

Elektromedizinische Geräte mit 50 Hz Transformatoren müssen seit dem Jahr 2007 die Bestimmungen der EN/IEC/UL-60601-1 einhalten, welche unter anderem die EN/IEC/UL 6001-4-11, Störfestigkeit gegen Voltage-Dips, beinhaltet.

Abhängig von der Funktion der Elektromedizinischen Geräte, ob diese Lebenserhaltend sind oder anderweitig eingesetzt werden, ist die Reaktion auf diese Voltage-Dips in Anwendungsklassen definiert. Dabei wird unterschieden ob beim Auftreten der Voltage-Dips die Geräte nicht gestört werden- oder kurz außer Betrieb gehen- oder ganz ausfallen dürfen. Da diese Voltage-Dips die Geräte Sicherung auslösen können, dieses je nach Anwendungsklasse verhindert werden muß, ist das bei 50HZ Netztransformatoren dann nur durch das davor schalten eines Trafoschaltrelais (TSRL) mit der Option für die Erkennung von Netz-Halbwellenausfällen, zu erreichen.

- 1.) Beschreibung der Physik welche die magnetischen Vorgänge im Eisenkern eines Transformators bestimmt. (Das ist für das Verständnis der Materie wichtig.)
- 2.) Beschreibung der Transformator- soft- start- Prozedur von EMEKO.
- 3.) Netz Halbwellen- Spannungs- Einbrüche erzeugen an Einphasen- Transformatoren große Stromspitzen an seinem Eingang. Weshalb das geschieht wird hier beschrieben.
- 4.) Vermeidung dieser Stromspitzen durch die Spannungseinbrüche, wenn ein Trafoschaltrelais, TSRL, vor den Transformator geschaltet ist.
- 5.) Gemessene Spannungen und Ströme in einen Transformator, der mit zufällig erzeugten Halbwellen-Spannungseinbrüchen gespeist wird. Die Einbrüche wurden erzeugt, indem ein Wackelkontakt auf der Primärseite erzeugt wurde.

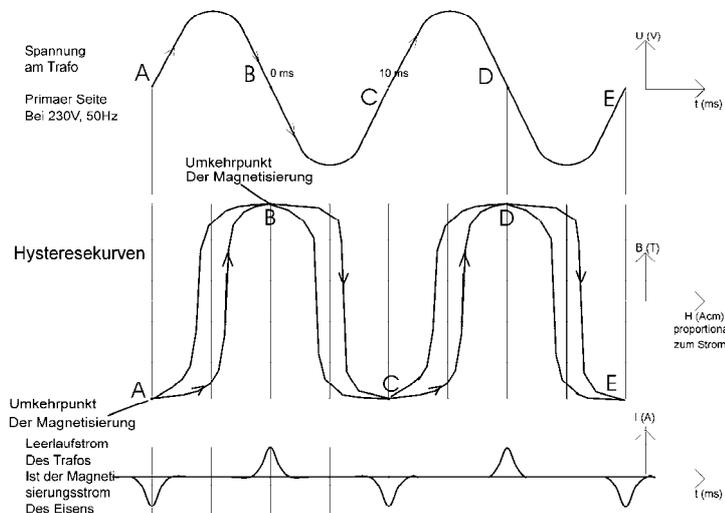
1.) Beschreibung der Physik welche die magnetischen Vorgänge im Eisenkern eines Transformators bestimmt.:

Beachte: Nicht der Eingangsstrom den der Transformator aufnimmt, sondern die Spannungs-Zeitflächen der Netzspannungshalbwellen, transportieren die Magnetisierung im Eisenkern entlang der Hysteresekurve. Siehe Bild 1. Eine Spannungs- Voll- Welle mit 20 msec. Dauer bei 50Hz treibt die Induktion 1 mal im Kreis herum entlang der Hysteresekurve.

Der Eingangsstrom ist die Antwort des Trafos auf die Spannungszeitflächen und nicht umgekehrt wie es leider noch oft behauptet wird.

Bild 1.

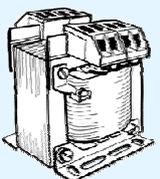
Fortlaufende Hysteresekurve im Eisenkern eines 50Hz Transformators im Leerlauf



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

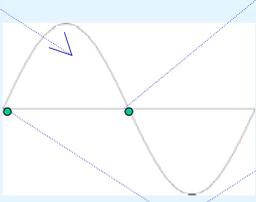
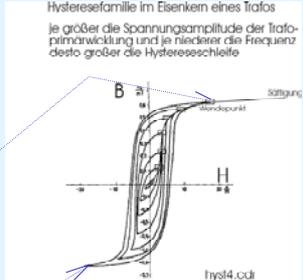
Im Dauerlauf gilt: Die Spannungszeitfläche der positiven Halbwellen, - mit einem Stromflußwinkel = 180 Grad-, transportiert die Magnetisierung, - die Induktion-, entlang der Hystereseurve vom Punkt A, zu dem anderen Ende der Kurve in Punkt B. Die negative Halbwellen bringt sie vom positiven Umkehr-(wende) Punkt B auf der Hystereseurve zu dem negativen Umkehr-(wende) Punkt A am Ende der Hystereseurve und so weiter immer fort. Das gilt aber nur im eingeschwungenen Zustand, nicht beim einschalten.

Bild 2



Noch mal: Was die Sinuskurve der Netz-Spannung bewirkt.

- Die positive Spannungshalbwelle transportiert die Magnetisierung vom negativen zum positiven Wendepunkt der Hystereseurve.

Die **Spannungszeitfläche** ist maßgebend. Mit einer ganzen Vollwelle, s.o., läuft die Magnetisierung einmal um.

