Ringkerntrafos sehr klein.

Nach dem Volleinschalten geht der Strom ohne Überschwinger in den stationären Leerlaufstrom über.

Besser kann man den Trafo nicht einschalten.

## TSRL für 600VA Ringkern-Röhrenheiztrafos unter Last eingeschaltet



TSRL-030305-03.fvf, TSRL mit langsamem ANDimmen, Last = Ringkerntrafo 60 OVA mit 500 W Last ohmisch

**Bild 17.** Die positive Spannungs-Überschwinger auf der oberen Kurve zeigen an, dass der max. Umkehrpunkt auf der Hysteresekurve schon lange vor dem Volleinschalten erreicht ist.

Es werden also für das richtige Einschalten alleine betrachtet, viel zu viele Zipfel auf den Trafo gegeben. Man sieht, dass zu viele Zipfel nicht schaden. Das Volleinschalten erfolgt unbeeinflusst davon ohne Einschaltstrom.

Hier sind die zu vielen Zipfel gewollt, wegen der sanften Einschaltung von Röhrenheizungen oder Halogenlampen, damit deren Wendel zum glühen kommt bevor voll eingeschaltet wird und dann weniger stark gestresst wird.

Nur der Laststrom ist zu sehen in der unteren Kurve.

Auch hier entsteht keinerlei Einschaltstrom.

### **Es gibt verschiedene Arten von Einschalt-strombegrenzern.**

Solche mit Vorwiderständen die nach kurzer Zeit überbrückt werden.

Solche mit NTC Widerständen, sogenannte Heißeiter, die ungebrückt bleiben oder nach kurzer Zeit gebrückt werden.

Solche die aus Scheitelschalter-Halbleiterrelais oder Dimmern bestehen.

Solche die aus Kombinationen aus dem oben beschriebenen bestehen

Es sind hier nur die wichtigsten aufgezählt.

Für einfache Anforderungen sind diese Einschaltstrombegrenzer ausreichend.

### **Solche die den Einschaltstrom unter allen Umständen vermeiden und nicht nur begrenzen, weil sie beim Trafoschalten auf seine Physik Rücksicht nehmen. Sie heißen Trafo-Schalt-Relais, TSR.**

Es gibt auch zahlreiche andere Patente die beschreiben wie man Einschaltstrombegrenzer bauen kann.

Die meisten sind zu aufwändig oder beherrschen nicht das erste mal einschalten, wenn die **Remanenz**lage im Eisenkern noch unbekannt ist.

#### **Anwendungsbeispiele für die TSR:**

Für verlustarme Transformatoren, die ohne TSR einen hohen Einschaltstrom haben.

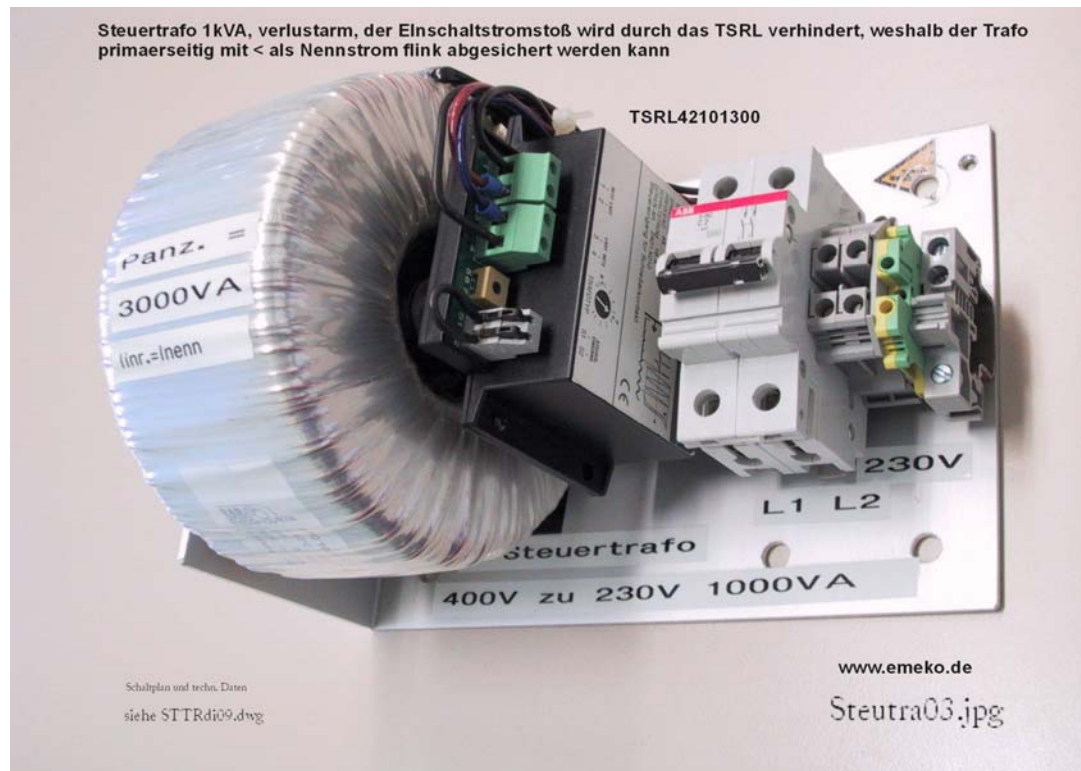
Für Anwendungen wo der Einschaltstrom gar nicht auftreten darf z.B. nach einer unterbrechungsfreien Strom Versorgung, USV.

