Wie funktioniert ein Transformator?

Wie geht Trafo-Einschaltstrom vermeiden?

Vortrag über Transformator- Grundlagen Sanfteinschalten und mehr.

Was ist ein Transformator-Einschaltstrom?

Die Erklärung was die Ursache des Einschaltstroms ist, erfordert ein physikalisches Verständnis darüber was im Trafo geschieht.

Was passiert im Trafo: a.) im Dauerbetrieb,
b.) beim Ausschalten,
c.) beim Einschalten.

Diese Beschreibung erfolgt im ersten Teil des Vortrags.

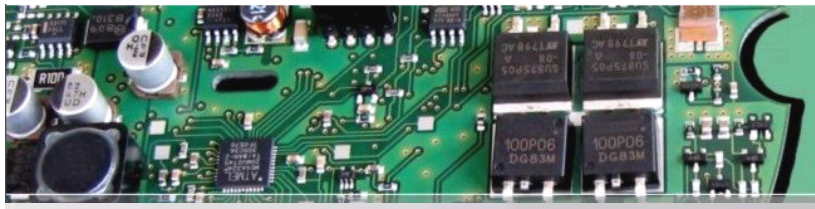
Die anschauliche Beschreibung der Physik im Trafo, erfolgt im zweiten Teil des Vortrags ab Seite 55.

Transformatoren verursachen hohe Einschalt-Stromspitzen

Fast jeder kennt das!

Gleich beim Einschalten eines Transformators brennt manchmal die Trafo-Sicherung durch. (Manchmal auch die B16A Sicherung in der Unterverteilung.)

(Die Sicherung im Bild war mit 0,8A schon doppelt so groß als sie für den Trafo mit 0,4A eigentlich zulässig war.)



Besonders Ringkerntrafos müssen wegen dem hohen Einschaltstrom **übersichert** werden.

absich-v-rktr-ohn.cdr

230V Primärspannung

Ohne Einschaltstrombegrenzung

Trafo-Typ	Leistung VA	strom Pr. A	Inrush A peak	B-Char. A	C-Char. A	Automaten K-Char. A	Schmelz-Sicherung 5 * 20 mm A	A	Bereich A	PKZM- Bereich A	PKZM-T Einstellg. A	PKZM-T
Ring-Kern	500	2.17	300	-	50	40	-	-	/	10 - 16	10	
Ring-Kern	800	3.48	350	-	63	50	-	-	/	16 - 2	16	
Ring-Kern	1000	4.35	400	-	-	50	-	-	/	20 - 20	20	
Ring-Kern	1250	5.43	500	-	-	63	-	-	/	-	-	
Ring-Kern	1600	6.96	600	-	-	-	-	-	/	-	-	
Ring-Kern	2000	8.70	800	-	-	-	-	-	/	-	-	
Ring-Kern	2500	10.87	1000	-	-	-	-	-	/	-	-	

Ein 1kVA Trafo muss mit einem 20A PKZM-T, also 5 Mal zu groß abgesichert werden.

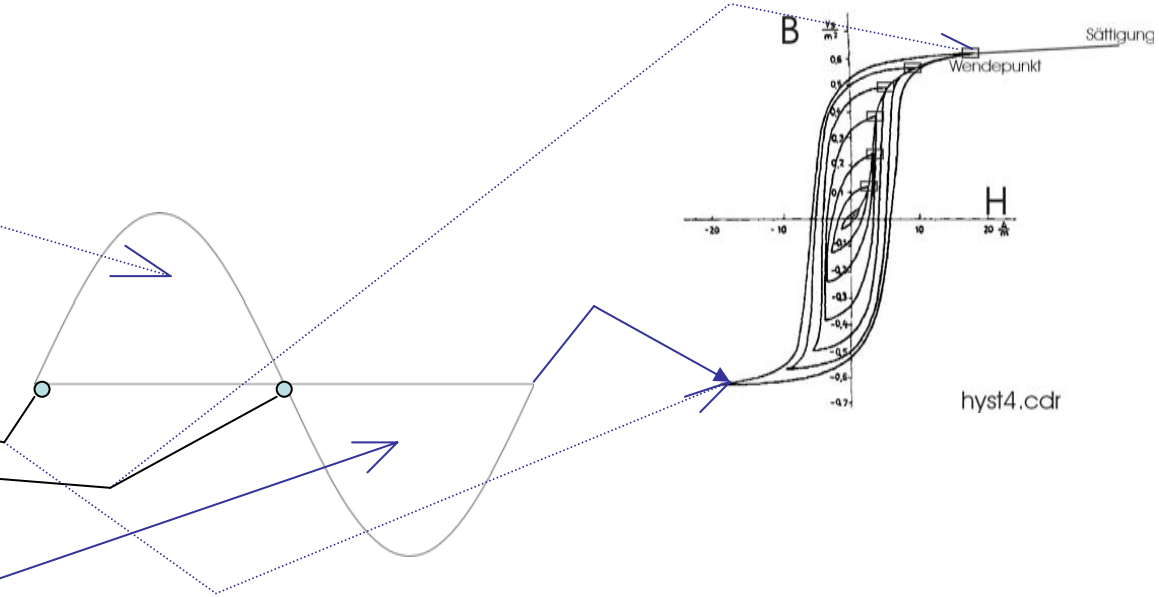
Es ergeben sich ohne die Vermeidung des Einschaltstromes unsinnige Absicherungswerte und ab 1600VA Trafogröße ist mit den oben bezeichneten Elementen gar keine Absicherung mehr möglich.

Was im Trafo-Eisenkern passiert-1 : Im Dauerbetrieb.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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

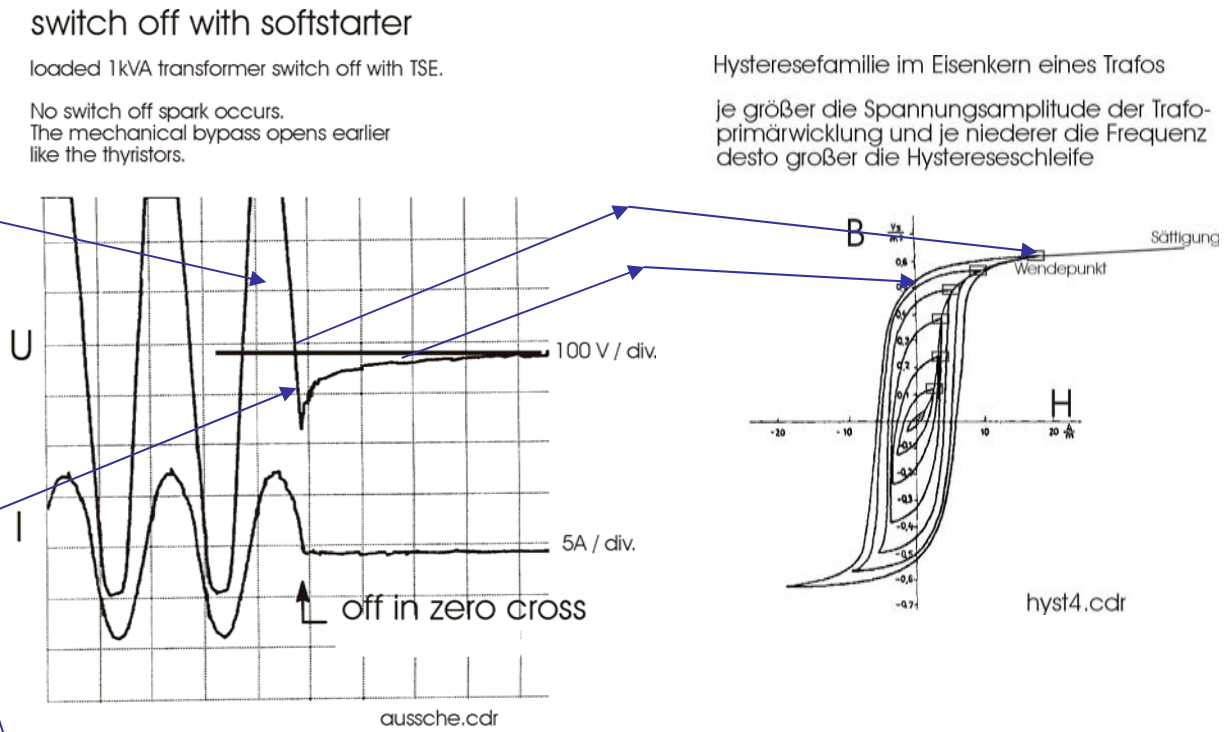
- **Im Dauerbetrieb gilt:**
- Die positive Spannungs-halbwelle transportiert die Magnetisierung B, vom negativen zum positiven Umkehrpunkt, der Hysterese-kurve.
- Die negative Spannungshalb-welle bringt B wieder zurück.
- Und so weiter.



Nur die **Spannungszeitfläche ist maßgebend**.
Mit der Spannungszeitfläche einer ganzen Spannungs-Vollwelle, läuft die Magnetisierung B, einmal um die Hysteresekurve um 360 Grad herum. Der Magnetisierungs-Strom ist nur die Antwort des Trafos auf die Wirkung der Spannungszeitflächen. Ein Ringkerntrafo und ein EI-Kerntrafo mit je 1kVA Größe für 230V, bekommen beide die gleiche Spannungszeitfläche, antworten jedoch mit völlig unterschiedlicher Leerlaufstromamplituden und Verlauf, siehe die Folien weiter unten.
–Man kann die Magnetisierung trotzdem über den Strom betrachten, das ist aber viel umständlicher.

Was im Trafo-Eisenkern passiert-2 : Beim Ausschalten.

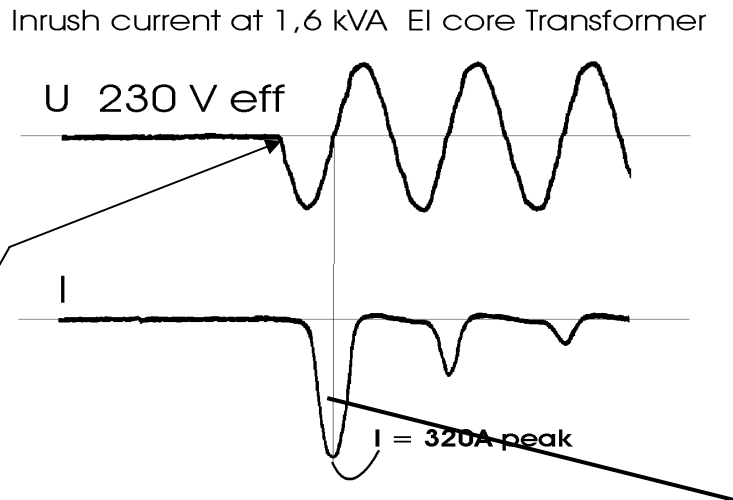
- **Beim Ausschalten zum Ende der pos. U-Halbwelle gilt:**
- Die positive Spannungs-halbwelle transportiert die Magnetisierung B, vom negativen zum positiven Wendepunkt der Hysterese- Kurve.
- Der negative Spannungszipfel
- bringt das B zur pos. max. Remanenz.
- Danach steht B stabil für sehr lange Zeit im pos. max. Remanenzpunkt.

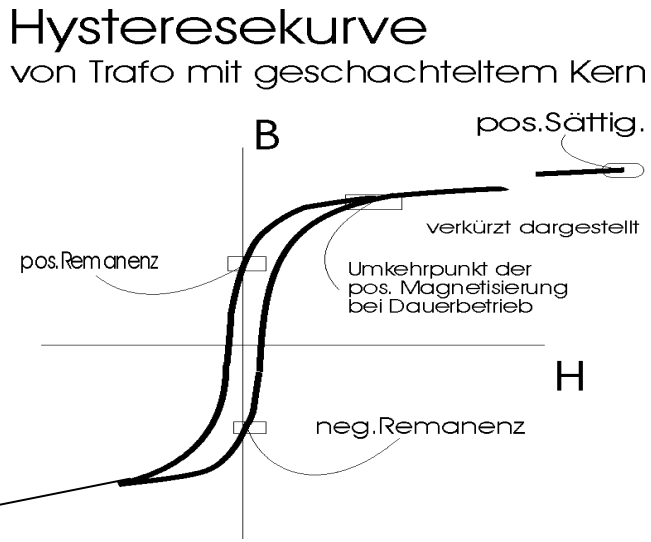


Die Betrachtung per **Spannungszeitfläche hilft es die Physik im Trafo leichter zu verstehen.**

Man kann so auch argumentieren: Durch den Blindstrom, (Magnetisierungsstrom), der den Thyristor erst nach dem NDG der Spannung sperren lässt, entsteht der neg. Spannungszipfel.

Ursache des Einschaltstroms, eine einfache Erklärung-1.





neg. Sättigung am Ende der neg. Spann.halbwelle

- **Vorgeschichte:** Ausgeschaltet wurde zuvor zum Ende einer negativen Spannungshalbwelle. (Im Gegensatz zum vorigen Beispiel auf Folie 5!) Das setzte die Remanenz auf den negativen max. Remanenz-Punkt. Die dort sehr lange verbleibt. Siehe der Versuch zur Remanenz am Ende des Vortrags.

  Eingeschaltet wird dann zum Beginn der negativen Spannungshalbwelle, (Im Bild links oben, die obere Kurve.) Nun wird die Magnetisierung vom neg. Remanenz Punkt aus, auf der Hyst. Kurve, weiter nach neg. Bmax. in die neg. Sättigung getrieben. **Das ist der schlechteste Einschalt-Fall**. Der Trafo hat seinen induktiven Widerstand verloren. Dasselbe gilt natürlich auch für die Positive Richtung von Remanenz und Spannung.

Ursache des Einschaltstroms, eine einfache Erklärung-2.

- Das Eisen geht in die negative Sättigung, wenn es durch eine Spannungshalbwelle **nicht ummagnetisiert**, sondern über die Sättigungsgrenze weiter aufmagnetisiert wird. Von der hohen max. neg. Remanenz aus kann das Eisen dann kaum noch höher magnetisiert werden, zum Ende der Hyst. Kurve.

  Die Remanenz ist das magnetische Gedächtnis des Trafoeisenkernes, das lange erhalten bleibt. Siehe die Folie 60 zum Versuch mit der Remanenz im Physik-Teil des Vortrags weiter unten.)
- Wäre der Trafo von der neg. Rem. aus zum Beginn der pos. Halbwelle eingeschaltet worden, dann wäre nur eine kleiner Einschaltstromstoß entstanden, weil dann der Kern von der negativen Remanenz ausgehend, weitgehend um-magnetisiert worden wäre durch die Spannungshalbwelle. (Darauf kann man sich aber nicht verlassen zum Einschalten, auch wenn man definiert immer im Nulldurchgang einschaltet, denn die Remanenz lässt sich von außen nicht direkt messen.)

- Anders ausgedrückt: Weil sich das Magnetfeld im Fall der Eisenkernsättigung nicht mehr ändert, wird auch keine Gegen – EMK mehr in den Spulen erzeugt und dann wirkt nur noch der sehr kleine Kupferwiderstand der Primärwicklung als Lastwiderstand für die Netzspannung und der Strom wird dann sehr groß bis zum Ende der treibenden Spannungshalbwelle.

Die Ursache für den Transformator-Einschaltstrom-3.

- Deshalb fließt dann bei der Sättigung des Eisenkernes vom Trafo, so ein großer Strom!
- Im Fall der Kernsättigung, ist der Kupferwiderstand der Primärwicklung zusammen mit dem Netzinnenwiderstand, der einzige strom- begrenzende Widerstand im Stromkreis. Der induktive Trafowiderstand ist im Einschalt-Moment in diesem worst case abhanden gekommen.
- Der Einschaltstrom kann dann auf Werte bis zum 50-100 fachen des Trafo-Nennstromes ansteigen, wenn Ringkerntrafos verwendet werden.
- Während des Einschaltstromstosses scheint das Eisen im Trafo wie nicht vorhanden zu sein, da seine Magnetisierung im Fall der Sättigung nicht mehr durch die „**Netzspannungszeitfläche**“ geändert werden kann. Damit fehlt der induktive Widerstand.

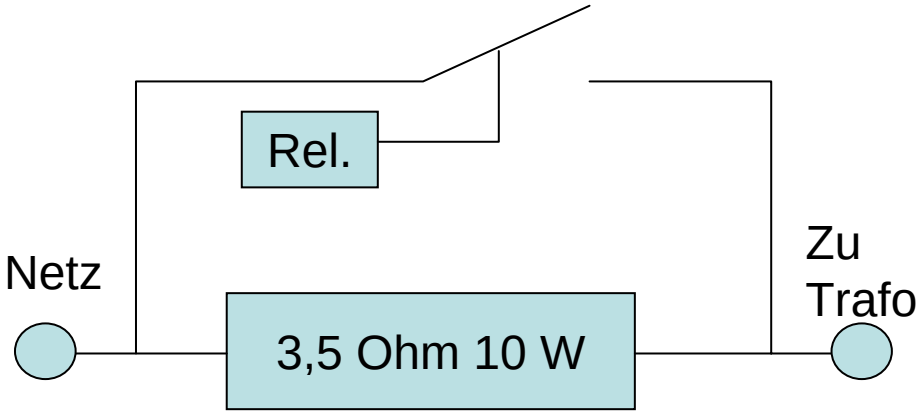
- Je Verlustarmer der Trafo gebaut ist, desto größer ist sein Einschaltstrom.

- (Die Netzimpedanz ist ungefähr 0,3 Ohm bei 230V für 16-32 Ampere Netze, der Trafo-Widerstand ist ca. 0,3 Ohm bei einem 1,6 kVA Trafo, + Zuleitungswiderstand von 0,4 Ohm.)
  Das ergibt eine max. Stromspitze von ca. 325Apeak, die ca. 3-6 msec. dauert. Dabei werden die meisten Sicherungen ausgelöst.

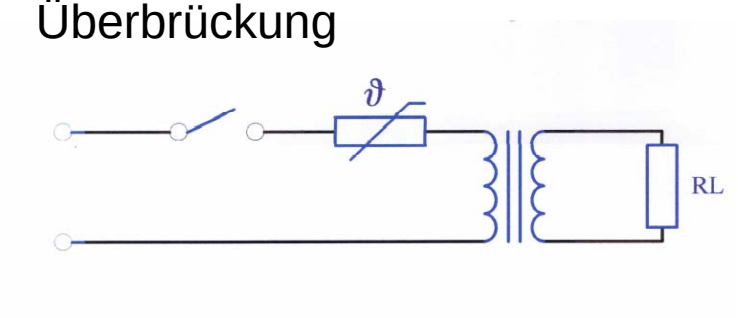
Klassische Varianten der Ein-Schaltstrom-Begrenzung, ESB

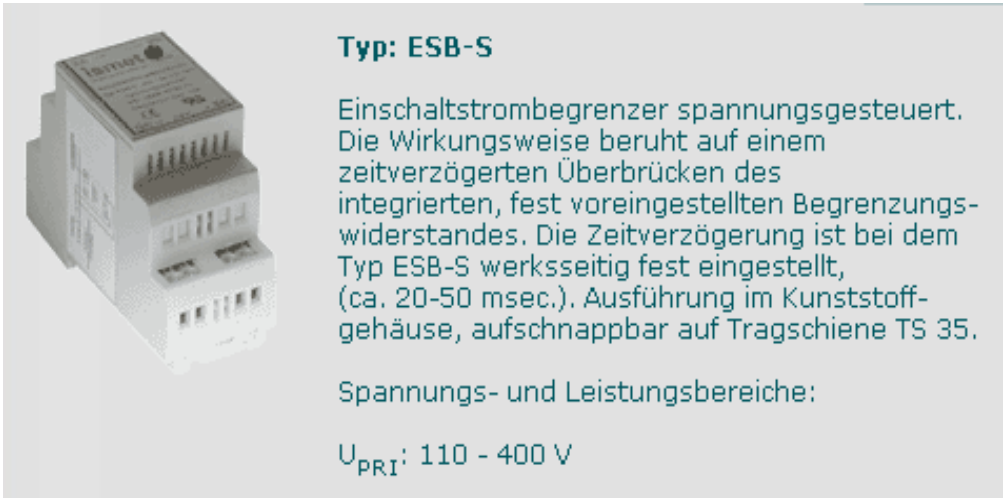
Man fügt kurzzeitig einen zusätzlichen Widerstand in die Trafozuleitung.