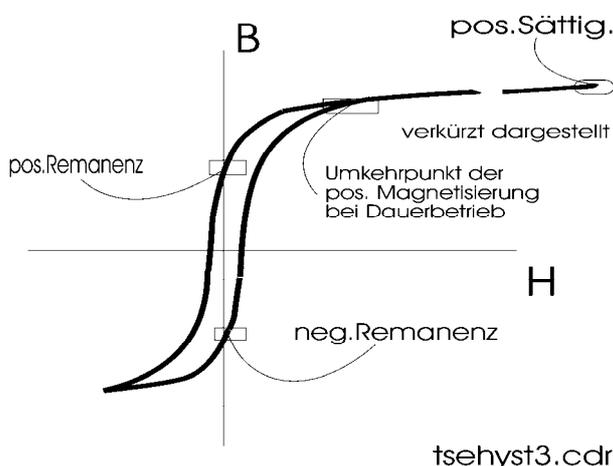
Bild 3.

Hysterese Schleife eines Transformators mit einem Kern der aus wechselseitig geschachtelten Blechen besteht.

Hystereseurve

bei geschachtelten Trafos

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



Im ausgeschalteten Zustand gilt: Die Induktion im stabilen Punkt der Magnetisierung B , dem Remanenzpunkt bei der Feldstärke $= 0$, ist tiefer als die Induktion im Umkehr-(wende) Punkt der Kurve. In Folge der kleinen Luftspalte an den Stoßstellen der Kernbleche und der uneinheitlichen Orientierung der Magnetdomänen in den Blechschenkeln, ist die Hysteresekurve nicht senkrecht stehend orientiert, sondern ist nach rechts geneigt. Dadurch rutschen die Remanenzpunkte auf der senkrechten Achse etwas zur Mitte hin.

Ein geschweißter EI- Transformator mit einem definierten Luftspalt von einigen Zehntel Millimetern hat eine Hysteresekurve die fast um 45 Grad nach rechts geneigt ist. Die Remanenzpunkte liegen dann nahe $B = 0$. Nur diese Transformatoren eignen sich zum Schalten mit scheidelschaltenden Halbleiterrelais. Ein halbe Halbwelle bringt dann die Induktion beim Einschalten nahe an einen Umkehr-(wende) Punkt der Hysteresekurve und es entsteht dann kein großer Einschaltstromstoß. Es ist dann auch egal in welche Richtung eingeschaltet wird, weil die Remanenz nahe Null ist.

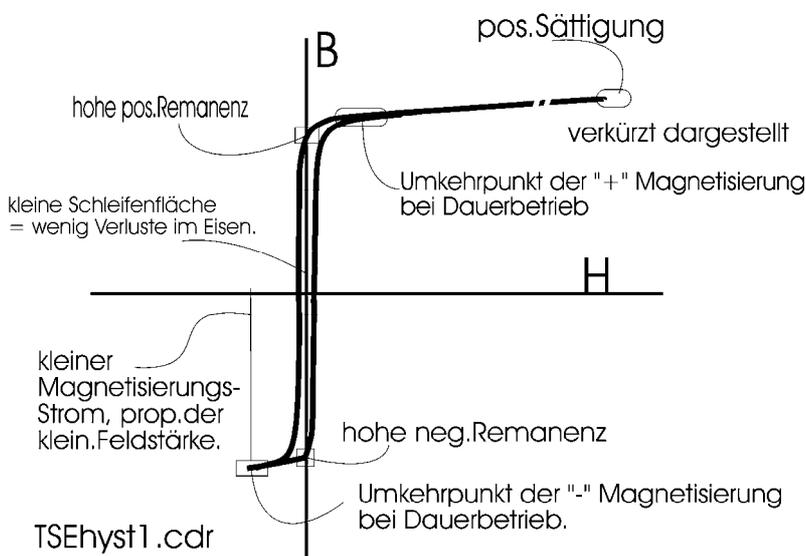
Dagegen haben Ringkerntransformatoren, die sich einer immer größerer Beliebtheit erfreuen, eine Hysteresekurve die senkrecht steht und sehr schmal ist, siehe Bild 4. Der Eisenkern hat keinerlei Luftspalt.

Der Leerlaufstrom und damit die Leerlauf Verluste sind dabei sehr klein. Die Verluste entstehen durch die Ummagnetisierungsarbeit und sind umso kleiner, je geringer die von der Hysteresekurve eingeschlossene Fläche ist. Sie sind um circa Faktor 100 geringer als bei geschweißten Trafos.

Bild 4.

Hysteresekurve

bei Ringkern-Trafos
(Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz



Die Induktion im Remanenzpunkt ist fast genau so groß wie die Induktion im Umkehr-(wende) Punkt der Hysteresekurve.

Die Magnetisierung im Remanenzpunkt bleibt so lange bestehen bis der Trafo erneut eingeschaltet wird. Remanenz bedeutet bleibende Magnetisierung.

Ringkerntrafos sind um bis zu 50 % leichter als EI Trafos und sind auch aus kaufmännischer Sicht, aufgrund der steigenden Preise für Eisen und Kupfer, den zum Beispiel geschweißten Trafos gegenüber immer mehr im Vorteil.