Wo Trafos häufig geschaltet werden müssen, z.B. für Heizungen mit Kleinspannung.

Die Einsatzmöglichkeiten der TSR sind unbegrenzt. Über 400 zufriedene Kunden im In und Ausland nutzen die Vorteile der TSR.

Die Anwendungen reichen vom Folienschweißen in Verpackungsmaschinen, Speisetrrafos für LED-Verkehrsampeln, ableitstromarme Medizingerätetrrafos, schalten von Niedervoltheiztrafos für elektrische Werkzeugheizungen, bis zum Mikrowellen Generator HV-Trafo mit 100 kVA, vom Krankenhaus-Trenntrafo, Medizingeräte Netztrafo, bis zu Militär-Container Trenntrafo, usw.

## Neuartiger Typ eines Steuertransformators.



**Bild 18.**

Ein 1 kVA, 400V Ringkern-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.



## Ein 4kVA Trenntrafo für 230V mit einem TSRL für 32 Ampere.

Einsatz zum Beispiel in Feuerwehr Leitfahrzeugen.

Muster Aufbau von einem Kunden.



**Bild 19.**

Fahrzeuge, die mit Fremdstrom von außen versorgt werden, müssen den Fremdstrom zum Schutz der Personen auf dem Fahrzeug über Trenntrafos eingespeist bekommen.

Wenn der von außen kommende Schutzleiter unterbrochen und wenn im Fahrzeug durch ein fehlerhaftes Gerät ein Körperschluß entsteht, löst die speisende Absicherung nicht aus und das ganze Fahrzeugchassis liegt dann an Netzspannung, wenn kein Trenntrafo verwendet wird.

Siehe auch: Homepage der Fa. Beos. [www.beos-elektronik.de](http://www.beos-elektronik.de)

Das TSRL schaltet den Trafo im Leerlauf mit nur 100 mA, unter Last nur mit dem Laststrom ein.

## **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.

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.

## Auswirkung einer 5 msec. Spannungslücke bei einem 1,5 kVA Ringkerntrafo ohne TSR. Test nach EN 61000-4-11

Netzunterbrechungs-Test verschiedener Trafos im Leerlauf, nach IEC 1000-4-11.

Prüfgerät: IRSTO, Inrush-Stimulator, Zuleitung mit 10m mit 16qmm an Hauptvert. und insges. 2m mit 6qmm zu IRSTO und Prüfling

Einschaltverfahren: Ende pos. HWausgesch. sofort mit 0,5 der 1. neg. Halbwelle eingesch.

Trafotyp: 1,5kVA Ringkerntrafo 230V zu 24V

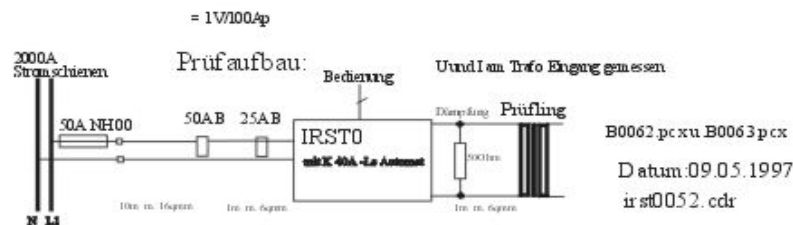
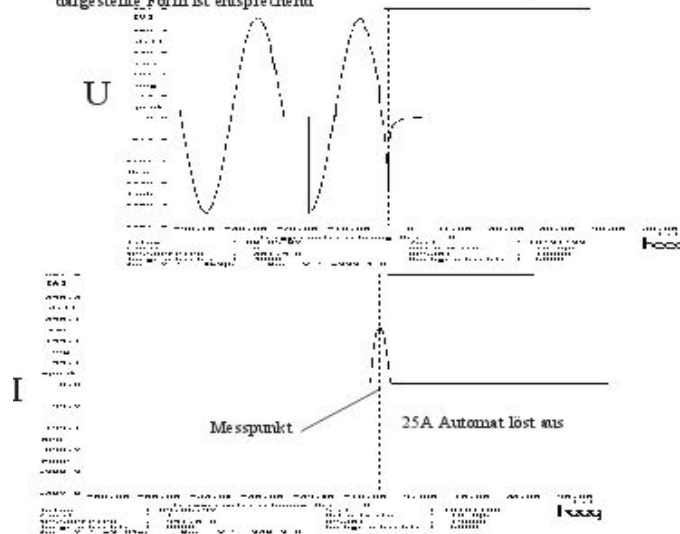
Leerlaufstrom: 0,5Aeff Netzspannung: 234V