➔ESB mit fixem Vorwiderstand und Überbrückung.
Wenn die Netzspannung kommt zieht das Relais nach kurzer Verzögerung an.



➔ ESB mit einem Heißleiter, mit oder ohne Überbrückung





Typ: ESB-S

Einschaltstrombegrenzer spannungsgesteuert. Die Wirkungsweise beruht auf einem zeitverzögerten Überbrücken des integrierten, fest voreingestellten Begrenzungs-widerstandes. Die Zeitverzögerung ist bei dem Typ ESB-S werksseitig fest eingestellt, (ca. 20-50 msec.). Ausführung im Kunststoff-gehäuse, aufschnappbar auf Tragschiene TS 35.

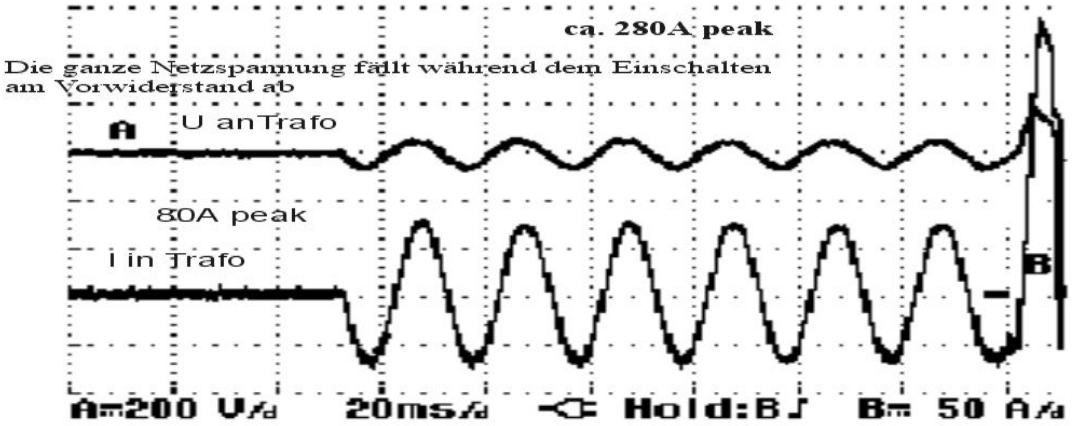
Spannungs- und Leistungsbereiche:

U_{PRI}: 110 - 400 V

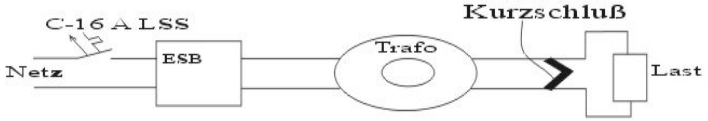
Ein herkömmlicher ESB mit Relaisbrücke schaltet auf einen Kurzschluss ein!

Transformatoren schalten. Mit ESB

2 kVA Ringkerntrafo mit Sekundärem Kurzschluß eingeschaltet mit üblichem Einschaltstrombegrenzer, für 230V 16A. Abgesichert mit 16A C-Typ Leitungsschutzschalter, der erst auslöst, wenn das Relais im Einschaltstrombegrenzer den 3,5 Ohm Widerstand brückt..



Das Relais im Einschaltstrombegrenzer wurde bei diesem Schaltversuch beschädigt. Der zusätzlich vorgeschaltete C16A Automat hat nach dem Brücken mit ausgelöst. Das Relais im Einschaltstrombegrenzer hat beim nächsten Einschaltversuch den Widerstand nicht mehr gebrückt, worauf dieser verbrannt ist.

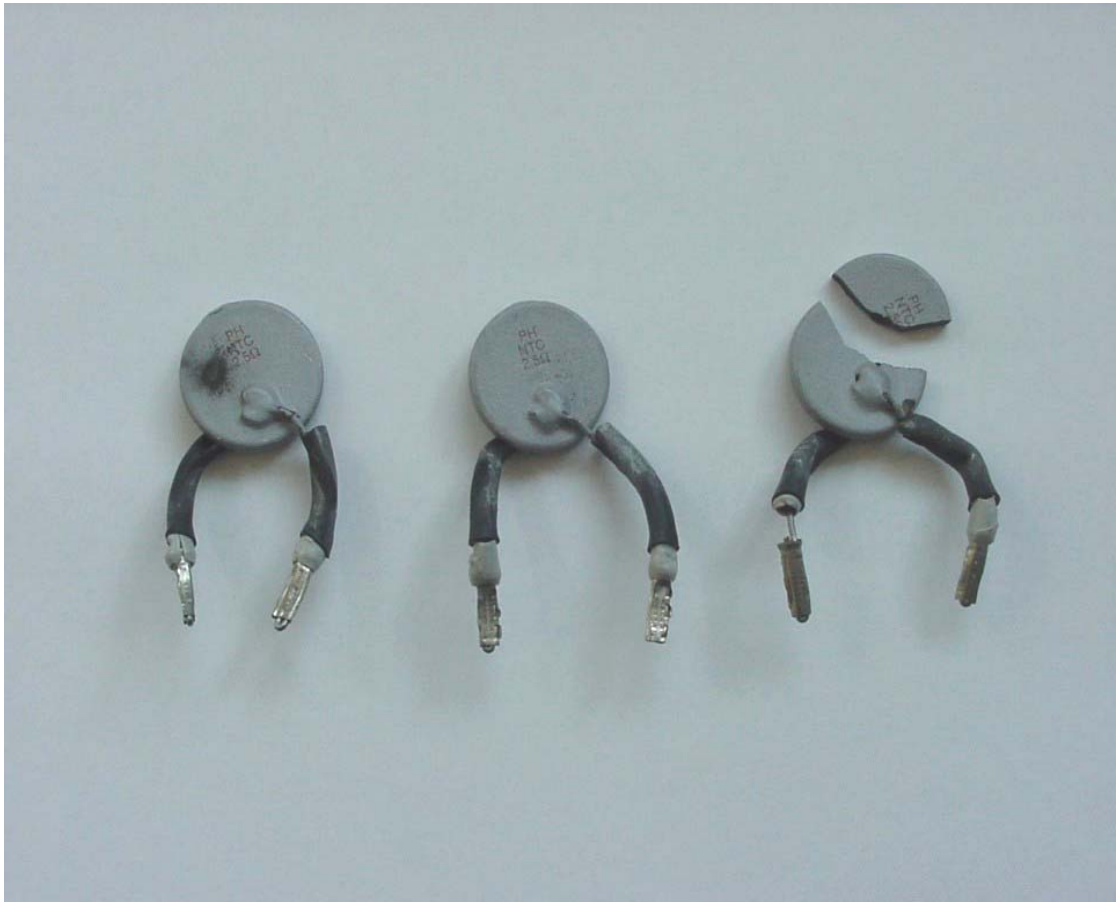


EMEKO, esbkzschl.cdr,

ESB-auf-kurzschl1.cdr

- Kurve oben, Spannung am Trafo.
- Kurve unten, Strom in den Trafo.
- Vor dem Überbrücken fallen ca. 12kW am 10W Widerstand ab. Nach dem Überbrücken entsteht ein hoher Strom von fast 300A Spitze.
- Der Begrenzer kann beim nächsten einschalten den Strom nicht mehr begrenzen, weil der überhitzte und deshalb zerbrochene Widerstand im ersten Moment keine Spannung an den Trafo legt und beim Brücken des Widerstandes der Original-Einschaltstrom entsteht.

NTC- Widerstände werden am meisten als ESB benutzt.



Diese NTC Widerstände sind im Betrieb permanent heiß und damit niederohmig.
So geht es billig aber schlecht.
Die meisten Trafos werden trotzdem damit eingeschaltet.

Das Bild zeigt durch Über-Stromspitzen defekte NTC Widerstände .

Das geschieht wenn die Wartezeit zum abkühlen nicht eingehalten und zu früh neu eingeschaltet wird oder auch bei Kurzschlüssen.

Nachteile von Einschaltstrombegrenzern mit Vorwiderstand

Probleme entstehen wenn ESB´s auf eine Überlast oder einen Kurzschluss einschalten.
Der Widerstand überhitzt sich dann, weil dann kurzzeitig die ganze Netzspannung an ihm abfällt. Er unterbricht dann seine Widerstandsbahn und oder beschädigt durch die entstehende Hitze die Elektronik oder das Überbrückrelais.
Einschaltstrombegrenzer sind deshalb alle nicht kurzschlussfest.

Im Nennbetrieb:

ESB´s können im Normalbetrieb erst nach mindestens 1 Minute Wartezeit erneut einschalten.
(Wegen der nötigen Abkühlung des Widerstandes).

Bei Überlast begrenzen sie den zweiten Einschaltstrom, der dann beim Brücken des Vorwiderstandes entsteht, nicht. Die Sicherung löst dann trotzdem aus.

ESB´s mit NTC: Beim Wiederholten Schalten ist der NTC niederohmig und kann den Strom nicht mehr begrenzen. (In der Vergangenheit sind deshalb viele Anwender auf das TSRL gekommen. Jeden Monat ca. 5 Stück.)

ESB´s können überhaupt nicht auf so genannte „Voltage Dips“, kurze Spannungsunterbrechungen, reagieren.
(Weil das Brückrelais nicht schnell genug abfällt oder der NTC Widerstand noch heiß ist oder weil manche ESB´S das absichtlich so steuern, wenn die Spannung nach der Lücke wiederkommt.) Für Medizingeräte ist die EMV-Prüfung mit Voltage Dip´s Pflicht. Nur mit einem TSRL kann derzeit die Prüfung von Geräten mit Ringkerntrafos bestanden werden. Die Wirkung von Voltage Dips wird später erklärt.

Zusammenfassung der Nachteile von ESB´s.

- Es gibt Grenzen für Einschaltstrombegrenzer. Diese sind:

- Öfteres Schalten nacheinander verboten.
- Einschalten mit Überlast, verboten.
- Einschalten auf einen Kurzschluss, verboten.
- Kurzzeitunterbrechungen der Netzspannung. (Voltage Dips.) Verboten.
- Wenn ein Trafo auf Nennstrom und flink abgesichert werden muß. Nicht möglich.
- Lebensdauer von größer 20.000 Einschaltungen gefordert. Nicht möglich.
- Wenn eine definierte Ein- und Ausschaltschwelle mit Netz-Spannungs-Hysterese eines Steuertrafos gefordert wird, zum Schutz vor Schützankerflattern. Nicht möglich.

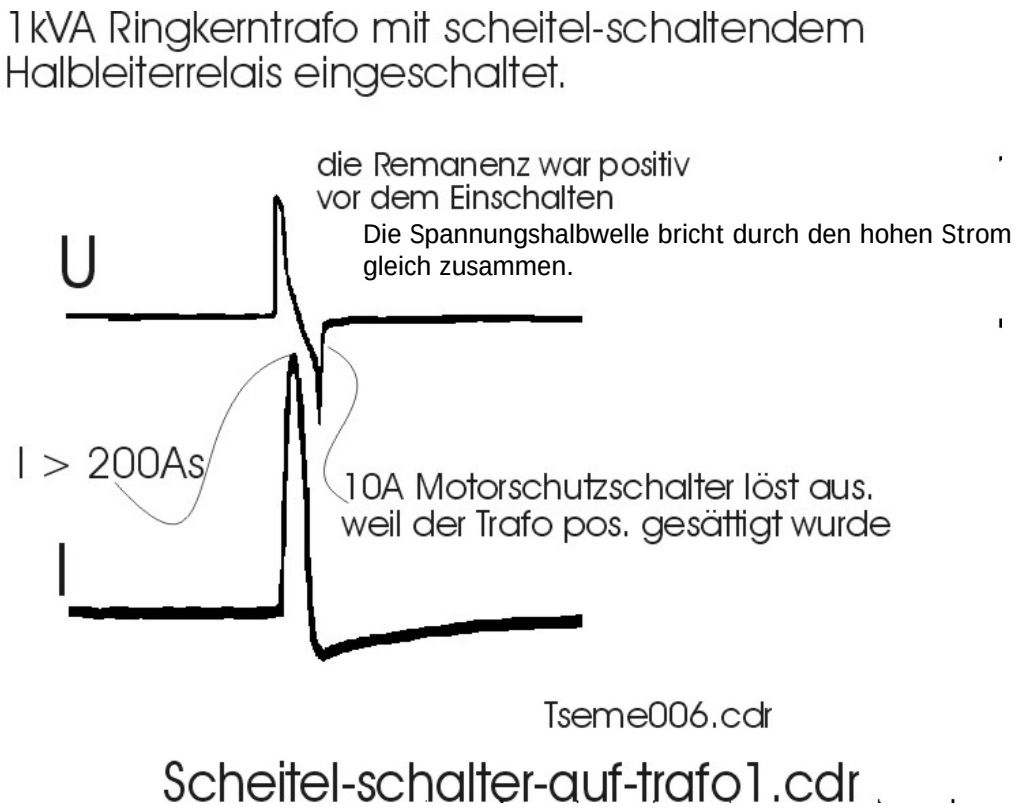
Scheitelschalter gelten in der Literatur als der Königsweg.

- In den Scripten von Hochschulen, in den meisten Lehrbüchern im deutschen und englischen Sprachraum, usw. wird das Einschalten eines Trafos im Scheitel der Netzspannung immer noch als das beste Mittel bezeichnet, um Einschaltstromstöße zu vermeiden.
- Leider gilt das nur für Trafos mit großen Luftspalten im Eisenkern, die aber nur in Sonderbereichen wie Mikrowellenherden und Schweißgeräten vorkommen.
- Einige Hersteller von Halbleiterrelais haben in der Vergangenheit solche Scheitelschalter hergestellt. Manche haben deren Produktion aber inzwischen wieder eingestellt.
- Soll ein Trafo einen hohen Wirkungsgrad haben und leicht sein im Gewicht, dann muß der Luftspalt sehr klein oder besser gar nicht vorhanden sein, wie zum Beispiel beim Ringkerntrafo.
- Wie sich ein Ringkerntrafo verhält wenn er im Scheitel der Spannungshalbwelle eingeschaltet wird, ist auf der nächsten Folie zu sehen.

Wenn ein Scheitelschalter-Halbleiterrelais einen 1kVA Ringkerntrafo einschaltet fließen 200A peak.

Als abschreckendes Beispiel diese Folie hier.

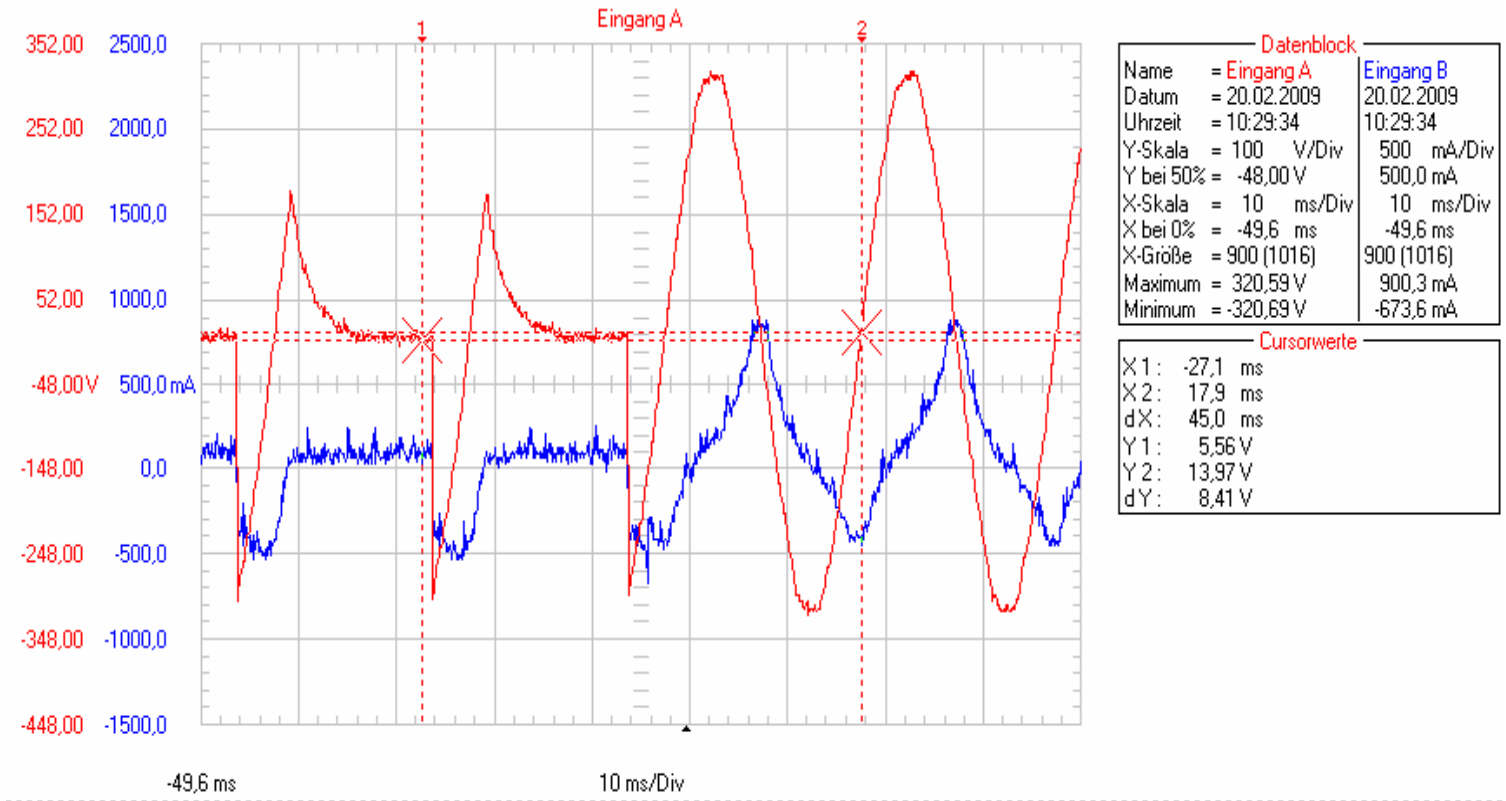
- Trotzdem werben Hersteller von Halbleiterrelais für Scheitelschalter, die *„gut seien“* zum Schalten von Transformatoren.
- Auch in der Fach-Literatur steht noch immer, dass das Scheitel-Einschalten für Trafos am besten sei.
- Leider haben das viele Hochschulen noch so in den Lehrplänen und Laborübungen stehen.
- Das Einschalten im Scheitel ist zwar besser als das Einschalten im Spannungsnulldurchgang, Taugt aber trotzdem nicht für Trafos mit hoher Remanenz.
- Die bisher darauf aufmerksam gemachten Hochschulen weigerten sich bisher das einzugestehen.