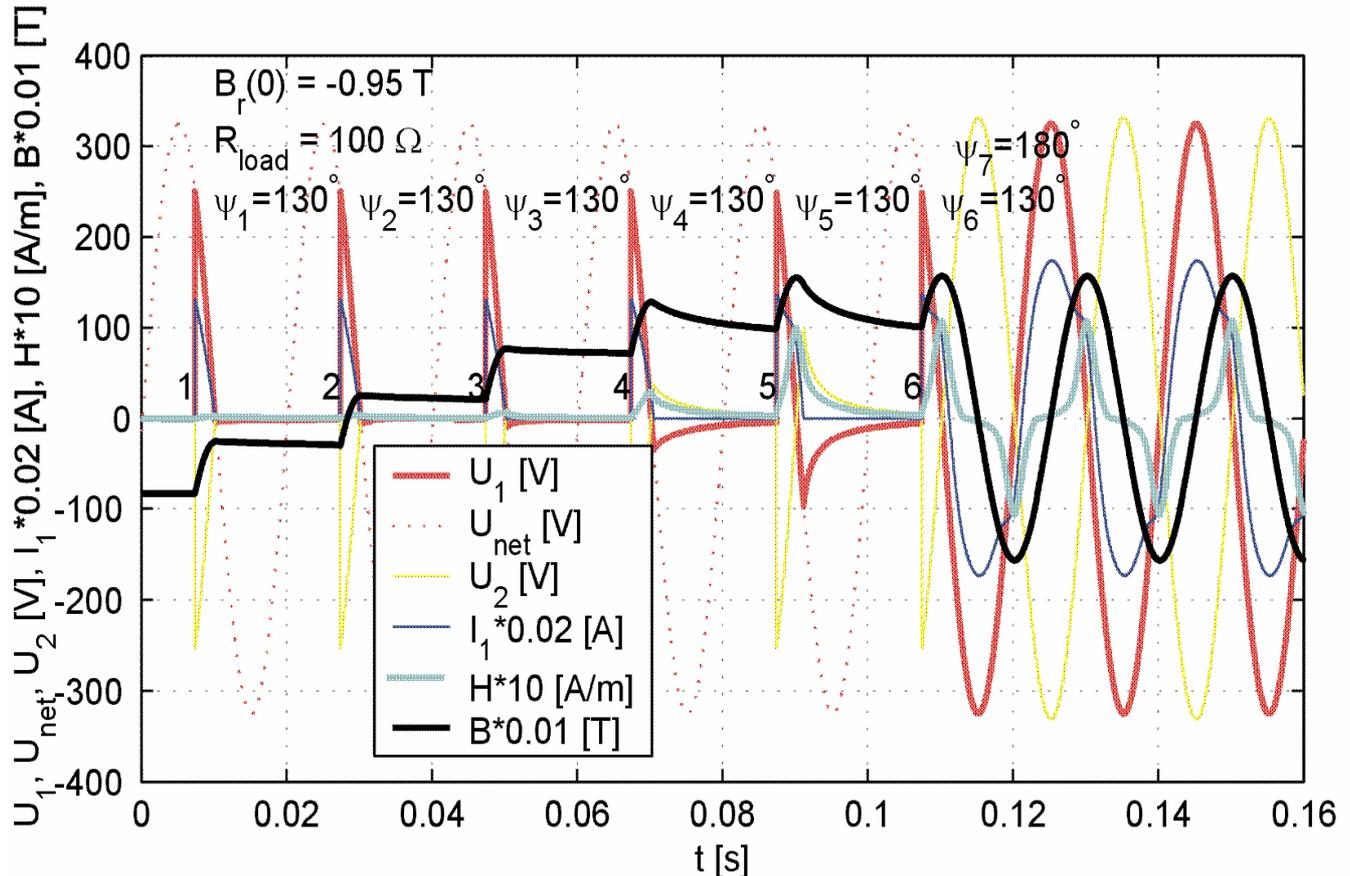
Allerdings haben Ringkerntrafos auch wiederum einen großen Nachteil, den hohen Einschaltstrom, der bis zum 100 fachen des Nennstromes reichen kann.

Mit einem Trafoschaltrelais lässt sich dieser Nachteil jedoch elegant umgehen. Dann hat ein Ringkerntrafo wirklich große Vorteile.

2.) Beschreibung der Transformator Soft Start Prozedur der Trafoschaltrelais von EMEKO und FSM.

Bild 5.)

Demonstriert an einem Trafo mit geschachteltem Kern, siehe Bild 3, mit einer 230V Primär und einer 230V Sekundär-Spule .



Der Startpunkt ist der Remanenzpunkt $B_r(0) = -0,95 \text{ T}$ an einem Trafo mit geschachteltem Kern, (kein Ringkerntrafo.) Das ist der Startpunkt mit der negativen max. Remanenz vor dem Beginn der Soft Start Prozedur, die hier zufällig den Trafo von dem negativen Remanenzpunkt beginnend einschaltet.

Weil der Trafo zuvor am Ende einer negativen Spannungshalbwelle ausgeschaltet wurde, steht seine Remanenz im negativen max. Punkt, eben den $-0,95 \text{ Tesla}$. Die Magnetisierung bleibt dort solange stehen, bis sie durch ein Einschalten wieder von dort wegbewegt wird.

U_{net} ist die Kurve der Netzspannung. Nach dem Punkt 6 ist die Spannung U_1 gleich der Netzspannungskurve U_{net} .

Die Pulse U_1 , Nr. 1-6 sind unipolare Phasen-Anschnitt Pulse mit 130 Grad Anschnitt . Sie transportieren die Induktion, - die mit der schwarzen Linie dargestellt ist-, in Richtung der positiven Remanenz. Nur 5 Pulse werden benötigt um die Magnetisierung von der negativen Remanenz zum positiven Umkehr-(wende) Punkt zu bringen. Dieser Trafo TYP mit einem EI -Kern, hat kleinen Luftspalte im Eisenkern an den Stoßstellen der Blehschenkel und die unterschiedlichen Blehschenkel haben nicht alle eine optimale Orientierung der Magnetdomänen. Deshalb ist hier die Remanenz kleiner als die Induktion im Umkehr-(wende) Punkt. Ein Ringkerntrafo benötigt schmalere Pulse aber dafür mehr in der Zahl, weil er keine Luftspalte hat und deshalb die Hysteresekurve senkrecht steht und eine hohe Remanenz hat. Siehe der Unterschied der Hystereskurven von EI und Ringkerntrafo.