ges. Netzimpedanz: ca. 0,3 Ohm incl. Absicherung von: 50A NH 00, + 50A + 25A, B-typ Ls-schalter:

Modalitäten: an 230V Wicklung des Prüflings angedemmt

**Messergebnis des max. Einschaltstromstoßes: 250 Apeak**

TEST nach EMV Norm IEC 1000-4-11 100% Einbruch für 0,5 Halbwelle  
dargestellte Form ist entsprechend



**Bild 20.**

Der Trafo gerät in Sättigung und antwortet mit einem großen Stromstoß, der in der I Kurve zu sehen ist.

Der für den Trafo viel zu große 25 A Typ B-Leitungsschutzschalter löst dabei aus, wenn kein TSR davor geschaltet ist.

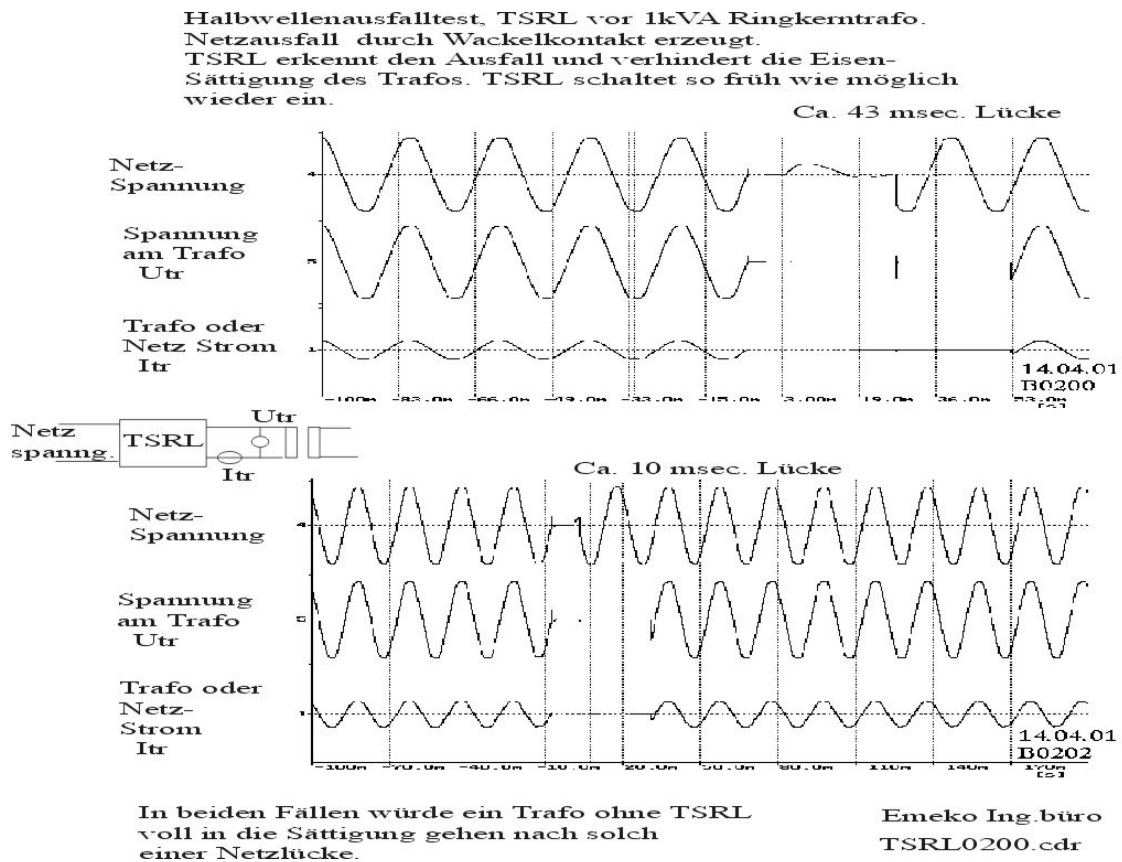
Für den 6,5 A Nennstrom des Trafos ist der 25 A Leitungsschutzschalter sowieso viel zu groß.