Das TSR wirkt anders als die üblichen Einschaltstrom- Begrenzer.

- Ein Trafo-Schalt-Relais, TSR, begrenzt die Einschaltströme nicht nur,
- **es vermeidet sie durch vormagnetisieren** und ein die Physik berücksichtigendes, richtiges Einschalten.
- Um genau zu verstehen wie das funktioniert sind vorher noch einige grundlegende Dinge zu erklären. Das wird hier und im zweiten Teil des Vortrags gezeigt.
- Im Folgenden wird hier zunächst gezeigt wie das TSR einschaltet, wo das TSR eingesetzt wird und welche Vorteile man dabei hat.

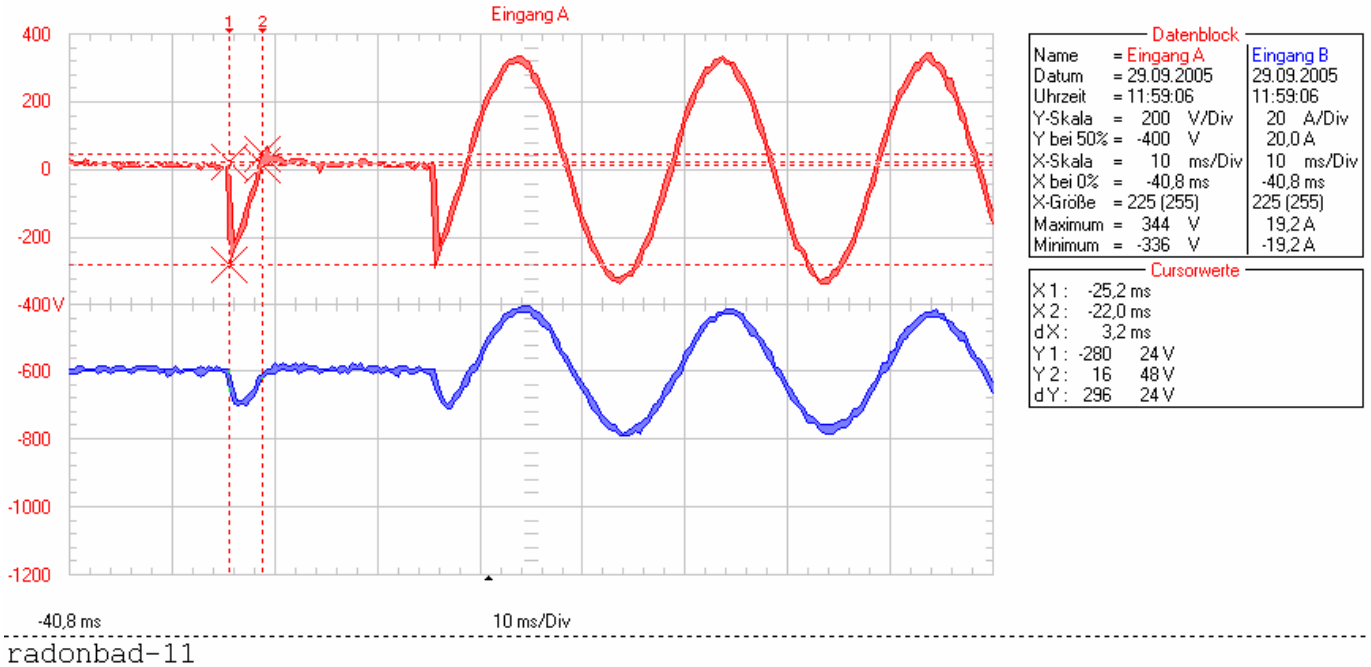
TSRL Einschaltverhalten nur mit dem Leerlaufstrom an 1kVA EI-Kerntrafo.



TSRL-EI-1kVA-einschaltenimleerl-14.bmp

- Rote Kurve: Spannung am Trafo. Blaue Kurve: Strom in den Trafo. Skalenfaktor der Strommessung ist 0,5 A / div. (Kästchen). (Es fließt nach dem Volleinschalten gleich der Leerlaufstrom, typische spitze Form.)
- Kann man den Trafo noch besser einschalten als nur mit dem Leerlaufstrom??

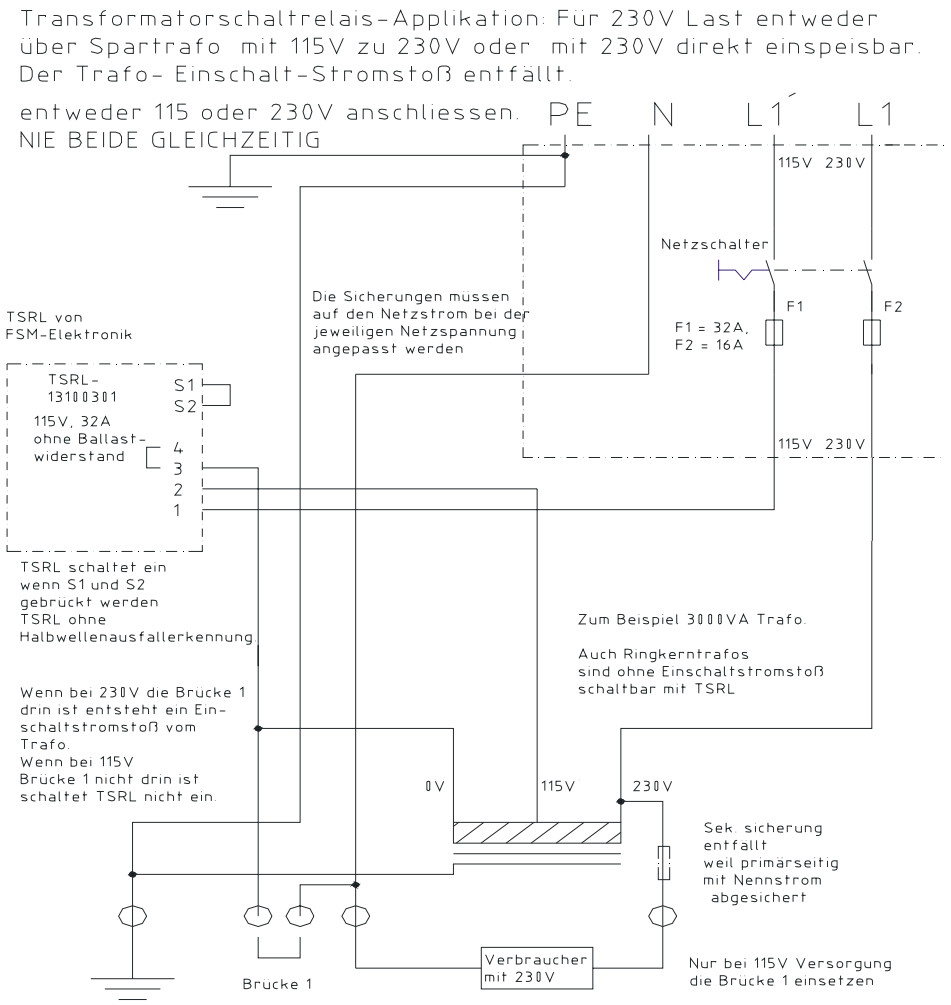
TSRL Einschaltverhalten an einem 5kVA EI-Kerntrafo mit Nennlast.



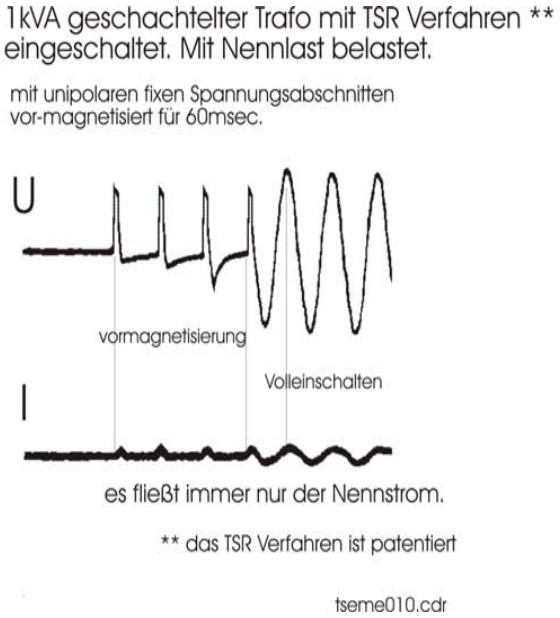
- Rote Kurve: Spannung am Trafo. Blaue Kurve: Strom. Skalenfaktor der Strommessung ist 20A pro div. (Kästchen).
- Keine Blindstrom-Einschaltstromspitzen sind zu sehen, nur Wirkstrom.
- Kein Unterschied im Einschaltverhalten bezüglich Stromspitzen zwischen Leerlauf und Nennlast bei gleicher Einstellung der Zipfelbreite, die hier 3,2 msec. beträgt.

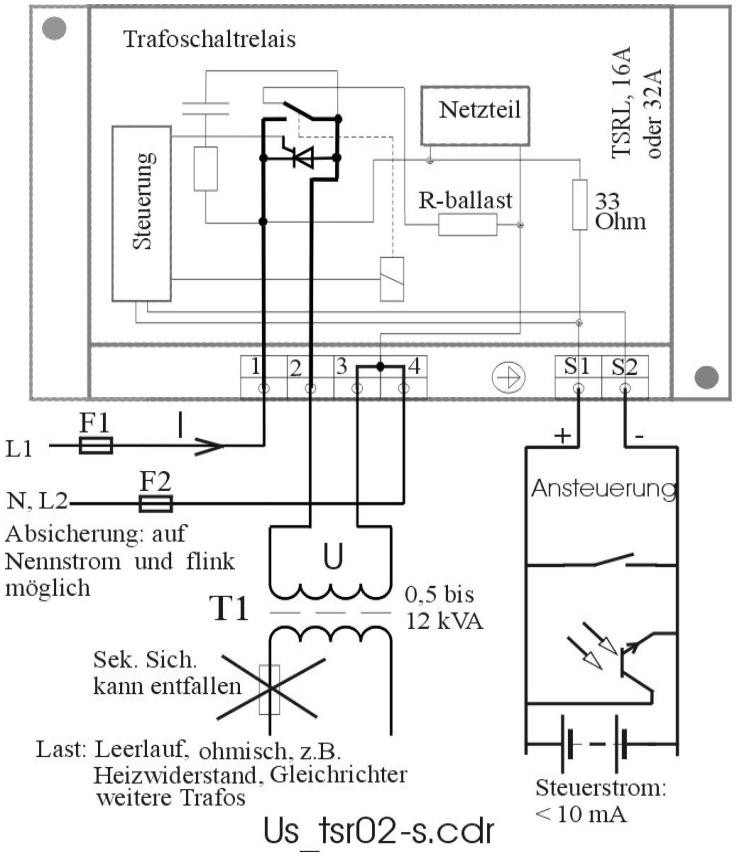
Eine von „ca. 1000“ verschiedenen Anwendungen von TSRL für Trafos.

- Für eine Exportmaschine eines Kunden verbleibt der Anpasstrafo für 115V zu 230V immer in der Maschine.
- Mit einer „Brücke 1“ auf zwei Klemmen, in Verbindung mit den Anschlüssen für 115 oder 230V, wird seine Funktion ein oder ausgeschaltet.
- Das Trafoschaltrelais erlaubt es die Absicherung des Trafos auf den Nennstrom auszulegen und vermeidet das Auslösen des Gebäudeseitigen Sicherungselementes beim End-Kunden.



Das Trafoschaltrelais, Funktion und Schema.

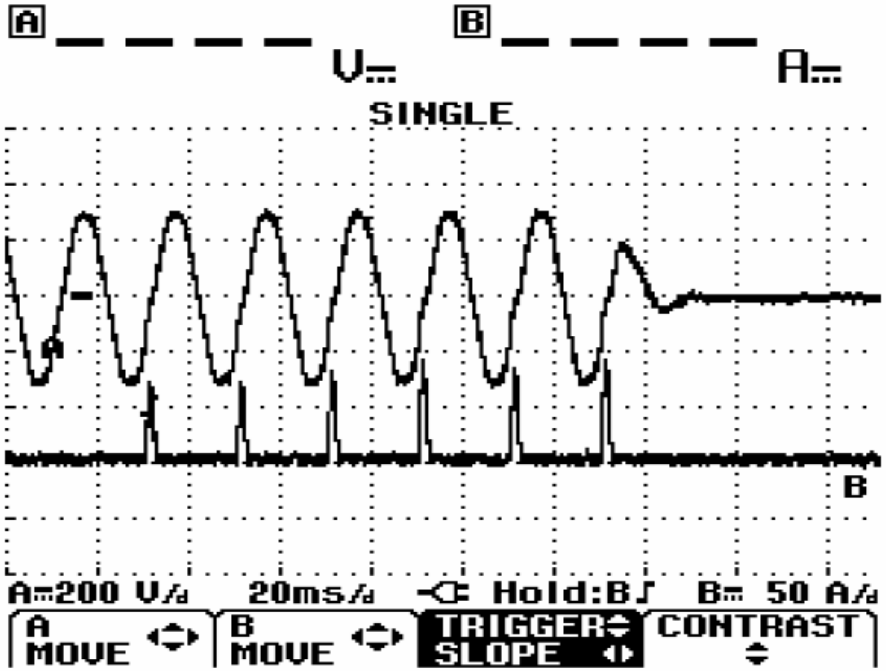




Das TSRL, als Überbrücktes Halbleiterrelais, Nach EN60947-4-3, schaltet ohne Vorwiderstand last **un**-abhängig sanft ein. Die Vormagnetisierung „transportiert“ mittels definierten und kleinen **Spannungszeitflächen** die Magnetisierung an die richtige Stelle zum Volleinschalten und schaltet dann den T1 voll ein.

Das TSRL ist unter normalen* Bedingungen kurzschlussfest-1.

- Hier wurde ein kurzgeschlossener 2kVA Ringkerntrafo mit dem TSRL eingeschaltet. (Der Trafo war am Ausgang kurzgeschlossen.)
- Oben die Spannung nach der Absicherung, die auslöst.
- Unten der Strom in den Trafo hinein.
- Der R10A LS Automat löste schon bei den Vormagnetisierzipfeln aus.
- Der Thyristor kann 500A für 10 msec. und nimmt bei den nur 80A hohen und nur 2 msec. breiten Spitzen natürlich keinen Schaden.
- Wenn eine höhere Absicherung bei der Vormagnetisierung noch nicht auslöst, dann löst sie sicher beim Volleinschalten aus, siehe die nächste Folie.
- * Normale Bedingungen sind der Betrieb an 230V oder 400V Netzen für bis zu 32A mit entsprechenden Kabelquerschnitten und Absicherungen.

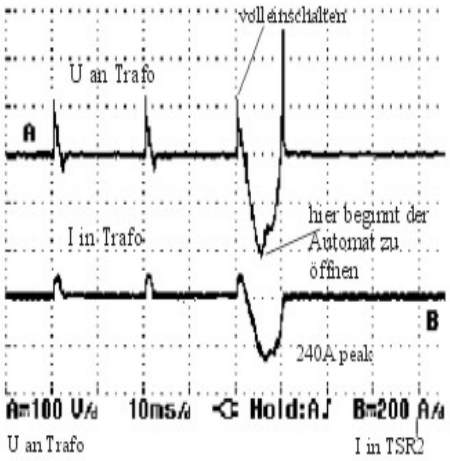


2kVA Rktr.mit sek Kurzschluß einge-
schaltet. I in Trafo 80A peak, (Ausl
ösg. bei 60A peak.) mit R10A B-Typ
Leitungssch.sch. abgesichert,
schon beim vormagn.ausgelöst. A= U
nach Sicherung.
17.11.98 Emeko
Ing.Büro D79114 Freiburg
tsf103.fvf

Das TSRL ist unter normalen Bedingungen kurzschlussfest-2.

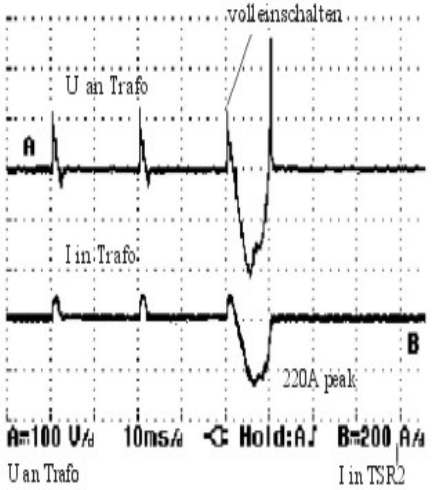
Einschalten von kurzgeschlossenem Rigkerntrafo mit dem TSR

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.



Mit B 16A LSS abgesichert

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.



Mit B 10A LSS abgesichert

- Beim Vormagnetisieren hat der B- 10A LSS noch nicht ausgelöst.
- Zum Volleinschalten überbrückt das Relais den Thyristor.
- Der Thyristor kann 500 A für 10 msec. aushalten, sieht hier aber nur 80A für 2msec.,
- Das Relais kann dabei 500A für 10msec. aushalten, sieht hier aber nur 240A.
- **Anmerkung:**
  Ein B 10A Leitungs-Schutzschalter ist nicht selektiv zu einem C 16A Leitungsschutzschalter.
- Ein B10 LSS ist aber selektiv zu einer vorgeschalteten 25A- gL Sicherung, wenn der K-Strom kleiner als 1kA ist. (Das heißt bei einem Kurzschluss mit Ik < 1kA löst nur der B10A LSS aus und eine 25AgL Sicherung löst nicht aus.
- Das bedeutet, dass dann z.B. eine 25AgL Sicherung vor einem 6kVA bis 10 KVA med. IT-Trafo in Zukunft genügt, wenn ein TSR verwendet wird.

Ist das TSR zum Beispiel beim Einschalten von Medizin IT-Netztrafos durch Kurzschlüsse gefährdet? Ist die Sicherungs- Selektivität der sekundärseitigen Sicherung zur Vorsicherung erreichbar?