Nach dem Ende des Pulses 5, läuft die Magnetisierung zur maximalen Remanenz zurück. Schon nach dem Ende von Puls 4, und am Ende von Puls 5 und 6, ist die maximal erreichte Induktion höher als die maximale stabile positive Remanenz. Sie ist direkt nach dem Puls 5 und 6 jeweils gleich hoch wie die Induktion im Umkehr-(wende) Punkt.

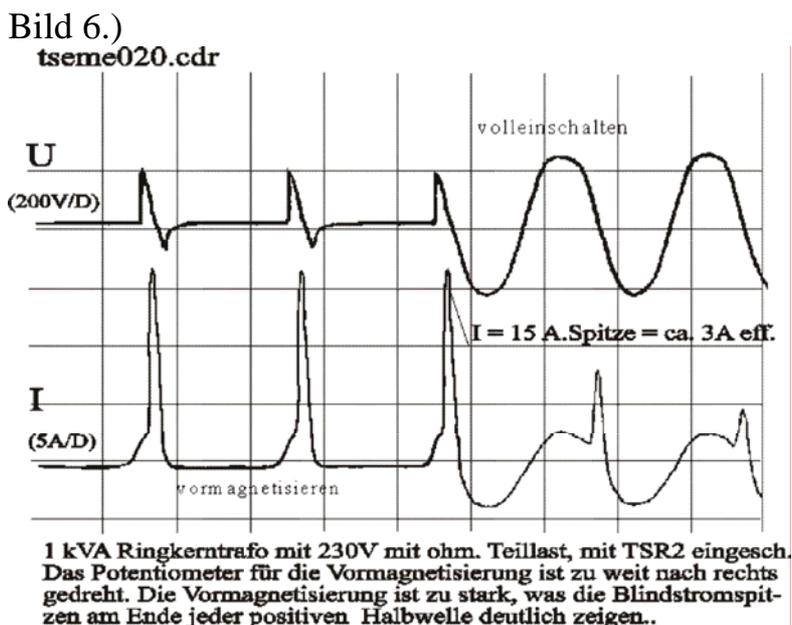
Das ist gut zu sehen am nach unten gehen der schwarzen Linie in der Pausenzeit zwischen den Pulsen 4 und 5 und 5 und 6, bis zum Erreichen des stabilen Remanenzpunktes. Der Remanenzpunkt ist der Schnittpunkt der Hysteresekurve mit der senkrechten Achse bei Feldstärke Null. Die Induktion geht soweit herunter bis sie die Induktion am Beginn des Pulses 5 erreicht hat. Man sieht daraus, daß schon zum Ende des Pulses 4, kurz vor dem Beginn des Pulses 5, die maximale Remanenz erreicht wurde. Der Puls 5 und 6 schadet aber nichts, weil die Remanenz ja nicht mit zusätzlichen Pulsen überschritten werden kann. Lieber mehr Pulse als zu wenig.

Zum Ende des Pulses 6, kommt die Magnetisierung wieder in den pos. Umkehr-(wende) Punkt und anschließend wird voll eingeschaltet, wie an U1 zu sehen ist.

Am Strom I1 ist zu sehen, dass die Magnetisierung für die pos. Umkehr-(wende) Punkte der Dauerlauf-Hysteresekurve leicht überschritten wird. Das ergibt aber nur einen geringen Anstieg des Leerlaufstromes der noch unter dem Laststrom liegt. Die etwas zu starke ist besser als eine zu schwache Vormagnetisierung, bei der der pos. Umkehr-(wende) Punkt nicht erreicht würde und dann beim Volleinschalten aufgrund des Stromflußwinkels von 180 Grad dann zu höheren Stromspitzen führen würde.

Beachte: Der Leerlauf Eingangstrom I1 läuft genau parallel mit der Feldstärke H im Eisen. Er addiert sich zum Eingangswirkstrom. Das Aussehen der Kurvenform von H ist typisch für die Kurvenform des Leerlaufstromes eines EI Transformators. U2 ist die Spannung der Sekundärseite, U2 ist zur besseren Unterscheidung zu U1 um 180 Grad phasenverschoben gezeichnet.

In der Graphik von Bild 6 ist gut zu sehen wie die Vormagnetisierung etwas zu stark eingestellt ist. Die Spannungspulse sind etwas zu breit. Der Transformator Eisenkern geht deshalb am Ende eines jeden Pulses leicht in Sättigung. Der Leerlaufstrom steigt jedes Mal am Ende eines Pulses stark an, liegt aber mit unter 3 A effektiv immer noch unter dem Nennstrom des Trafos.

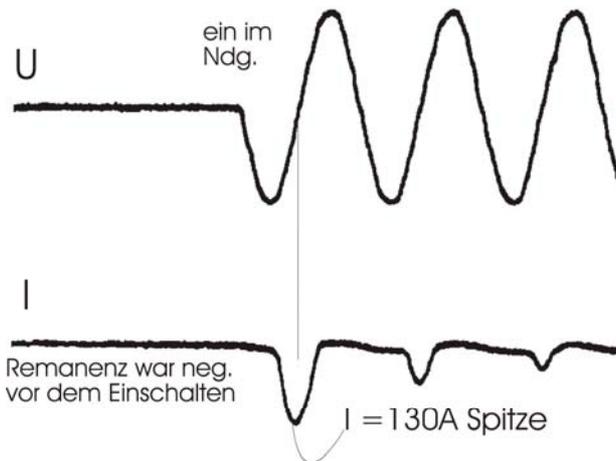


Diese Messkurven in Bild 6 zeigen sehr deutlich wie die Vormagnetisierung wirkt.