Ein PKZM0-10 hat einen Kurzschluss Auslösewert von 140A eff. und löst auch aus.

Ein PKZM0-10, der auf 6,3 Aeff. als kleinster träger Auslösewert einstellbar ist, wird mit der Aufgabe nicht fertig. Ein PKZM0-10-T löst auch aus, wenn der Halbwellenausfall größer als 5 msec. ist, was nach der EN61000-4-11 ein Prüfkriterium ist.

**Eine 5 Millisekunden lange Spannungslücke ist ein realistischer Wert wie er im Stromnetz als „sogenannter Voltage Dip“ durch Umschaltungen oder kurzzeitigen Überlasten vorkommt.**

## Auswirkung von Halbwellenausfällen wenn ein TSRL vor einem 1kVA Ringkerntrafo eingebaut ist.



**Bild 21.**

Die schnelle Ausschalt-Reaktion des TSRL schützt den Trafo vor Sättigung im Eisenkern bei Netzwiederkehr. Der Trafo würde sonst mit der Netz-Spannung zweimal hintereinander pos. magnetisiert und dann einen großen Strom ziehen. Siehe Bild 20.

Ein automatisches, schnelles wieder einschalten durch das TSRL erfolgt nur mit dem Nennstrom, weil das TSRL den richtigen Wiedereinschaltzeitpunkt zuvor ausrechnet. Der Effekt von hohen Einschaltströmen nach der Netzwiederkehr auf sogenannte Netzhalbwelleneinbrüche, siehe voriges Bild, kann durch Vorschalten eines TSRL mit Option: „ schnelle Halbwellenausfall Erkennung“ verhindert werden. ( Es ist auch eine Type des TSRL lieferbar, welche nach dem Halbwellenausfall immer mit der langsamen Einschaltprozedur startet. TSRL xxxx1xxx).

IT Netz Trenntrafos in Medizinischen Räumen nutzen bereits die oben gezeigte Technik des schnellen Einschaltens nach einem Netzunterbruch der kürzer als 50 msec. dauert. Diese Trenn-Trafos sind sogar als Ringkerntrafos ausgeführt und schalten mit nur dem Leerlaufstrom oder eben abhängig von der Last, mit dem Nennstrom ein. (Die Norm empfiehlt die Einschaltstrombegrenzung auf 12 mal Inenn. Die Norm empfiehlt auch eine Grenze für den Leerlaufstrom, weshalb die Luftspaltvergrößerung in herkömmlichen Medizin Trenntrafos ihre Grenzen hat.)

Mit dem TSRL ist der Ringkerntrafo als IT –Netztrafo deutlich besser als es die Norm empfiehlt.

Herkömmliche IT- Netztrafos haben außerdem ein Problem bei schnellen Halbwellenausfällen wie sie beim Umschalten der Stromnetze vorkommen, siehe voriges Bild. Das wird von der Norm bisher nicht berücksichtigt.

Das TSRL mit der Option „schnelle Halbwellenausfallerkennung“, kann Netzspannungslücken von kleiner 200 msec. erkennen und mit der anschließenden Schnelleinschaltung nach der Netzspannungswiederkehr reagieren. Nach länger als 200 msec. andauernden Netzspannungslücken, beginnt das TSRL nach der Netzspannungswiederkehr mit einem regulären Softstart der je nach Trafotyp, (siehe die Poti-einstellung), zwischen 150 msec. bis ca. 880 msec. dauert, bevor der Trafo voll eingeschaltet ist.

Spannungshalbwellenausfälle werden für Tests von Medizingeräten erzeugt. Dabei schützen die Trafoschaltrelais die Sicherungen vor dem Auslösen. Würden die Sicherungen auslösen wäre der Test nicht bestanden.

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](http://www.emeko.de)**

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

Erreichbar unter : **[www.emeko.de](http://www.emeko.de)**, **[Info@emeko.de](mailto:Info@emeko.de)**

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

D:\word-texte\fzart\TSR-Funkt-05.doc, EMEKO, Erstelldatum 30.12.07, letzte Korrektur 15.04.2011