- Wenn eine 25A gL Schmelzsicherung oder auch eine 50A gL Sicherung vor das Kabel gesetzt ist, was zum TSR führt und das TSR den IT- Netz- Trafo einschaltet und im OP ein Kurzschluss nach der Netzsteckdose besteht, ist das TSR nicht gefährdet, weil das Kabel nach dem Trafo mit einem B10A LSS abgesichert ist.
- Beispiel: Die Leitungen nach dem Trafo sind kurzschlussfest verlegt und sind nach dem Trafo mit B10A Automaten abgesichert. Der Einphasen - Trafo hat 400V zu 230V und 10kVA. Der Kurzschlussstrom ist nicht höher als 500A peak in den Leitungen nach dem Trafo weil die Steckdose und die Kabel den Strom begrenzen.
- Nach dem was auf den Folien zuvor dargestellt ist, wird das TSR nicht gefährdet, weil seine Schaltelemente das aushalten.
- Die 20AgL oder 25AgL oder erst Recht die 50AgL Sicherung löst dabei nicht aus, weil der B 10A Automat spätestens nach einer Halbwelle den Stromfluss unterbricht und dabei nicht mehr als 400A fliessen. Er beginnt schon nach 5 msec. zu öffnen und begrenzt dadurch sogar den Strom im Scheitel. Siehe auch die folgende Tabelle der Fa. Schupa.
- Die Selektivität ist damit eingehalten. Es löst nur der B10 A Automat aus.

Selektivitäts-Übersicht.

Von Fa. Schupa.
Strom-Selektivität im Kurzschlussfall zu vorgeschalteten Schmelzsicherungen gL/gg.
Angaben in kA bis zum Nennschaltvermögen des Leitungsschutzschalters wenn der 6kA abschalten kann.

Für gL/gl Sicherung mit:	20A	25A	35A	50A
Darf der Kurzschlussstrom max. sein.				
Für B10A LSS :	**0,4kA**	**1kA**	**1,5kA**	**3kA**
Für B16A LSS :	**----**	**0,6kA**	**1,5kA**	**2,5kA**

Bis zur angegebenen Kurzschluss- Stromstärke besteht im Kurzschlussfall Selektivität zur vorgeschalteten Schmelzsicherung.
In Netz- Stromkreisen nach Steckdosen werden meist nicht mehr als 0,4 kA im Kurzschlussfall erreicht.

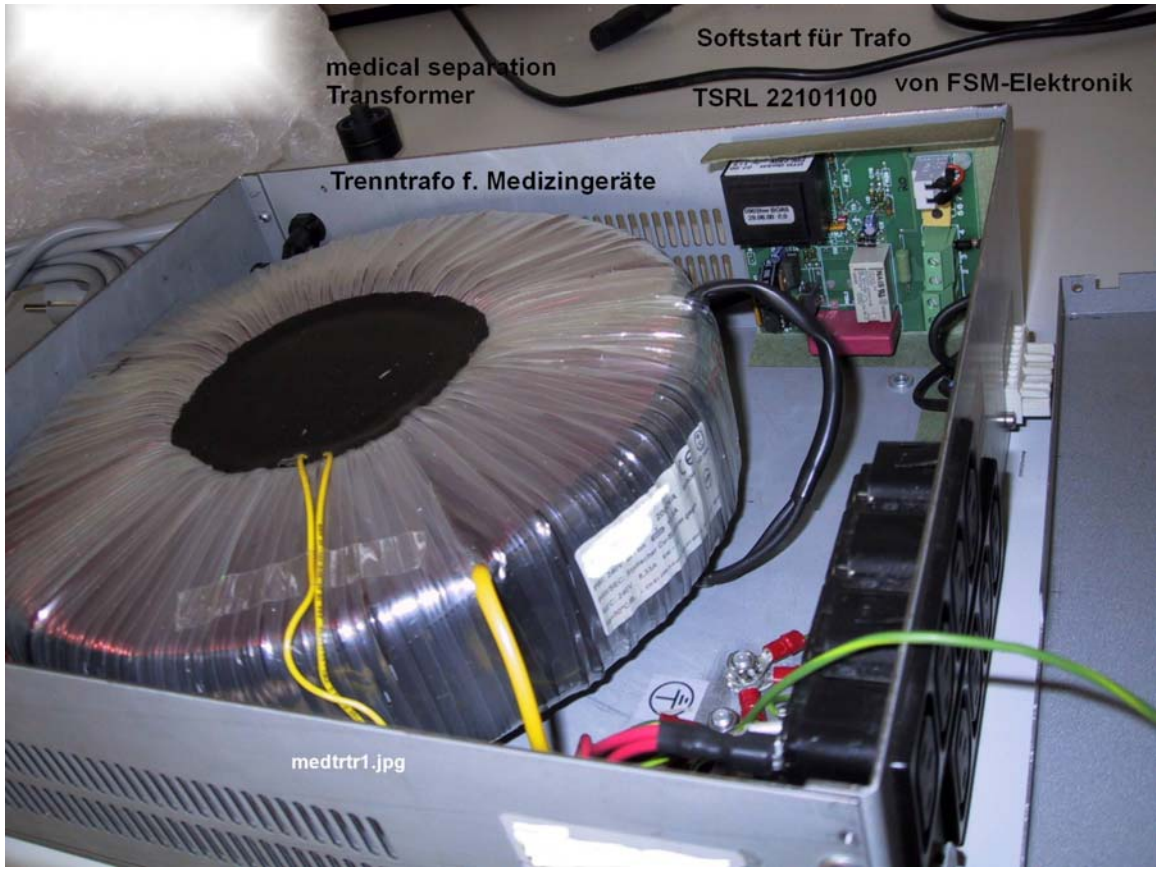
Überblick über die Vorteile, bei Verwendung der TSR.

- Kein Einschaltstrom mehr und Einschalten nur mit dem Leerlaufstrom wenn der Trafo unbelastet ist. (Netz-Schalter werden geschont.)
- Mit Last fließt nur der Laststrom beim Einschalten.
- Absicherung nur mit Nennstromwerten und sogar flink auslösend, wenn gewünscht. (Auch eine kleinere Absicherung unter Nennstrom ist möglich.)
- Keine Wartezeit nötig zwischen den Einschaltvorgängen.
- Kein Einschaltstrom nach Spannungseinbruechen, (Voltage Dips), auch wenn nach EN 61000-4-11 geprüft wird.
- TSR ist kurzschlussfest.
- Mehr als 5 Millionen Schaltzyklen Lebensdauer mit Nennlast.
- Keine Versagen des Brückkontaktes, wenn es lange Zeit eingeschaltet bleibt ohne zwischendurch auszuschalten.
- Der häufige Einsatz der TSRL in sicherheitsempfindlichen Bereichen zeigt wie robust er ist, wie die folgenden Beispiele es zeigen.

Das TSRL sitzt in Trenntrafos für Medizin Geräte.

So ein Trenntrafo sitzt in vielen Endoskopiewagen, und in anderen medizinischen Geräten.
Er entspricht der EN60601 und der EN61000-4-11, nach denen alle Elektro-Medizingeräte geprüft werden.

In vielen Geräten, die in Medizinischen Behandlungsräumen stehen werden die TSRL inzwischen eingesetzt.
Über 50.000 Mal seit 2002.

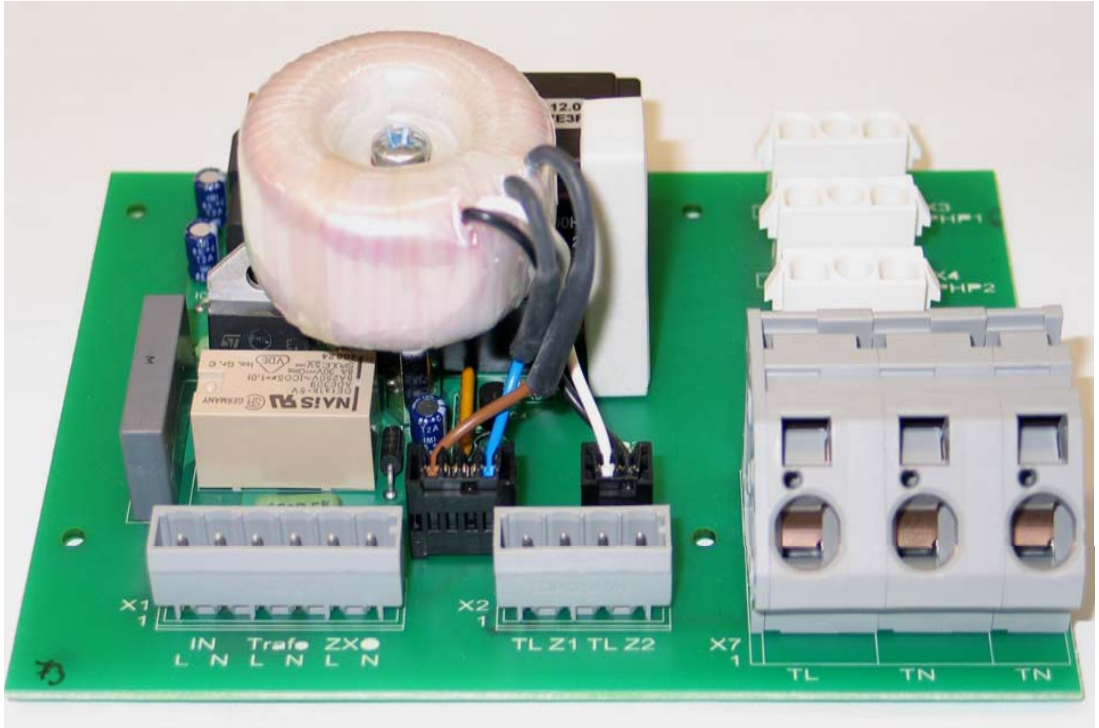


Spezial TSR- Baugruppe für Verkehrs-Ampeln

- Ein TSRL speziell für Verkehrs-Ampeln mit LED-Technik.
  Es schaltet einen 2kVA 230V zu 40V AC Ringkerntrafo für die Leuchten-Speisung.

- Mehr als 10.000 Installationen seit 2004.

  Auch das zeigt welches Vertrauen die Kunden in die Zuverlässigkeit der TSRL haben.



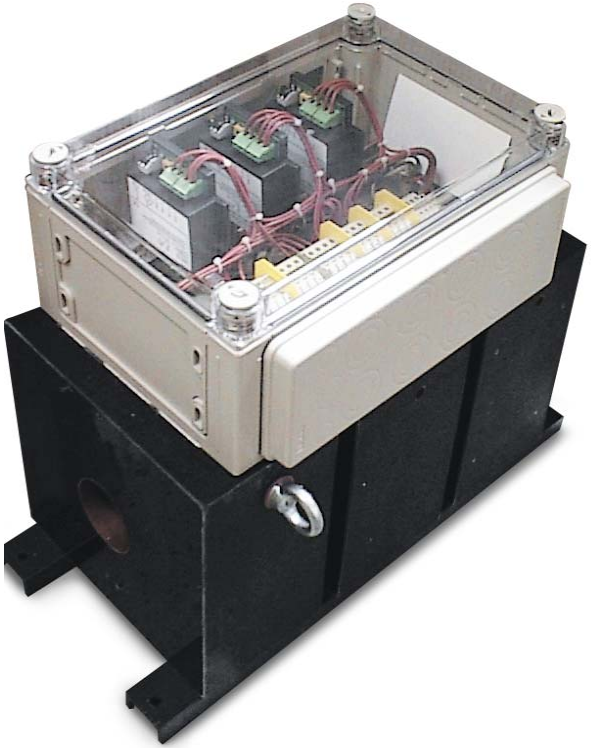
Sicherheit ist wichtig.

- Bei Fahrzeugen mit Fremd- Netzeinspeisung sind Transformatoren vorgeschrieben zur Netztrennung für das IT- Netz im Fahrzeug.
- Wegen dem leichteren Gewicht werden meistens Ringkerntrafos mit ca. 2-3 kVA Leistung verwendet.
- Für Fahrzeuge im Rettungswesen, THW, Feuerwehr, Grenzschutz usw., schreibt das Innenministerium vor, dass keine Einschaltstrombegrenzer verwendet werden dürfen die mit Vorwiderständen arbeiten.
- Es empfiehlt jedoch die TSR einzusetzen.

- Auch bei Transformatoren für das I T- Netz in Krankenhäusern dürfen keine einfachen Einschaltstrombegrenzer verwendet werden die mit Vorwiderständen arbeiten. (EN 61558)

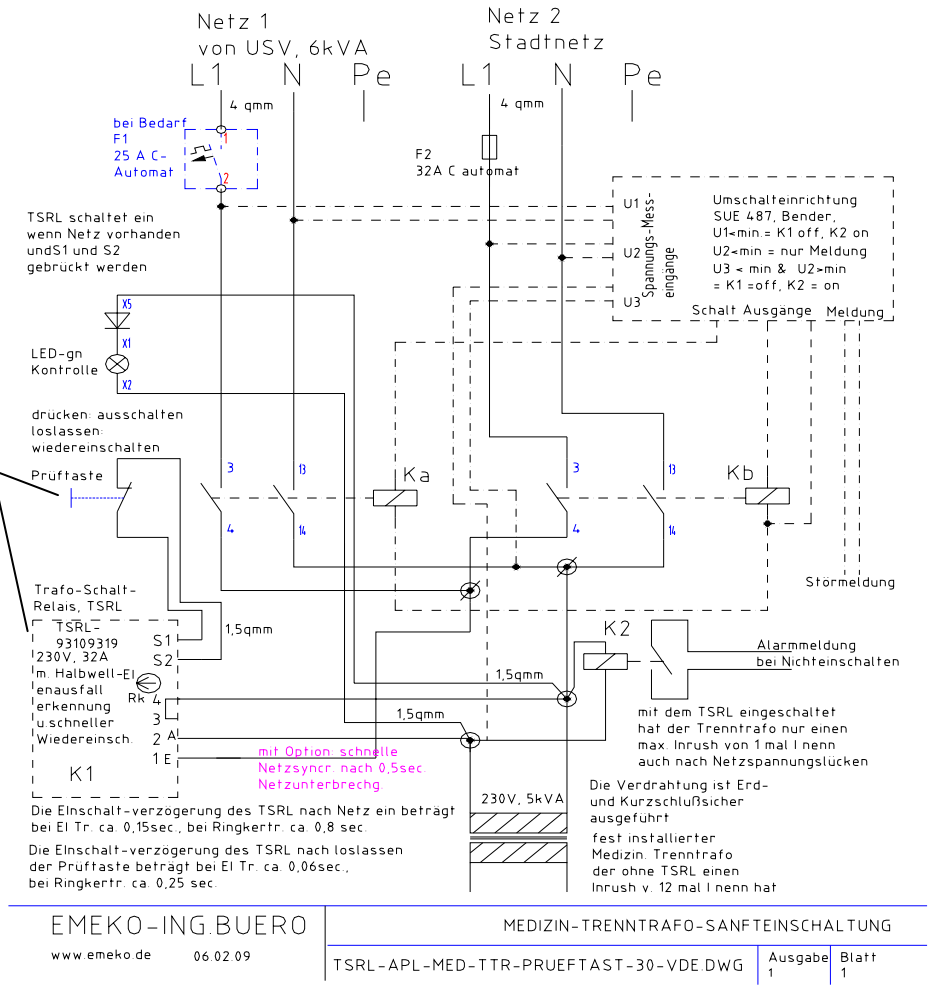
Einsatz der TSRL in medizin. Trenntrafos der Fa. Ruhstrat

- Seit 2004 setzt Fa. Ruhstrat die TSRL für IT-Netztrafos ein. Bis Ende 2009 schon mehr als 400 mal.
- Die Ringkerntrafos verursachen damit keinen Einschaltstromstoss mehr.
- Wenn diese TSRL in Zukunft mit einer Prüf- und Meldevorrichtung versehen werden, kann die Sicherheit und Verfügbarkeit noch weiter erhöht werden.
- Mit redundanten Strompfaden in den Sanfteinschaltern kann die Sicherheit gegen Ausfall beim Auftreten des ersten Fehlers an einem TSRM, der entwickelt werden soll, noch einmal erhöht werden.
- Die Umschaltung zwischen den 2 redundanten Strompfaden im TSRM erfolgt bei einem Fehler automatisch ohne Spannungsausfall. Das wird in der neuen Version der EN 61558 gefordert.



Zusatz für Überprüfung des TSRL mit Taste und Fehler-Melderelais. Ist- Zustand.

- Zur Überprüfung, ob das TSRL noch richtig arbeitet und ob ein Ausfall gemeldet wird.
- Wird die Prüftaste gedrückt, schaltet das TSRL aus, die LED erlischt und das Alarmrelais zieht an.
- Nach loslassen der Taste, erfolgt die Wiedereinschaltung des Trafo ohne Einschaltstromstoß.
- Das kann nur getan werden, wenn im OP gerade keine IT-Netz-Spannung gebraucht wird.



Das TSR löst auch andere Probleme!

- Vom Netz und von der Sicherung aus gesehen, ist der der Einschaltstrom störend. (Dadurch entstehen Spannungs - Einbrüche die für andere Verbraucher schädlich sind und natürlich wird die Sicherung gestresst oder löst aus.)
- Vom Trafo aus zum Netz hin gesehen sind die Voltage-Dips störend. (Dadurch erfolgt eine Provokation von noch größeren Einschaltströmen, weil die Spannungszeitflächen asymmetrisch sind.)
- Vom Trafo aus zur Last hin gesehen ist der Kurzschluss oder die Überlast störend. (Überhitzung des Trafos, Kräfte zerren an den Draht-Windungen.)
- Von der Last aus gesehen ist der zu schnelle oder zu langsame Anstieg der Spannung störend. (Kapazitive Einschaltströme bei Gleichrichter Lasten, Fehlschaltungen von Prozessoren und Steuerungen wenn die Spannung zu langsam oder stotternd ansteigt.)

  Kann man all diesen Anforderungen gerecht werden? Ja!
  Mit dem TSR, weil er sanft einschaltet, weil er auch eine definierte Zu- und Abschaltschwelle, mit dazwischen liegender Spannungs-Hysterese hat. Einschalten bei mehr als 180V, Ausschalten bei weniger als 150V.

Der tatsächliche Einschaltstrom ist manchmal größer als angegeben und erlaubt-1.

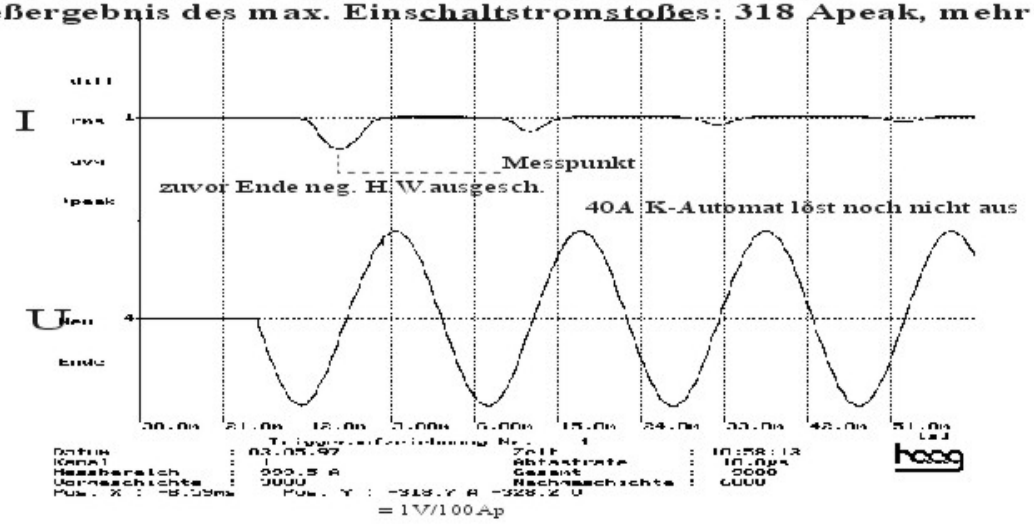
Beispiel für einen 1 Sec. dauernden Spannungsausfall.