3.) Netz Halbwellen- Spannungs- Einbrüche erzeugen an Einphasen- Transformatoren, Eingangs-Stromspitzen. Bei weichen und harten Trafos gibt es dadurch unterschiedliche Auswirkungen.

Messkurven der Wirkung von Spannungseinbrüchen bei unterschiedlichen Transformatoren:

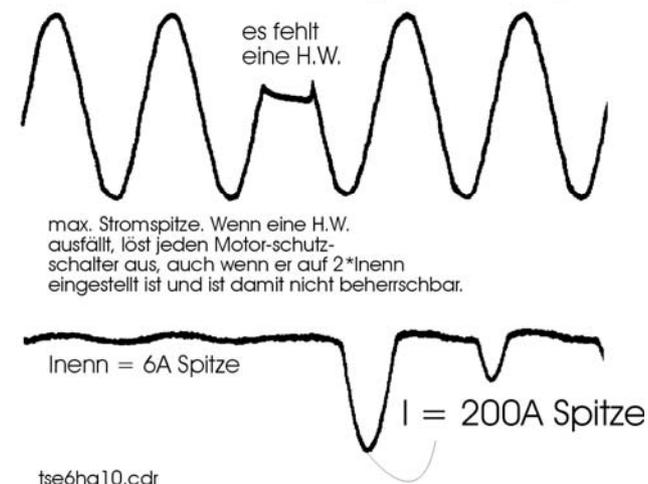
Bild 7.)
größter Einschaltstromstoß an einem
1kVA geschweißten EI-Trafo mit 1kW
belastet. (weicher Trafo)



tse6ha08.cdr

Vor dem Einschalten wie im Bild 7 dargestellt, wurde der Transformator am Ende der negativen Netzspannungshalbwelle ausgeschaltet. Deshalb war die Remanenz auf dem negativen max. Punkt vor dem Einschalten im Bild 7. Das bringt den Trafo in die Sättigung. Das ist der schlechteste Einschaltfall nach einer längeren Pause.

Bild 8.
Halbwellenausfall-Simulation
an einem geschweißten 1kVA EI Trafo
mit 1 kW belastet. (weicher Trafo)



tse6ha10.cdr

Bild 8 zeigt: Der Einschaltstromstoß nach einem Spannungsausfall von 10 msec. ist größer als nach einer längeren Pause wie in Bild 7. Die Differenz der Stromspitzen Höhe ist 70A.

In der kurzen Pause von 10 msec. läuft die Remanenz nicht auf den stabilen Wert, sondern bleibt auf einem höheren Wert stehen und führt dann durch die neue gleichpolige Einschaltung zu einem höheren Stromstoß.

Messkurven der Wirkung von Spannungseinbrüchen bei unterschiedlichen Transformatoren:

Bild 9.)

größter Einschaltstromstoß an einem 1,6kVA optimierten EI Trafo mit 1kW belastet

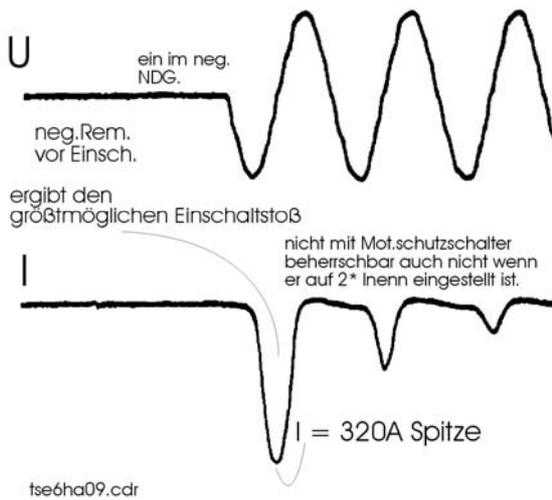
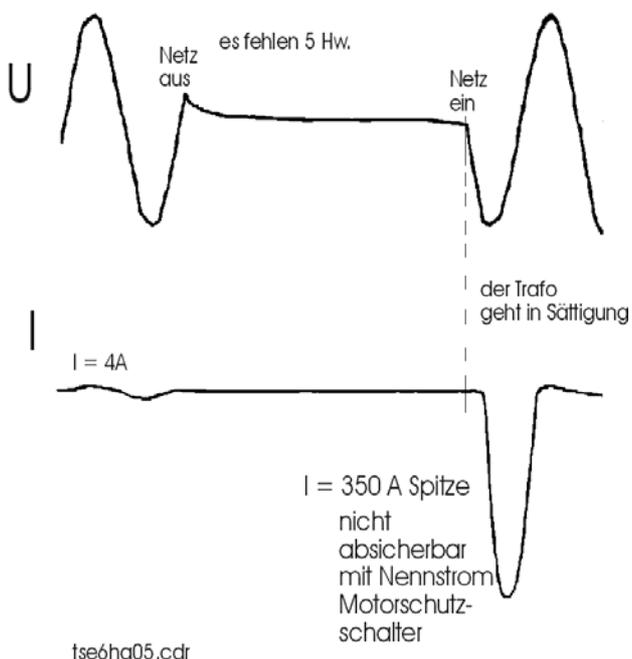


Bild 10.)

Halbwellenausfall-Simulation an einem 1,6 kVA optimierten, geschachtelten Trafo mit 1kW belastet



Zwischen Bild 9 und 10 besteht nur noch ein Unterschied von 30 A peak. Der Remanenzpunkt nach dem Ausschalten mit langer Pause ist fast derselbe wie nach einem Halbwellenausfall. Siehe die Hystereseurve bei einem Ringkerntrafo in Bild 4. Beim Einschalten im schlechtesten Fall nach einer Pause und beim Halbwellenausfall entstehen fast die gleichen Stromstöße, die allerdings aufgrund der geringeren Kupferverluste des optimierten Trafos auch größer sind als beim weichen EI-Trafo mit geschweißtem Kern.