Reaktion von einem medizinischen IT-Trafo mit einem erlaubten Einschaltstrom von 8 mal Inenn.

Es wurde hier aber ein Inrush von **17 mal I-nenn,** gemessen, was in der Praxis Probleme bereitet.

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: Ende neg. HW. aus- nach 1 Sec. Beg.neg. HW. ein.
Trafotyp:3,15 kVA Medizin Geräte-Trafo m. 1,0 Tesla

Leerlaufstrom: 0,5A Netzspannung: 234V
ges. Netzimpedanz: ca. 0,2 Ohm incl. Absicherung von:
36A NH 00, und Irst0 mit K40 LS Automat:
Modalitäten: an 230V Wicklung des Prüflings angeklemmt.
Meßergebnis des max. Einschaltstromstoßes: 318 Apeak, mehr als berechnet.



Prüfaufbau:

Datum:02.05.1997
F0106.DL= B0022.pcx
irst0011.cdr

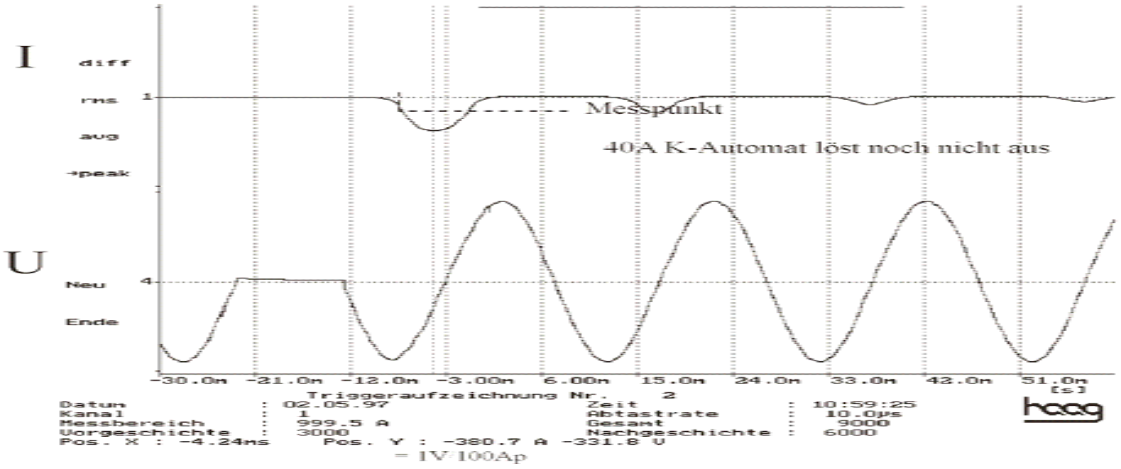
Der tatsächliche Einschaltstrom ist manchmal größer als erlaubt-2.

Beispiel für die Wirkung von einem schnellen, 10msec. dauernden Spannungsausfall.

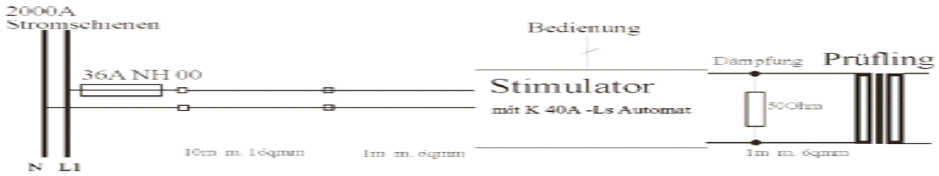
Reaktion von einem medizinischen IT-Trafo mit einem Einschaltstrom von eigentlich 8 mal Inenn.

Es wurde ein Inrush von **27 mal I-nenn**, gemessen, was in der Praxis Probleme bereitet.

Einschaltstromstoß-Test von Medizingeräte Trafo im Leerlauf.
Prüfgerät: Inrush-Stimulator, Zuleitung mit 10m mit 16qmm an Hauptvert. und insges. 2m mit 6qmm zu IRST und Prüfling.
Einschaltverfahren: Halbwellenausfall, provoziert größten Stromstoß
Trafotyp:3,15 kVA Medizin Geräte-Trafo, mit 1,0 Tesla Induktion
und Einschaltstromstoß von kleiner 8 mal Nennstrom = < 154A peak
Netzspannung: 234V
ges. Netzimpedanz: ca. 0,2 Ohm incl. Absicherung von: 36A NH 00, und Stimulator mit K40 LS Automat:
Modalitäten: an 230V Wicklung des Prüflings angeklemmt.
Meßergebnis des max. Einschaltstromstoßes: 380 Apeak,
= 2,45 mal dem zulässigen Einschaltstrom v. 8 mal Inenn.
Fazit: Ohne Softstart ist dieser Fall nicht beherrschbar.



Prüfaufbau:



Datum:02.05.1997
F0106.DL= B0027.pcx
irst0012.cdr

Schon wieder die Spannungszeitflächen!

- Auch bei den folgenden Folien ist die Betrachtung der Vorgänge im Trafo mit der Sicht per Spannungszeitflächen sehr hilfreich und führt zum leichten Verständnis.
- Die folgende Induktionsformel zum Berechnen der Spannung eines Trafos zeigt keine Anwesenheit des Stromes. Er wird für die Induktion, auf der die Trafotechnik beruht, nicht benötigt.
- U = 4,44 * B-dach-ges.hub * Kernfläche * Frequenz * Windungszahl.
- B-dach ist ca. 1,5 Tesla, = 1,5 mal 10 hoch -4 Volt*Sekunden pro Quadratzentimeter.
- Beispiel für einen 300VA Ringkerntrafo:
- Primärspannung U1 = 4,44*3*8,6*50*400 *10 hoch -4
- = 230Volt
- Erst für die Berechnung der Trafogröße über den Drahtquerschnitt und den Kupferfüllfaktor und damit die Spulengröße, ist dann natürlich der Strom nötig, damit der Trafo nicht zu heiss oder unnötig groß wird .

Auswirkung eines 5 msec. dauernden Spannungsausfalles.

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. HWausgesch. u.sofort mit 0,5 der 1 neg. Halbwelle eingesch.

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

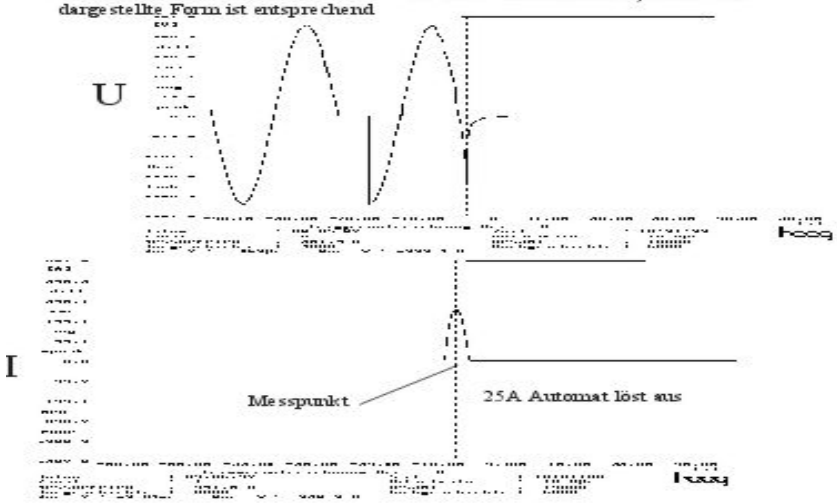
Leerlaufstrom: 0,5Aeff Netzspannung: 234V

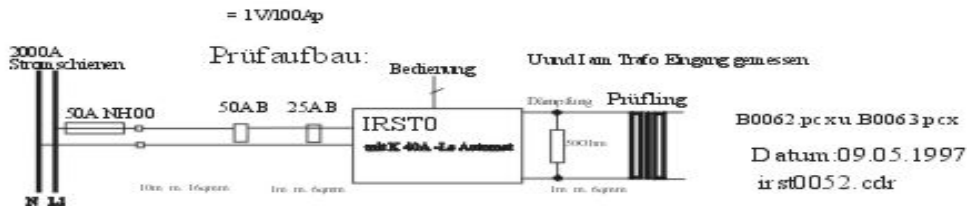
ges. Netzimpedanz: ca. 0,3 Ohm incl. Absicherung von: 50A NH 00, + 50A +25A, B-typ Ls-schalter:

Modalitäten: an 230V Wicklung des Prüflings angeklemmt.

Meßergebnis des max. Einschaltstromstoßes: 250 Apeak

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





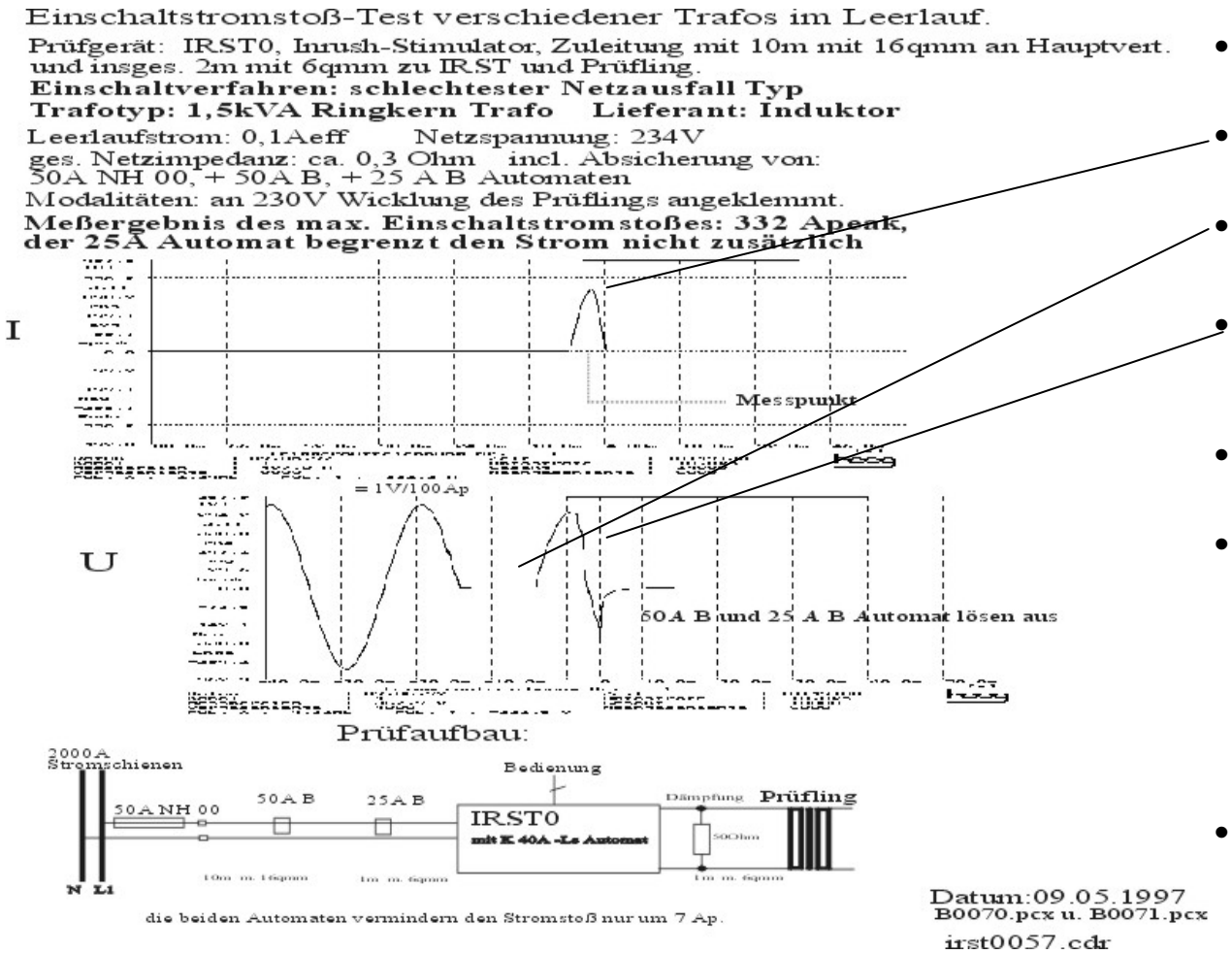
- Hier fehlt ein Stück einer Spannungszeitfläche.
- Die Hysteresekurve wird mit der neg. Halbwelle nicht bis zum neg. Umkehrpunkt durchfahren.
- Folglich treibt die folgende pos. ganze Spannungszeitfläche den Trafokern in die pos. Sättigung, wie man an der **Trafoantwort,** dem **Strom** sieht.

Test mit einem 1,5 kVA Ringkerntrafo an 230V.

- Ein 5 msec. dauernder Spannungseinbruch lässt den B 25A Leitungsschutzschalter auslösen,
- weil dadurch ein Stromstoß von 250A Höhe entsteht.

- Sannungseinbrüche mit diesem Flächeninhalt hat EMEKO schon auf Stromnetzen in Industrie-umgebung gemessen. Weshalb es nicht verkehrt ist, wenn zum Prüfen noch größere Halbwellen Defekte simuliert werden.

Katastrophale Auswirkung eines 10 msec. dauernden Spannungsausfalles.



- Das ist der schlechteste Fall für einen Trafo.
- Einschaltstrom von 332A Spitze
- 10 msec. Voltage-Dip
- Ein B 25A und ein B 50A Leitungs-schutzschalter lösen aus.
- Test an einem 1,5 kVA Ringkerntrafo bei 230V.
- Diese Spannungs-Ausfallsimulation wird zur Prüfung von elektro-medizinischen Geräten verwendet, wobei die Sicherung nicht auslösen darf.
- Das geht nicht ohne das TSR.

Seit 2005 ist die Prüfung mit Halbwellen Ausfällen Pflicht.

- Voltage-Dip´s, sind Ausfälle einer ganzen Netz-Spannungs-Halbwelle, von Teilen davon oder Ausfälle die länger dauern.

- Nach EN 60601-1-2, und der von dort auf die verwiesene EN 61000-4-11, müssen medizinische Geräte, einschließlich Trenntrafos, damit „gequält“ werden. Es wird eine Netzspannungs-Halbwelle dabei ausgeblendet. Siehe nebenstehende Tabelle: 95% Ur für 0,5 Perioden.

- Trafos nehmen das sehr übel und verursachen nach der Netzspannungswiederkehr, also nach der Spannungslücke, einen hohen Einschaltstrom, der größer ist als beim „normalen“ Einschalten..

Auszug aus der EN60601-1-2, S.69

60601-1-2 © IEC: 200X-YY -69-

A per phase, deviation from the requirements of Subclause 36.202.1 j), *Compliance criteria*, is allowed at the IMMUNITY TEST LEVELS specified in Table 207, provided the EQUIPMENT and/or SYSTEM remains safe, experiences no component failures, and is restorable to the pre-test state with OPERATOR intervention. Determination of compliance is based upon performance of the EQUIPMENT and/or SYSTEM during and after application of the test sequence. EQUIPMENT and/or SYSTEMS that are not LIFE-SUPPORTING and for which the RATED input current exceeds 16 A per phase are exempt from the testing specified in Table 207.

2. EQUIPMENT and/or SYSTEMS are allowed a deviation from the requirements of Subclause 36.202.1 j), *Compliance criteria*, at the IMMUNITY TEST LEVEL specified in Table 208, provided the EQUIPMENT and/or SYSTEM remains safe, experiences no component failures, and is restorable to the pre-test state with OPERATOR intervention. Determination of compliance is based upon performance of the EQUIPMENT and/or SYSTEM during and after application of the test sequence.

LIFE-SUPPORTING EQUIPMENT and/or SYSTEMS for which this allowance for a deviation from the requirements of Subclause 36.202.1 j), *Compliance criteria*, is used shall provide an alarm, complying with applicable international standards, to indicate cessation of intended FUNCTION.

Voltage test level % U_T	Voltage dip % U_T	Duration Periods
< 5	> 95	0,5
40	60	5
70	30	25

Table 207
IMMUNITY TEST LEVELS for voltage dips

Voltage test level % U_T	Voltage dip % U_T	Duration Seconds
< 5	> 95	5

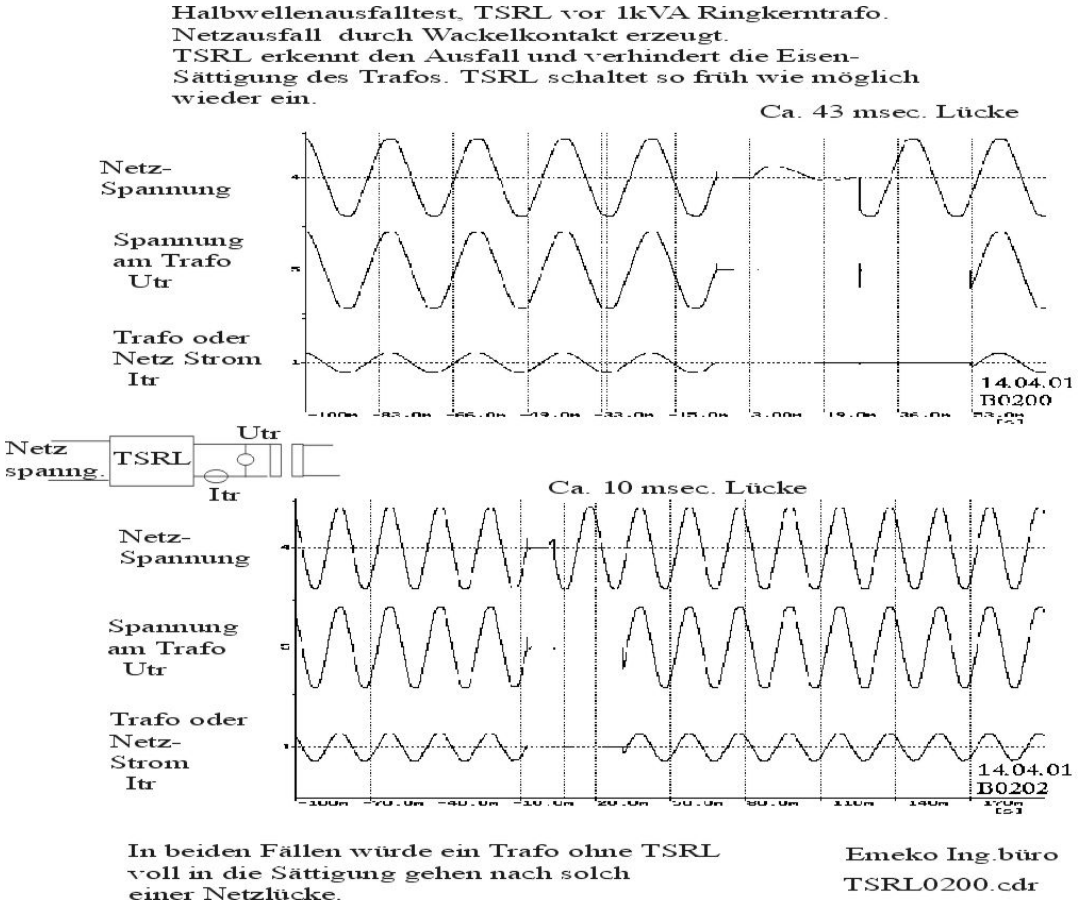
Table 208
IMMUNITY TEST LEVEL for voltage interruption

b) *Tests*

The test method and equipment specified by IEC 61000-4-11 shall apply with

Halbwellen-Ausfall Auswirkungen nach Einbau eines TSRL.

➔ **Keine** Auswirkung von Halbwellenausfällen, auch nicht bei Ringkerntrafos, **wenn ein TSRL vor dem Ringkern-Trafo eingebaut ist.**



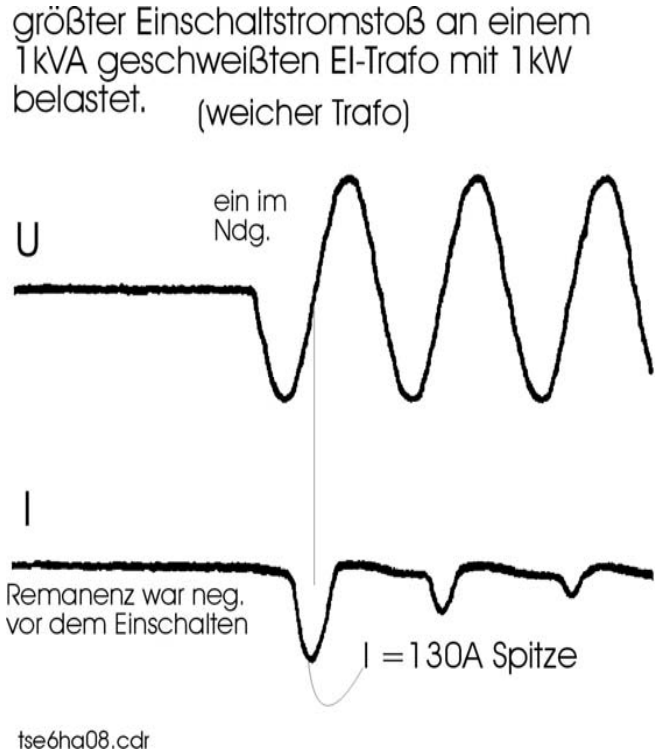
Die schnelle Reaktion auf Netzlücken und das intelligente Einschalten des TSRL schützt den Trafo vor Sättigung im Eisenkern bei Netzwiederkehr.

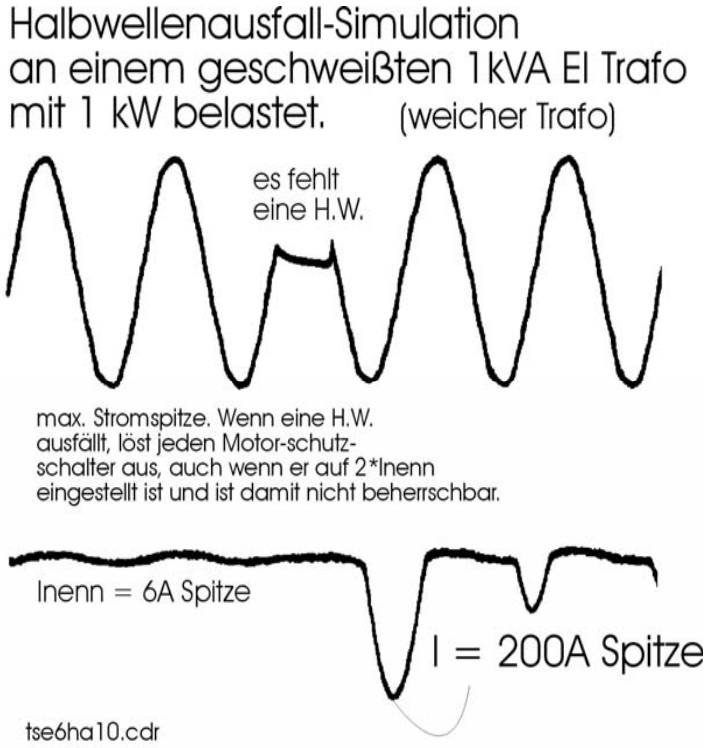
Er kann schnell wieder-einschalten, nur mit dem Nennstrom. Das TSRL merkt sich wie aus-geschaltet wurde und schaltet entsprechend so ein, dass die Sättigung im Trafo- Kern nicht eintritt.

Verhalten eines einschaltstromarmen Trafos.

(Geschweißter EI-Kern, 1kVA gemessen mit ohmscher Nennlast.)

Strom-Differenz zwischen links und rechts = 70 A peak= **35%**





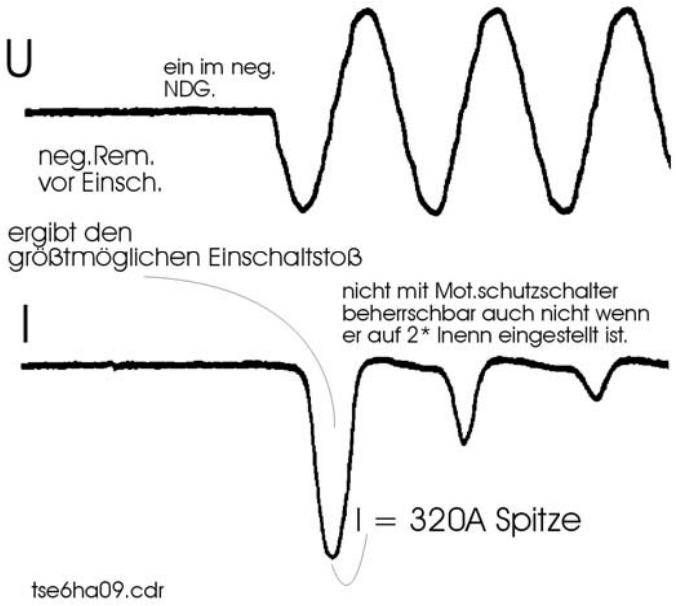
Der normale Einschaltstrom ist klein. **Nach einer Netzlücke ist er um 35 % größer**

Verhalten eines verlustarmen Trafos mit hohem Einschaltstrom.

(1,6 kVA EI-Kern-geschachtelt, gemessen mit ohmscher Nennlast.)

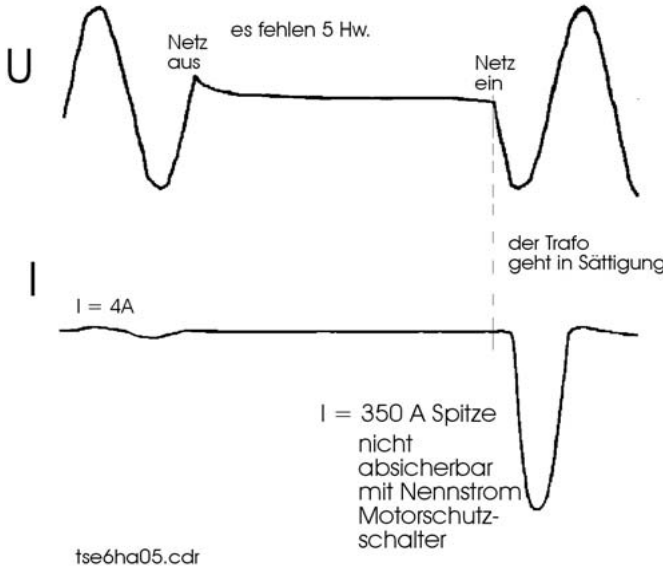
Nur eine kleine Strom-Differenz zwischen links und rechts von = 30Apeak, **= 8,6%**

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



Der normale Einschaltstrom ist hoch.

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



Nach der Netzlücke nur 8,6 % höher.

Konsequenzen aus der Prüfung mit Ausfällen von Netzhalbwellen

Weshalb benutzt man dann noch einschaltstromarme Trafos, wenn deren Inrush bei Netzspannungswiederkehr nach einer kurzen Lücke fast so groß ist wie bei verlustarmen Trafos?

- Einschaltstromarme Trafos bringen dann **keinen Vorteil** wenn man das Auftreten von Netzhalbwellenausfällen berücksichtigen muss. (Und sei es nur weil das geprüft wird, obwohl es in der Praxis in dieser Form mit 10 msec. Dauer genau im Nulldurchgang beginnend, selten vorkommt.)

- **Dann kann man gleich verlustarme Trafos verwenden, die zwar hohe Einschaltströme haben, die**
- **aber zusammen mit einem TSR nicht auftreten. Die Einschaltströme werden auch bei Netzhalbwellen-ausfällen dann vollkommen vermieden.**

Trafo ist nicht gleich Trafo.

Woher kommt dieses unterschiedliche Verhalten zwischen weichen und harten Trafos, wie es in Folie 39 und 40 zuvor gezeigt ist?

- Die unterschiedliche Form der Hysteresekurven ist schuld.
  Sie wird durch die unterschiedlichen Kernbauformen verursacht.

  Siehe die nächsten Folien.

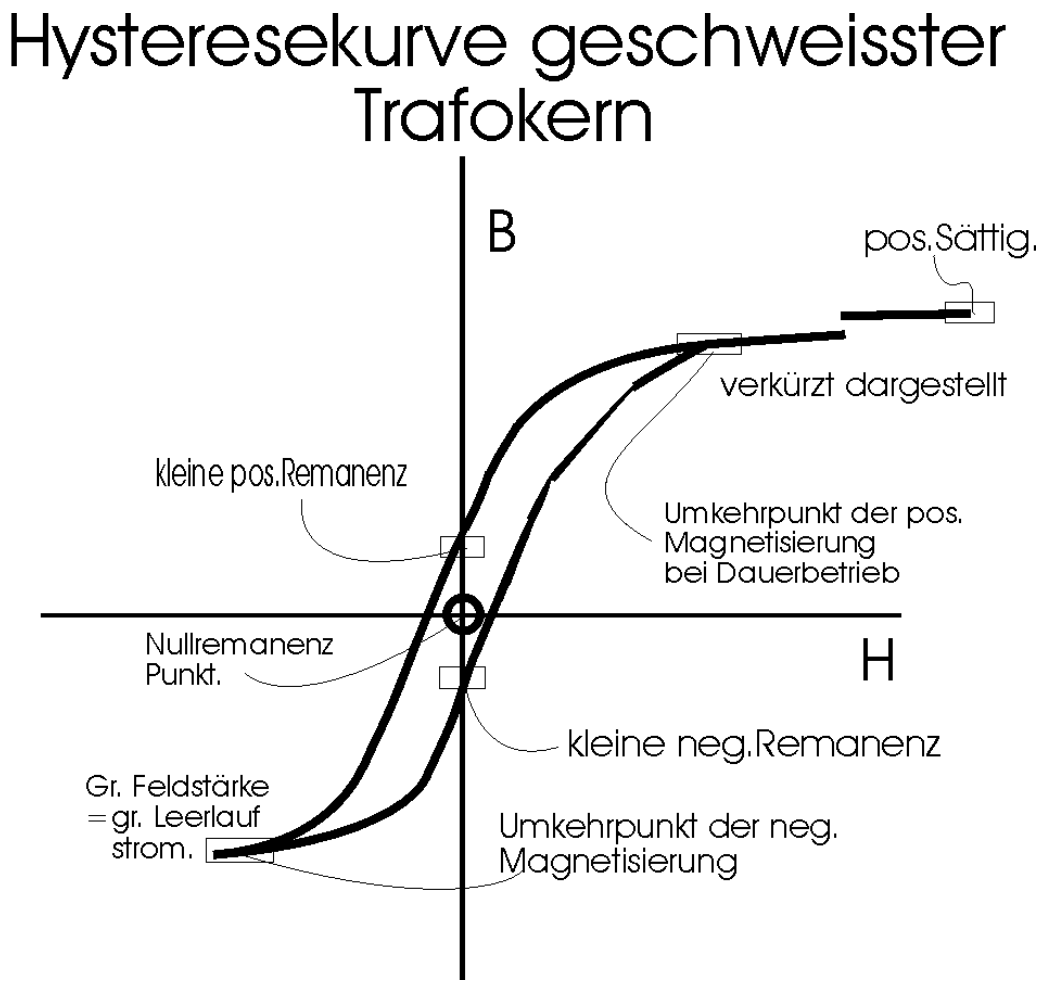
- Generell gilt: Bei einer kurzen Netzspannungslücke von nur 10 msec. läuft B auf der Hysteresekurve nicht in den stabilen Ruhe-Remanenzpunkt zurück. Das B hat bei der Spannungswiederkehr einen noch höheren Wert. Deshalb ist dann der Einschaltstrom höher, weil die zur Verfügung stehende Spannungszeitfläche der neuen Spannungshalbwelle dann den Trafo weiter in die Sättigung treiben kann.

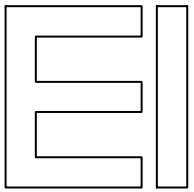
Hysterekurve eines geschweißten Trafos (EI Kern mit großem Luftspalt)

➔Durch den großen Luftspalt ist die Hysteresekurve nach der Seite geneigt. Die max. Remanenz ist klein. (Schnittpunkt der B Achse mit der Kurve.) Der Leerlaufstrom ist groß. (I ist mit H proportional.)

➔Nur solche Trafos lassen sich halbwegs gut mit Scheitelschaltern einschalten. Alle anderen Typen nicht.

➔**In Lehrbüchern steht leider noch, dass Scheiteleinschalten am besten sei für alle Trafos.**





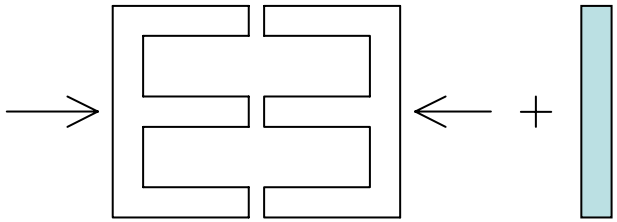
EI Kern

Bei einem geschachtelten Trafo, (mit geringem Luftspalt.)

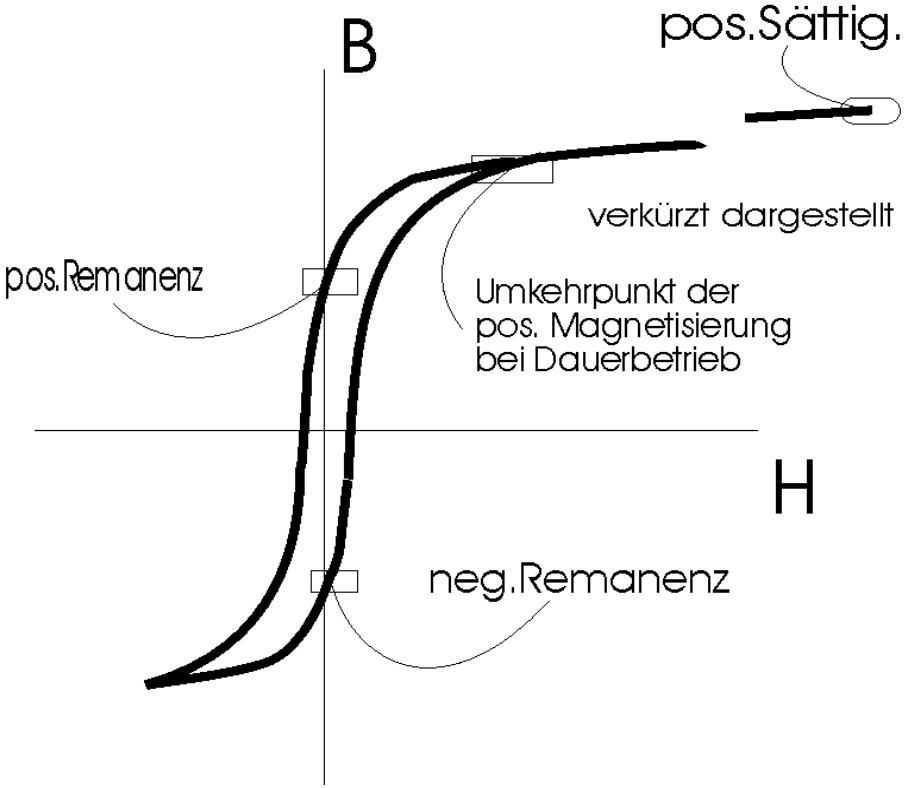
➔ Die Hysteresekurve ist steiler als beim Trafo mit großem Luftspalt.
Die max. Remanenz ist höher, der Leerlaufstrom kleiner .

Je nachdem wie man bezüglich zur Remanenzlage einschaltet, entsteht ein mehr oder weniger großer Einschaltstromstoß.

Geschachtelter Kern



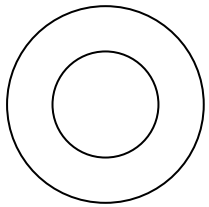
Hysteresekurve
von Trafo mit geschachteltem Kern



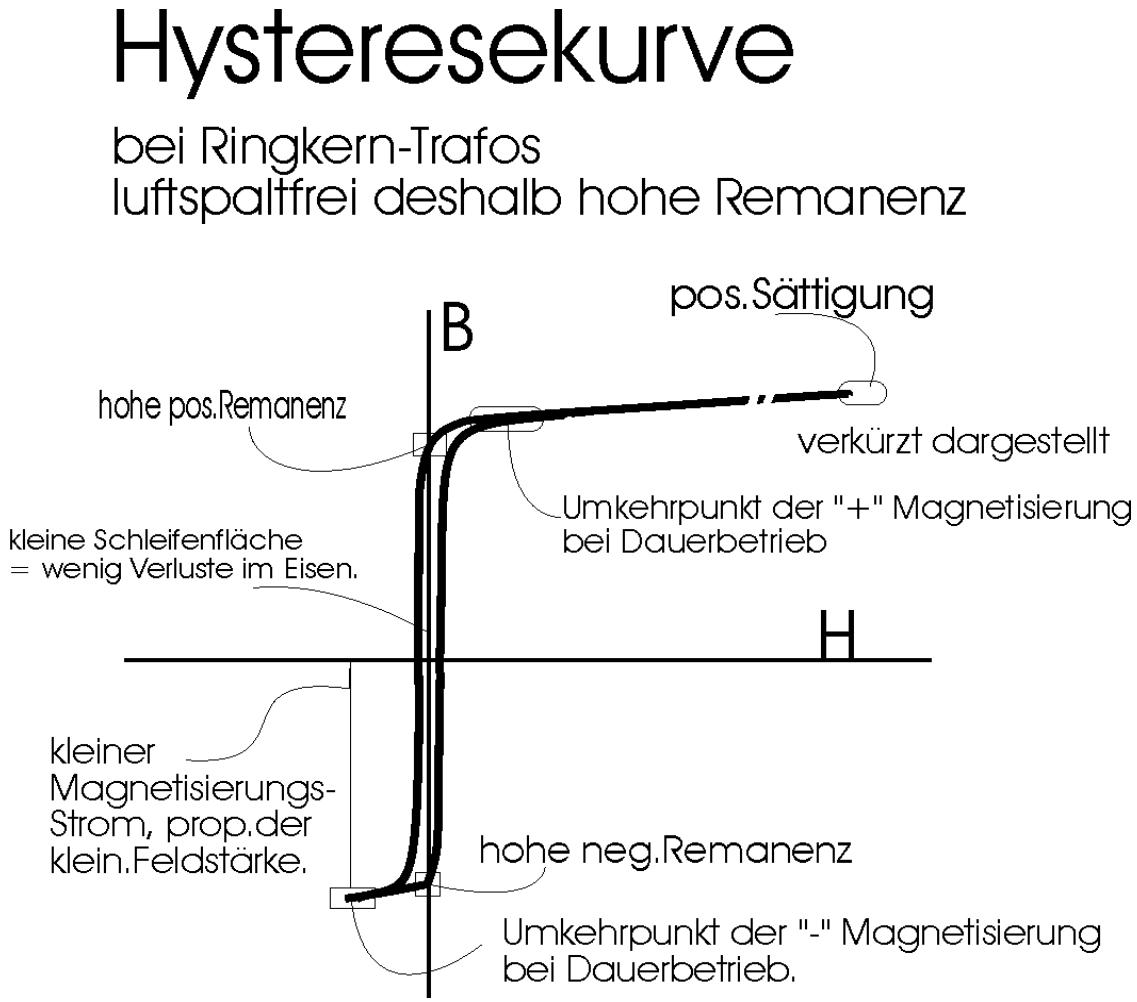
Wechselseitig geschachtelt: Bleche übereinander-zusammengeschoben + jeweils ein I-Schenkel daneben.