Messkurven der Wirkung von Spannungseinbrüchen bei einem Ringkerntrafo.

Bild 11.)

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

Prüfgerät: IRST0, Inrush-Stimulator, Zuleitung mit 10m mit 16qmm an Hauptvert. und insges. 2m mit 6qmm zu IRST und Prüfling.

Einschaltverfahren: Ende pos. H.W.ausgesch. u.sofort mit 0,5 der l.neg. Halbwellen eingesch.

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

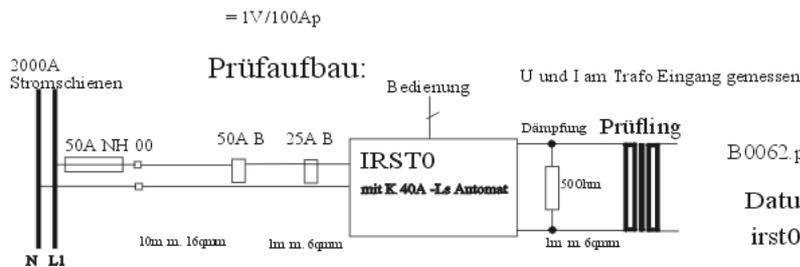
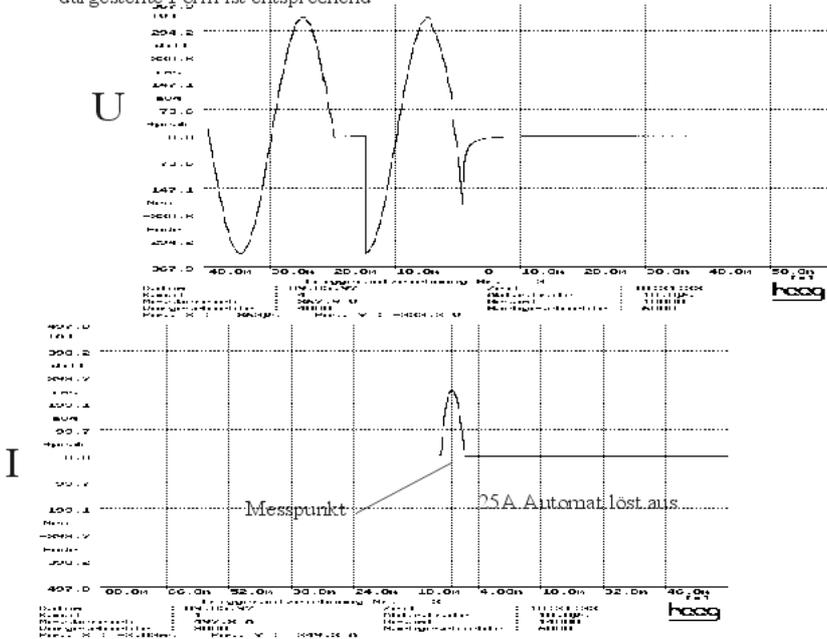
Leerlaufstrom: 0,5Aeff Netzspannung: 234V

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

Modalitäten: an 230V Wicklung des Prüflings angeklemt.

Meßergebnis des max. Einschaltstromstoßes: 250 Apeak

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



B0062.pcx u. B0063.pcx

Datum: 09.05.1997

irst0052.cdr

Der Halbwelleneinbruch von ca. 5 msec ist ein realistischer Wert wie er in Stromnetzen vorkommen kann.

Manchmal lösen Sicherungen aus und man nicht weshalb. Das könnte der Grund sein.

Mit diesem Halbwellenausfall von 10 msec. werden Geräte nach der EN 61000-4-11 geprüft.

Messkurven der Wirkung von Spannungseinbrüchen bei einem Ringkerntrafo.

Bild 12.)

Einschaltstromstoß-Test verschiedener Trafos im Leerlauf.

Prüfgerät: IRST0, Inrush-Stimulator, Zuleitung mit 10m mit 16qmm an Hauptvert. und insges. 2m mit 6qmm zu IRST und Prüfling.

Einschaltverfahren: schlechtester Netzausfall Typ

Trafotyp: 1,5kVA Ringkern Trafo Lieferant: Induktor

Leerlaufstrom: 0,1Aeff Netzspannung: 234V

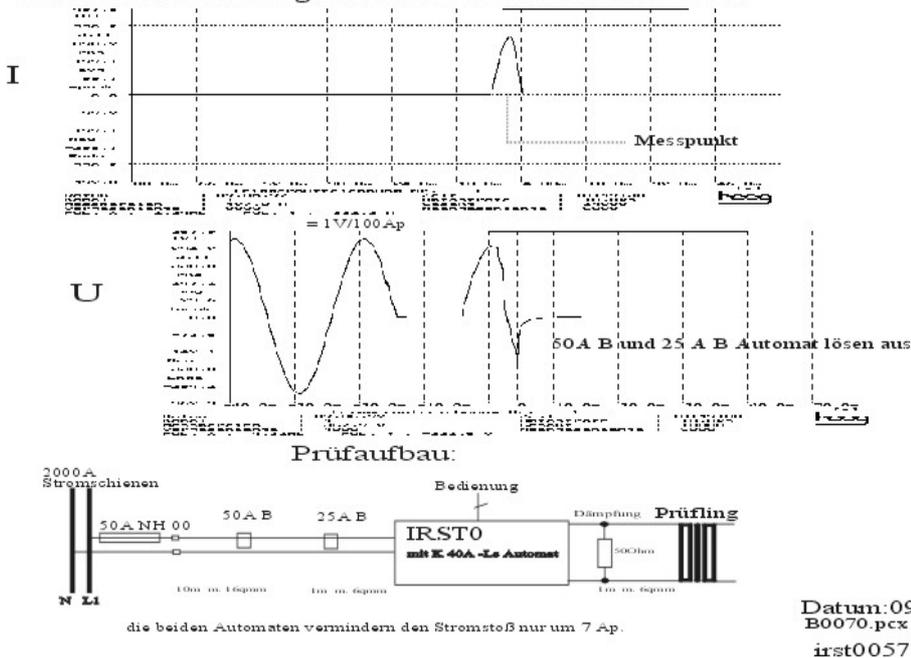
ges. Netzimpedanz: ca. 0,3 Ohm incl. Absicherung von:

50A NH 00, + 50A B, + 25 A B Automaten

Modalitäten: an 230V Wicklung des Prüflings angeschlossen.