Hysterekurve eines Ringkerntrafos (ohne Luftspalt.)

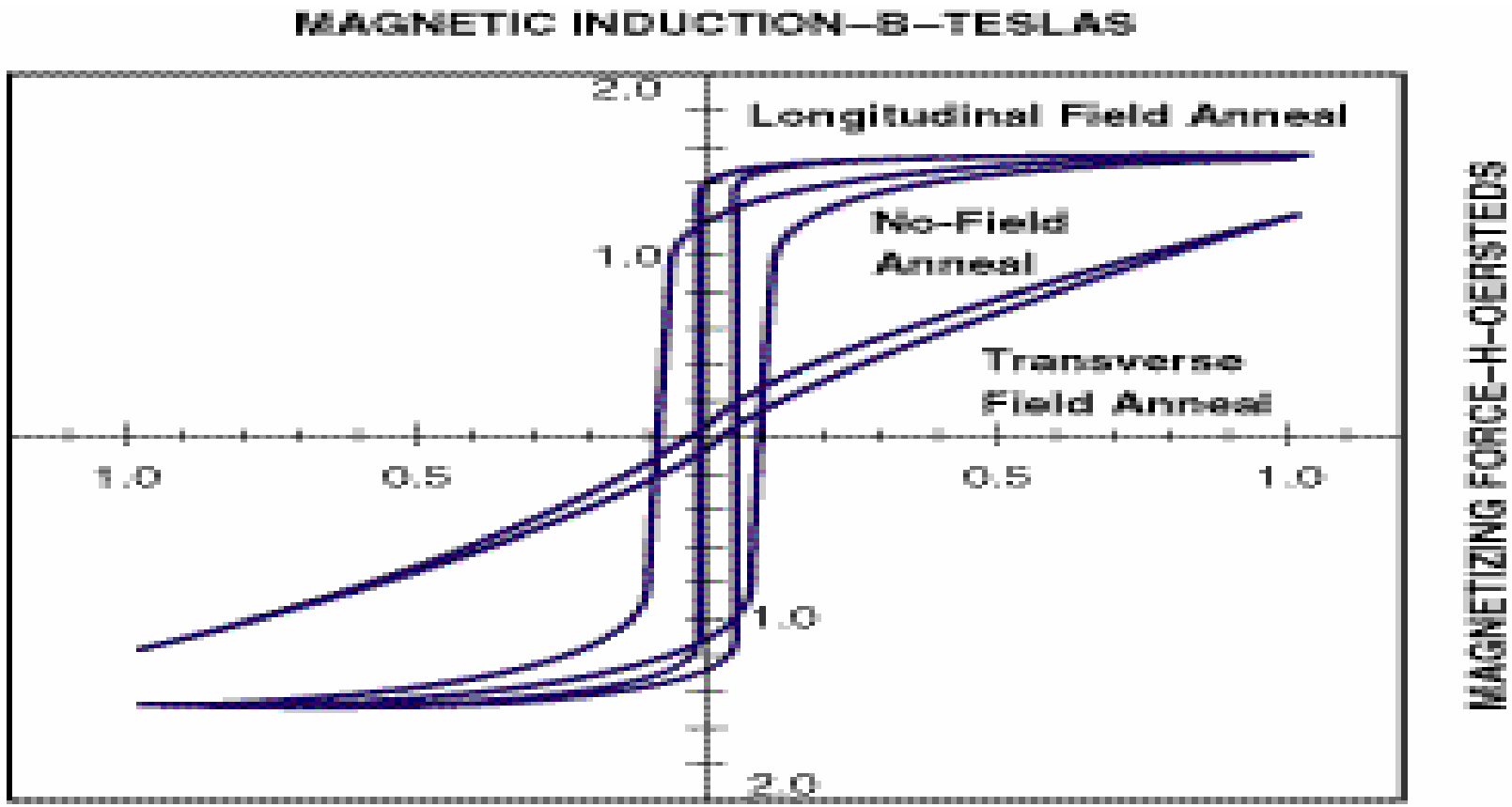
➔Die max. Remanenz des B ist hier fast so hoch wie die Betriebsinduktion im Umkehrpunkt.
➔Der Leerlaufstrom ist sehr klein, weil H im Umkehrpunkt klein ist. Dimension von H: [A / cm]. (Faktor 50 kleiner zum EI - Kern.)
➔Solche Trafos lassen sich, wegen der hohen Remanenz, kaum ohne Einschaltstromstoß einschalten.



Ringband-Kern



Hysteresekurvenbeispiel mit *Metglas inductor cores* aus gewickeltem Band.



Hysteresekurve

Je nach Ausrichtung der Kornorientierung ergeben sich trotz Ringkern völlig unterschiedliche Hysteresekurven. Kopiert von www.Metglas.com, Microlite XP

Wie wird das TSR mit den unterschiedlichen Trafotypen fertig?

- Wie kann ein TSR alle Trafotypen gleich gut einschalten?
- Ganz einfach, durch eine Einstellung der Breite und gleichzeitig der Anzahl der Vormagnetisier-Spannungsimpulse mit einem Poti auf der TSR-Platine.

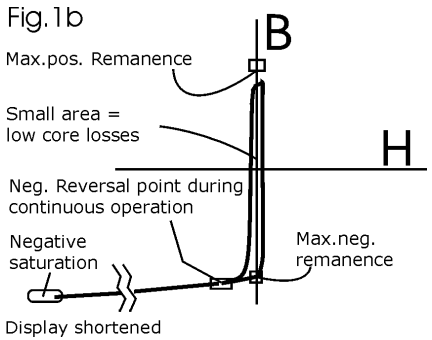
- (FSM liefert auf Wunsch auch TSR mit per Software fix eingestellter Einstellung für nur eine bestimmt Trafotype.)

Einstellung der Vormagnetisierstärke am TSR mit dem Poti.

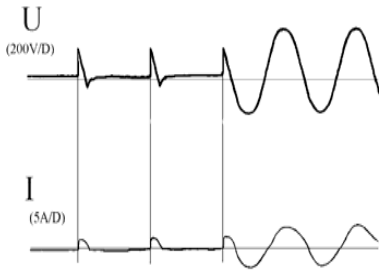
Einstellbeispiel für einen Ringkerntrafo.

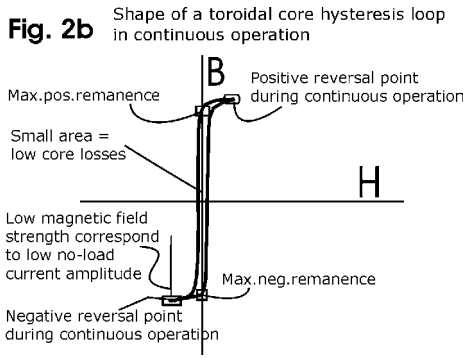
Wie man sieht, hängt die Stärke der Vormagneti-sierung von der Spannungs-zeitfläche der Vormagnetisier-impulse ab.

Die Stromant-wort des Trafos auf die Spann. Zipfel sagt was im Eisen geschieht.

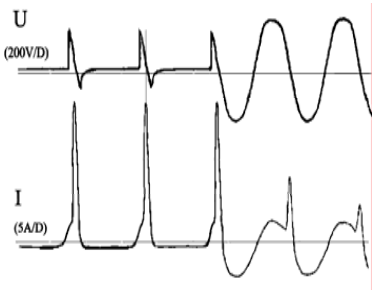


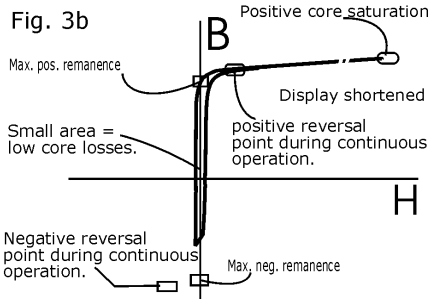
Zu schwach Vormagnetisiert.
-40A peak beim Volleinschalten ohne Last.
Der schlechte Fall.
Poti auf 7 Uhr





Richtig Vormagnetisiert.
Keine Stromspitze beim Volleinschalten.
Poti auf 8 Uhr 30.

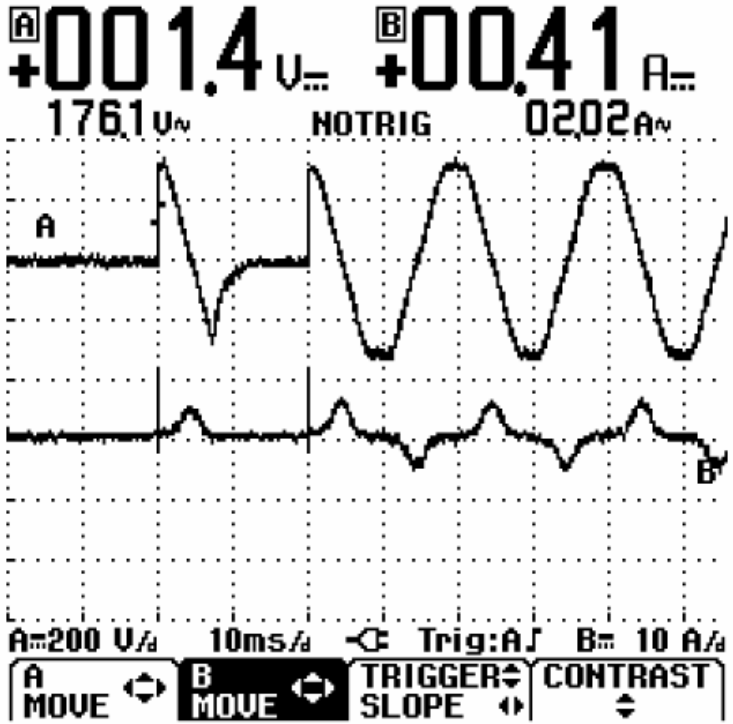




Zu stark Vormagnetisiert.
+25A Strom-Nadeln beim Vormagnetisieren.
Der harmlose Fall.
Poti auf 9 Uhr 30.

TSR-Einschaltbeispiele mit verschiedenen Trafotypen-1.

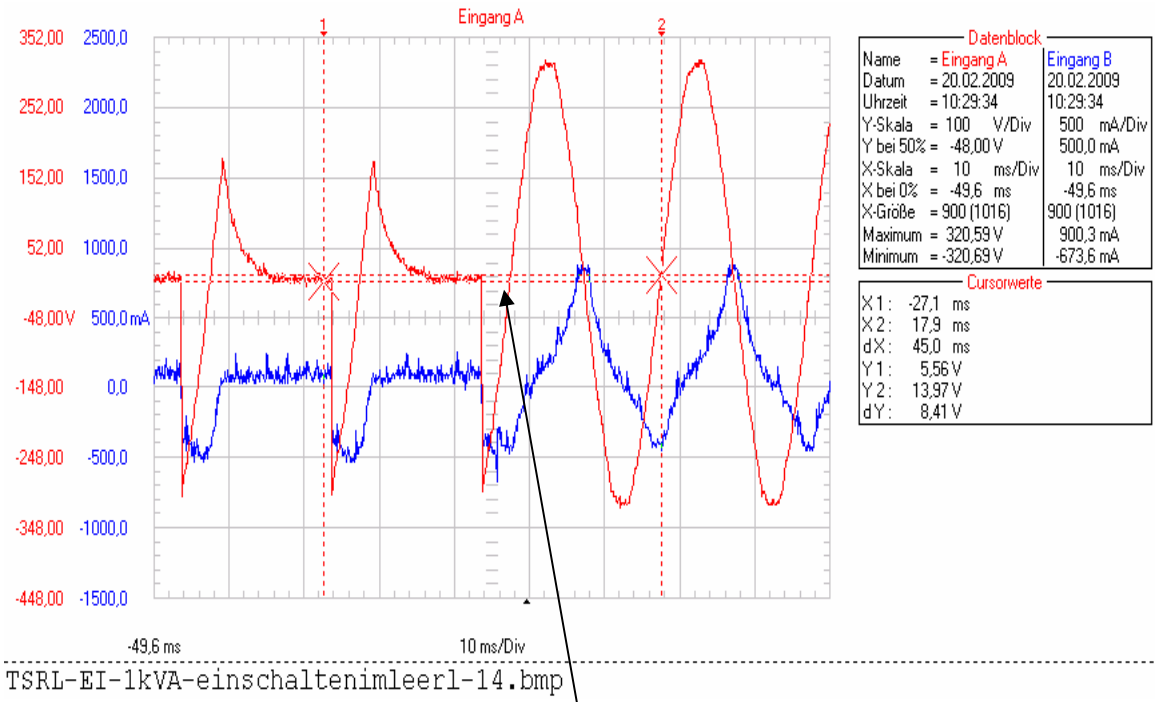
- Der unbelastete 800VA Magnetron-Trafo, der einen **großen Luftspalt** hat, braucht Spannungszipfel die 4 msec. breit sind. Der Leerlaufstrom ist mit 6A peak unverhältnismäßig hoch für den kleinen Trafo. Was vom großen Luftspalt kommt.
- 2 Zipfel reichen, weil die Ausgangsremanenz fast im Nullpunkt liegt.
- **Das Poti steht auf 17 Uhr.**
- Solche, aber nur solche Trafos kann man auch halbwegs gut mit einem Scheitelschalter einschalten. Das entspräche einem 5 msec. Spannungszipfel der dann einen kleinen Einschaltstrom erzeugt.
- Ideal eingeschaltet wird also auch hier nur mit dem TSR.



tsrmagnetron.fvf Emeko Ing Büro Freiburg M.Konstanzer, TSRL schaltet Magnetrontrafo mit 800VA im Leerlauf ein, (großer Luftspalt) Poti auf 15Uhr= 4 msec. Spanngs.zipfelbreite. Nur mit TSR-Prinzip ist einschalten mit dem Leerlaufstrom möglich.

TSR-Einschaltbeispiele mit verschiedenen Trafotypen-2.

- Der unbelastete EI-kern-Trafo mit geschachteltem Kern, der einen **kleinen Luftspalt** hat, braucht Spannungs-zipfel die 3 msec. breit sind.
- 8 Zipfel sind nötig, weil die Ausgangsremanenz fast auf der Höhe des gegenüber-liegenden Umkehr-punktes der Hysteresekurve liegen kann.
- **Das Poti steht auf 13 Uhr.**



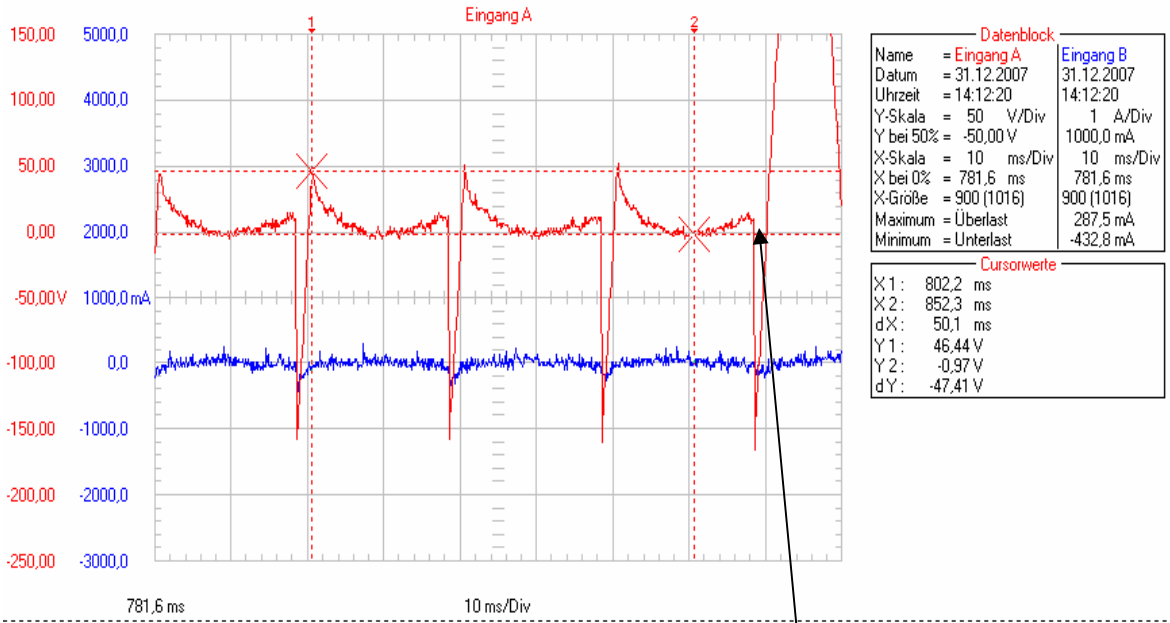
TSRL-EI-1kVA-einschaltenimleerl-14.bmp

Ideales Einschalten

Hier wird voll eingeschaltet

TSR-Einschaltbeispiele mit verschiedenen Trafotypen-3.

- Der Ringkern-Trafo, der **keinen Luftspalt** hat, braucht Spannungs-zipfel die nur 1,8 msec. breit sind.
- 40 Zipfel sind nötig, weil die Ausgangs-remanenz fast auf der Höhe eines Umkehrpunktes der Hysteresekurve liegen kann und die Zipfel schmal sind.
- **Das Poti steht auf 8 Uhr 30 - 9 Uhr.**



TSRL-Auto-13.bmp, 1kVA Ringkerntr. Leerl. von umgepolter Wicklung aus ei ngesch. Poti 8:00,A= Uprim, B= Iprim

Hier wird voll Eingeschaltet es fließt nur der Leerlaufstrom

Ideales Einschalten

Vorteile eines Ringkerntrafos

➔ Der beste Trafo ist ein Ringkerntrafo, weil er verlustarm gebaut werden kann.