Meßergebnis des max. Einschaltstromstoßes: 332 Apeak,

der 25A Automat begrenzt den Strom nicht zusätzlich



Dieser gravierende Stromstoß wird vom Trafo verursacht wenn er einer Netzspannung ausgesetzt wird, die eine Lücke von einer Halben Vollwelle hat.

Die folgende Prüfnorm untersucht genau das.

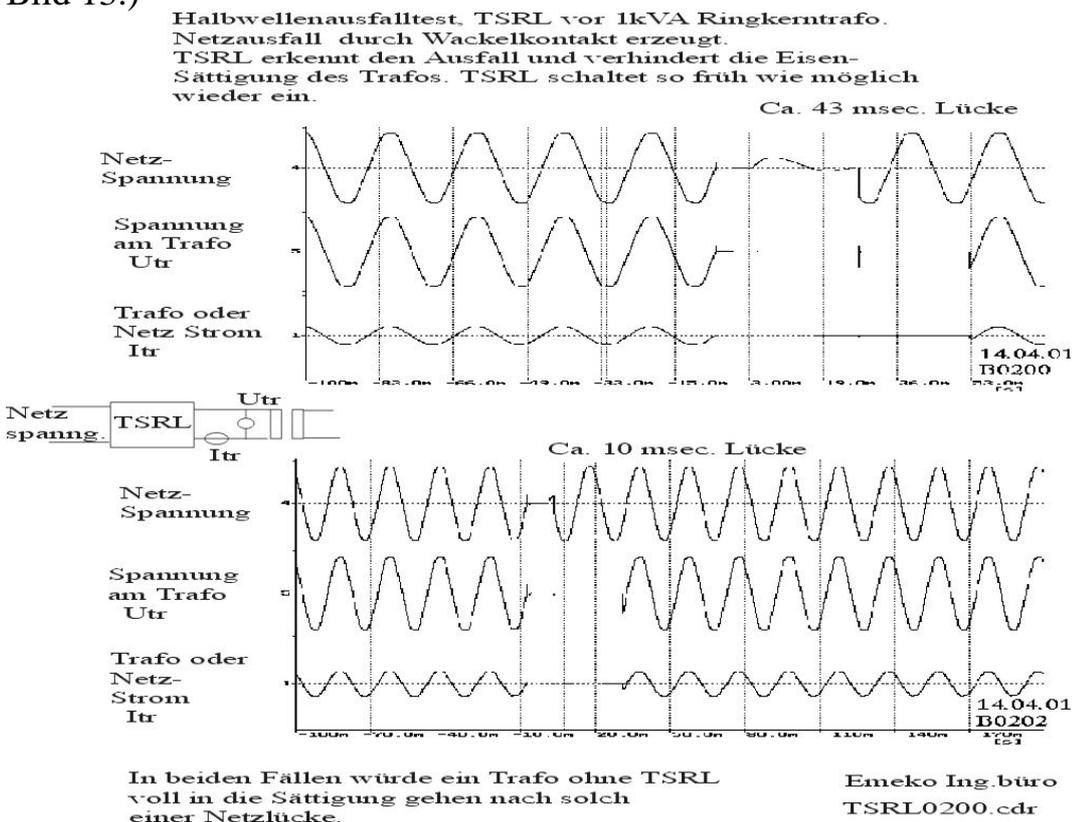
EN 61000-4-11, 4. 3 **voltage dip** : (definition used for the purpose of this standard). For a single phase voltage of period T, there is a voltage dip if the rms value calculated with a time window (duration multiple of T/2) is lower than 90 percent of the declared voltage. It starts at the beginning of the first window and ends at the end of the last window which verifies the previous condition.

Das ist für einen Trafo der schlechteste Einschaltfall, der eine auf den Nennstrom bemessene Sicherung in jedem Fall auslöst.

4.) Vermeidung dieser Stromspitzen durch die Spannungseinbrüche, wenn ein Trafoschaltrelais, TSRL, vor den Transformator geschaltet ist.

Vermeiden kann man das mit dem TSRL der die Option hat: mit Halbwellenausfallerkennung. Das TSRL erkennt den Spannungseinbruch, schaltet sofort aus, berechnet den richtigen Einschaltzeitpunkt und schaltet dann entweder mit seiner Softstart- Prozedur zu oder wie in diesem hier gezeigten Bild 13 zu dem frühest-möglichen Zeitpunkt voll ein. Die Sicherung bleibt heil weil kein Einschaltstromstoß entsteht.

Bild 13.)



Die Dauer der Spannungslücke am Trafo dauert ungefähr 20 msec. länger als die Netzlücke ist, weil das TSRL die richtige Einschaltposition abwarten muß.

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.

Konsequenzen aus dem Verhalten von Trafos nach Spannungseinbrüchen:

- Weich ausgelegte Trafos bringen keine Vorteile was die Stromstöße nach Halbwellenausfällen angeht.
- Dann kann man gleich die Stromsparenden und verlustminimierten Trafos wie zum Beispiel Ringkerntrafos einsetzen.
- Weil diese zusammen mit einem TSRL überhaupt keine Stromspitzen erzeugen.
- Weder bei ersten Einschalten nach einer Pause noch bei Halbwellenausfällen.

Emeko Ing. Büro

33

Der beste und verlustärmste Trafo kann ein Ringkerntrafo sein.

Er hat die geringsten Eisenverluste, den kleinsten Leerlaufstrom, das kleinste Gewicht, kann die geringsten Kupferverluste haben, wenn der Einschaltstrom vermieden wird.

Ohne TSRL ist der Einschaltstrom bis zum 100 fachen des Nennstromes. Mit TSRL ist er gleich dem Leerlauf- oder nennstrom.

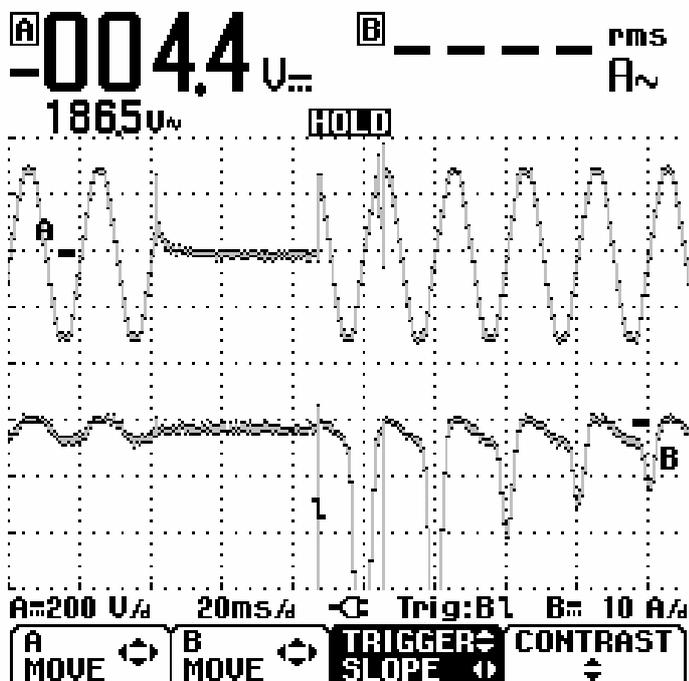
Emeko Ing. Büro

34

Ein weiteres Vorurteil gegenüber Ringkerntrafos besteht durch die Möglichkeit von losen Windungen, die bei den großen Magnet- Kräften durch den Einschaltstrom zu Windungsschlüssen führen können. Auch dieser Nachteil wird mit dem TSRL beseitigt. Dann muß der Trafo nicht unbedingt Vakuum- vergossen werden.

5.) Im Bild 14 ist zu sehen wie ein Trafo reagiert wenn er zufällig erzeugte Halbwellenausfälle aushalten muß. Die Ausfälle wurden durch wackeln am Steckkontakt erzeugt. Es ist hier kein TSRL vor den Trafo geschaltet gewesen.

Bild 14.)



shwat001.fvf, schneller Halbwellenausfalltest, gemessen v. EMEKO Ing. Büro. an 0,8kVA EI Trafo mit Ohmscher Last, indem Netzsteckerwackler erzeugt wurde. A = U an Trafo prim, B= I in Trafo prim. getriggert auf I peak

Die zufällig erzeugten Halbwellenausfälle bringen den Trafo nach der Netzwiederkehr in Sättigung und erzeugen Stromspitzen, welche die Absicherung auslösen können.

Im Bild 15 ist zu sehen wie ein Trafo reagiert wenn er zufällig erzeugte Halbwellenausfälle aushalten muß. Die Ausfälle wurden durch wackeln am Steckkontakt erzeugt. Es ist hier kein TSRL vor den Trafo geschaltet gewesen.

Bild 15.)



Im Bild 15 ist zu sehen, daß nicht immer Stromspitzen entstehen müssen, wenn die Netzhalbwellen ausfallen. Hier ist die Netzwiederkehr zufällig zu einem solchen Zeitpunkt erfolgt, dass der Trafo nicht in Sättigung gelangt ist.

Nach dem Ausfall der Netzspannung blieb die Remanenz im Eisen fast auf dem pos. max. Punkt stehen. Fast weil es keine ganze pos. Halbwellen war die zuletzt am Trafo angelegt war. Durch die Spannungswiederkehr zum Ende einer pos. Netzhalbwelle, wird die Induktion gerade vom pos. Remanenzpunkt zum pos. Umkehr-(wende) Punkt gefahren, wie bei dem normalen Dauerlauf. Es entsteht deshalb keinerlei Überfahren der Hysteresekurve und deshalb auch keine Sättigung im Eisen. Mit diesem Gutfall darf jedoch die Testprozedur nicht allein durchgeführt werden.

Transformatoren in medizinischen Geräten müssen entsprechend EN 61000-4-11, getestet werden. Unter anderem mit Halbwelleneinbrüchen um 90 % für die Dauer einer halben Vollwelle. Start Punkt bei Beginn einer Halbwellen. Siehe die Bilder 8, 12 und 13. Dabei kommen eben zwei gleichpolige Netzhalbwellen hintereinander auf den Trafo was unweigerlich die Sicherung auslöst, wenn der Trafo nicht extra weich ist und dafür ausgelegt ist. Er hat dann jedoch fast das 3 fache Gewicht gegenüber einem Ringkerntrafo mit einem TSRL.

Aus diesem Grund setzen immer mehr Gerätehersteller von Medizin Geräten die TSRL zusammen mit Leichtgewichtigen Ringkerntrafos ein. Mit dem TSRL wird die Prüfung nach EN 61000-4-11 ohne Fehler bestanden.