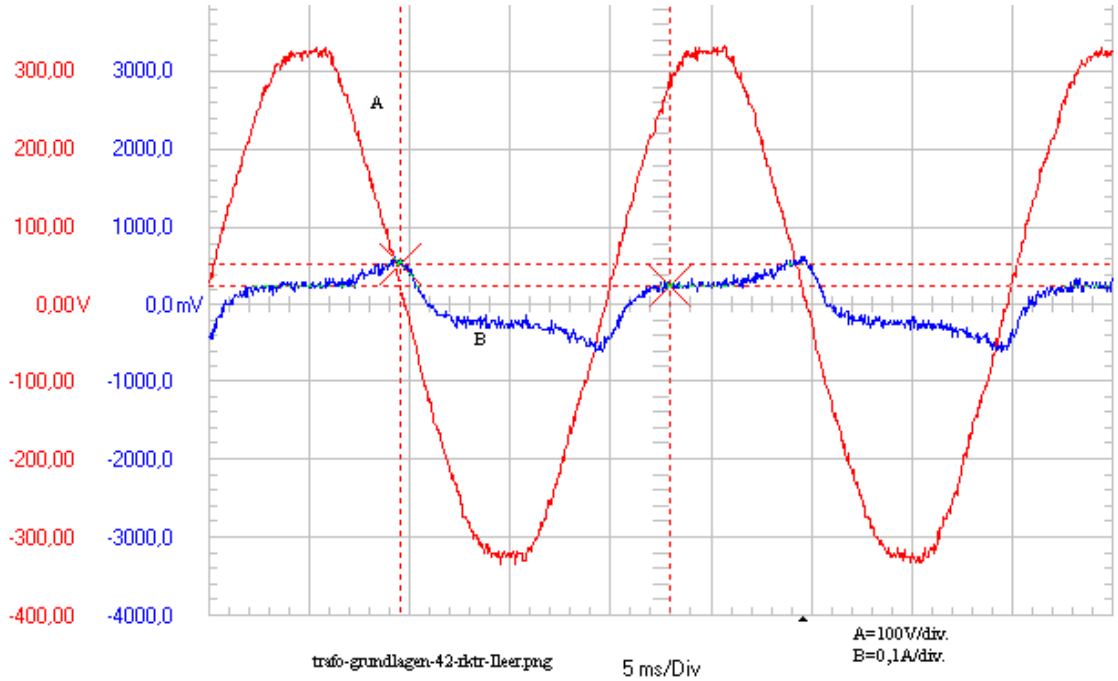
- Er hat geringste Eisenverluste, einen sehr geringen Leerlaufstrom, ein kleines Gewicht und kleines Streufeld, ein großes Wickelfenster, weshalb geringe Kupferverluste mit großen Drahtquerschnitten leichter machbar sind.

- Wenn der hohe Einschaltstrom durch physikalisch richtiges einschalten mit dem TSR vollkommen unterbunden wird, braucht es keinen sonst nötigen erhöhten Primär-Wicklungswiderstand oder eine abgesenkte Induktion im Eisen, um den Einschaltstrom zu begrenzen. Seine Leerlaufverluste sind dann ca. 50 mal geringer als bei einem geschachtelten Trafo.

- Durch die Materialpreis Erhöhungen sind die Vorteile des Ringkerntrafos noch wichtiger geworden, weil er am wenigsten Material pro VA Leistung des Trafos braucht.

Leerlaufstrom von Ringkerntrafo, hier eines 1KVA Trafos.

- Er hat einen gänzlich anderen Verlauf als beim EI-Kerntrafo. (Nächste Folie.)
- Der fast waagerechte Verlauf in der Mitte der Spannungshalbwelle und eine viele kleinere Amplitude sind auffallend.
- Vergleich dazu mit der nächsten Folie, (wo der Leerlaufstrom eines EI Kern Trafos zu sehen ist.)



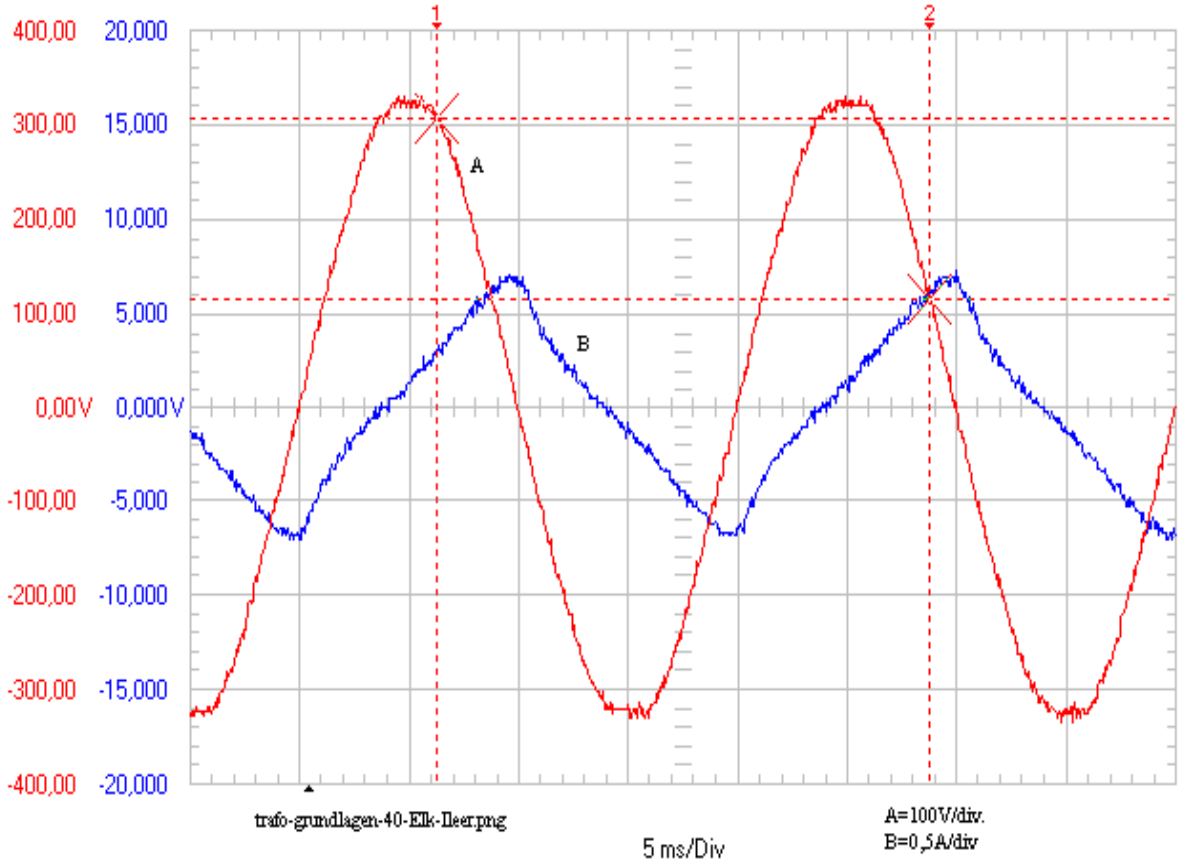
Hier kann man nicht sagen, dass der Strom der Spannung um 90 Grad nacheilt. In der Mitte der Spannungshalb- Welle liegt er sogar in Phase.
In den Lehrbüchern sind leider oft die Trafo-Leerlauf-ströme der Spannung um 90 Grad nacheilend und sinusförmig dargestellt.

Zum Vergleich: Leerlaufstrom eines 1kVA EI-Kern Trafos.

Höherer und dreieckförmiger Verlauf des Leerlaufstromes wegen dem Luftspalt im Kern.

Das meiste an Feldstärke und damit an Strom wird zum Überwinden des Luftspaltes benötigt.

Hier eilt der Strom der Spannung um ca. 90 Grad nach. Hier stimmt die Lehrmeinung fast, aber der Strom ist überhaupt **nicht** sinusförmig.



Pause

- Die „Herrschaften der Lehre“ sollten also besser einmal die verschiedenen Trafos durchmessen als nur kritiklos abzuschreiben.

- Jetzt kommt die Physik im Trafo dran.
- Das meiste an der nötigen Physik ist mit der Betrachtungsweise über die Spannungs-zeitflächen bisher schon gesagt worden.
- Die Physik ist für das genaue Verständnis der TSR Funktion nötig.
- Aber keine Angst, das geht fast ohne Formeln, weil über die Spannungszeitflächen das meiste am Verhalten des Trafos erklärt werden kann.

Verstehen ohne Formeln.

- Formeln beschreiben was physikalisch passiert.
- Sie sind oft nur Näherungen der Wirklichkeit.

- Bilder und Grafiken und Messkurven zeigen meistens auf verständlichere Weise was tatsächlich geschieht.
- Sie sind also viel anschaulicher.

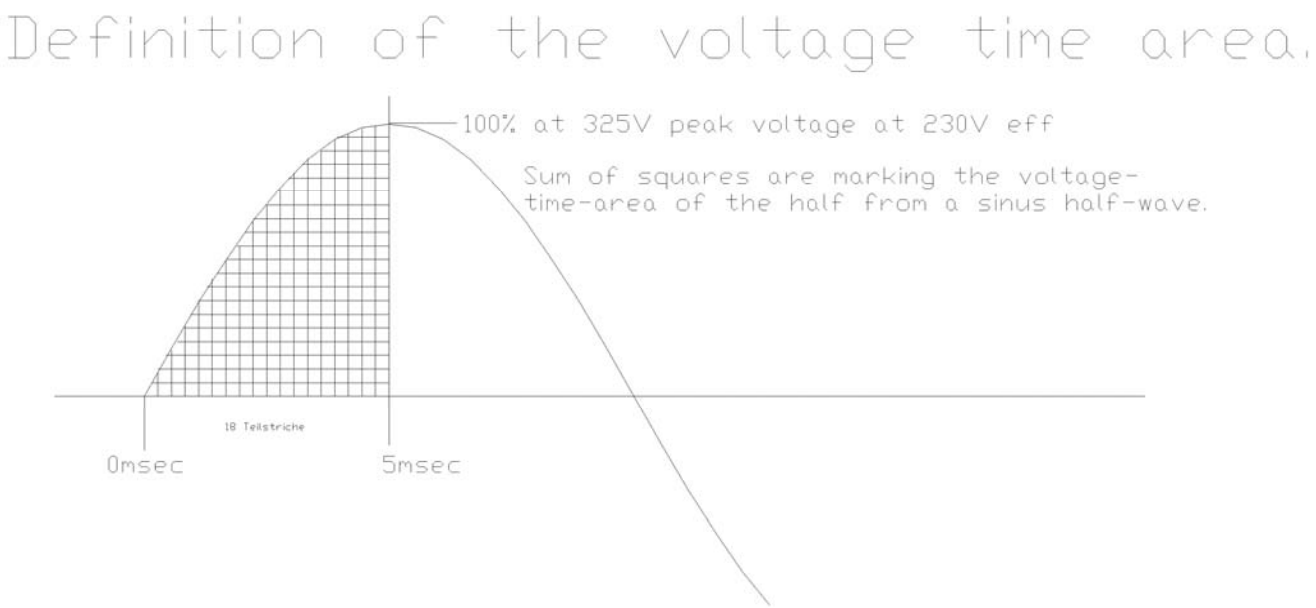
- **Beim Trafo zeigt der mit einem Oszilloskop gemessene Primärspulen Strom, (Leerlaufstrom) in Verbindung mit der Spannung an der Primärspule, genau das was zu jedem Zeitpunkt im Trafo passiert.**
- **Dazu kann der Verlauf der Hysteresekurve konstruiert werden.**

Physik im Trafo

Auf den nächsten Folien wird die Trafophysik mit folgenden Begriffen erklärt.

- Hysteresekurve in Luft, in Eisen, in verschiedenen Eisenkernformen.
- Remanenz.
- Kernverluste.
- Luftspalt im Eisenkern.
- Sättigung im Eisenkern.
- Induktion.
- Induktionsspannung, Gegeninduktionsspannung, Gegen-EMK.
- Leerlaufstrom I, Feldstärke H.
- Magnetfluss Phi.
- Magnetflussdichte B.
- Durchflutung, magnetischer Widerstand, magnetische Spannung.
- Spannungs-Zeitfläche, Spannungsstoß.
- Vormagnetisierung mit kleinen Spannungszeitflächen.

Was sind Spannungszeitflächen???



Spannungs-Zeitfläche ist ein alter Begriff, den schon M. Faraday benutz hat. Er sagte dazu Spannungs-Stoß. Sie ist es welche das B auf der Hysterese Kurve bewegt, also den Magnetfluss ändert.

- Die Summe der kleinen Quadrate markiert die Spannungszeitfläche von der Hälfte einer Sinusspannungs-Halbwelle. Aber auch jede andere Teilfläche an beliebiger Position auf der Zeitachse der Kurve oder die Fläche der ganzen Halbwelle ist eine Spannungszeitfläche.
- Die Spannungszeitfläche einer Sinusspannungshalbwelle bei 230V und 50 Hz ist ca. 2,0 Voltsekunden groß. Ein Trafo für 230V ist dafür über seine Windungszahl ausgelegt. Seine Magnetisierung läuft dabei von einem zum anderen Ende der Hysteresekurve.

Trafos ohne Remanenz sind selten.

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 zu B = 0 in H = 0, I=0.

Das ist bei Trafos ohne Eisenkern immer der Fall.

Trafos mit Eisenkernen ohne **Remanenz** haben aber große Luftspalte und sind deshalb für 50 HZ Trafos unwirtschaftlich, weil der Magnetisierungsstrom viel zu hoch sein muß. Das ist der sogenannte induktive Blindstrom, der das Netz unnötig belastet.

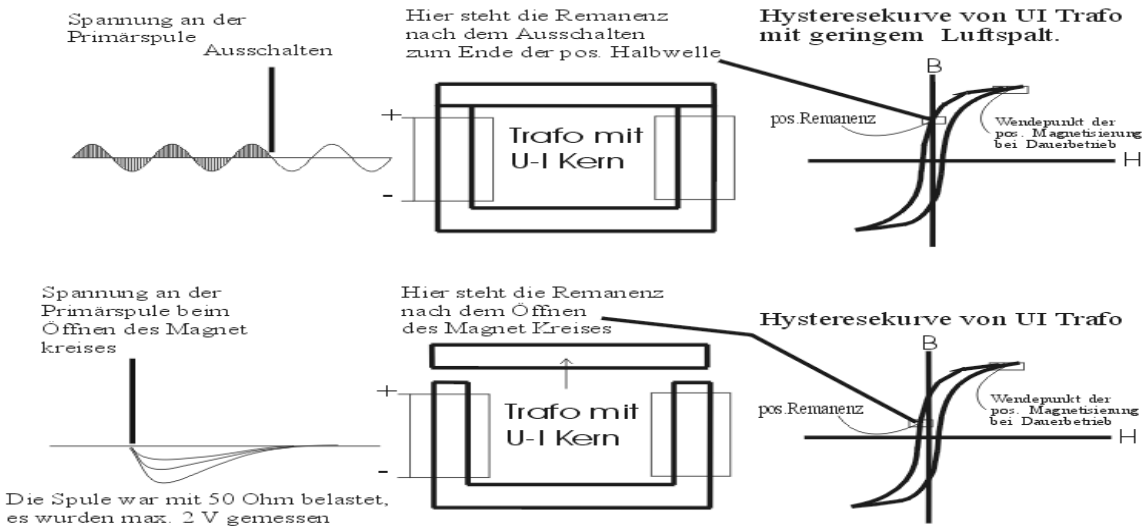
Nur hier ist das Einschalten im Scheitel der Netzspannung richtig, egal mit welcher Polarität, weil von der Null Remanenz aus es zu beiden Enden der Hysteresekurve über die halbe Halbwelle gleich weit ist. Die halbe Spannungszeitfläche einer Halbwelle treibt B über die halbe Hysteresekurve.

Was ist Remanenz?

Aufladen und Festhalten der Magnetisierung durch das Ausschalten einer angelegten AC Spannung zum Ende der Spannungs-zeitfläche einer pos. Halbwelle. B läuft auf die +max. Remanenz.

Entladen der Magnetisierung durch mehrmaliges Abheben des Jochs. Einmal reicht nicht. Man beachte den Verlauf von B auf der Hysteresekurve, der von mal zu Mal tiefer absinkt. Auch die Antwortspannung wird von mal zu Mal kleiner.

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

Kernverluste

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

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

Gesättigte Teil- Zonen im Eisenkern wirken aber wie ein zusätzlicher Luftspalt.

Siehe auch die Datenblätter der Trafo- Blech-Hersteller.

Die Ummagnetisierungsströme sind Wirkströme und liegen in Phase zur Spannung. Siehe Folie 53, dort der waagerechte Stromverlauf.

Der eigentliche Blindstrom wird zum magnetischen Aufladen des Luftspaltes benötigt. Magnetfeld ist proportional zum Blind-Strom. Dieser wird wieder ins Netz zurückreflektiert und belastet ohne Kompensation die Leitungen.

Sättigung

- Die Flußdichte B, hier auch Magnetisierung genannt, kann ab der beginnenden Sättigung von ca. 2 Tesla 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.)

Wie erzeugt der Trafo die Sekundärspannung und die Gegen-EMK-1?

- Die Einwirkung der Primärspannung erzeugt die Sekundärspannung durch Induktion in den Spulen. (Siehe auch die Wirkung der Induktion im Permanentmagnet-Generator, wo ein Dauermagnet sich an Spulen vorbeidreht.)

  Induktion geschieht durch ändern des Magnetflusses Phi, genauer durch Änderung der Flussdichte B. Dimension: [V * sec. / Fläche]

- Der **Magnetfluss Phi (t)=** Integral von Uind(t) * delta t + C.
  Dimension: [V * sec.]
- Der Magnetfluss Phi erhöht sich proportional zur Spannungszeitfläche, solange das Eisen nicht gesättigt ist.
- Auch beim Zuführen einzelner Spannungszeitflächenpakete einer Richtung wandert das B weiter auf oder ab bis zur Max. Remanenz.
- (Das nutzt das TSR verfahren aus, denn zu viele Pakete schaden nichts.)

Wie erzeugt der Trafo die Sekundärspannung und die Gegen-EMK-2?

- Phi = Upr / N * F, oder Phi = U * d t / N.
- Delta Phi *1= 0,225 * U / F * N, für sinusförmige Spannung. [V sec.]
- *1 fü r vollen Induktionshub von –B nach +B. (Normalerweise dann typisch 3,2 Tesla beim Weicheisenkern.)
- Phi erreicht sein Maximum deshalb am Ende von jeder Spannungshalbwelle.
- Spannung V auch in V pro Windung = delta Phi / delta Zeit.
  Dimension: [V * sec. / sec. = V]
  (Induktionsgesetz.)
- Der Betrag der Magnetfluss-änderung und der Betrag der Spannungszeitfläche, welche die Magnetflussänderung verursacht, ist streng mit einander verkoppelt.
- Das hat schon Michael Faraday erkannt. Er sagte Spannungsstoß dazu.
- (Beide Größen haben ja auch die gleiche Dimension: V * sec..)

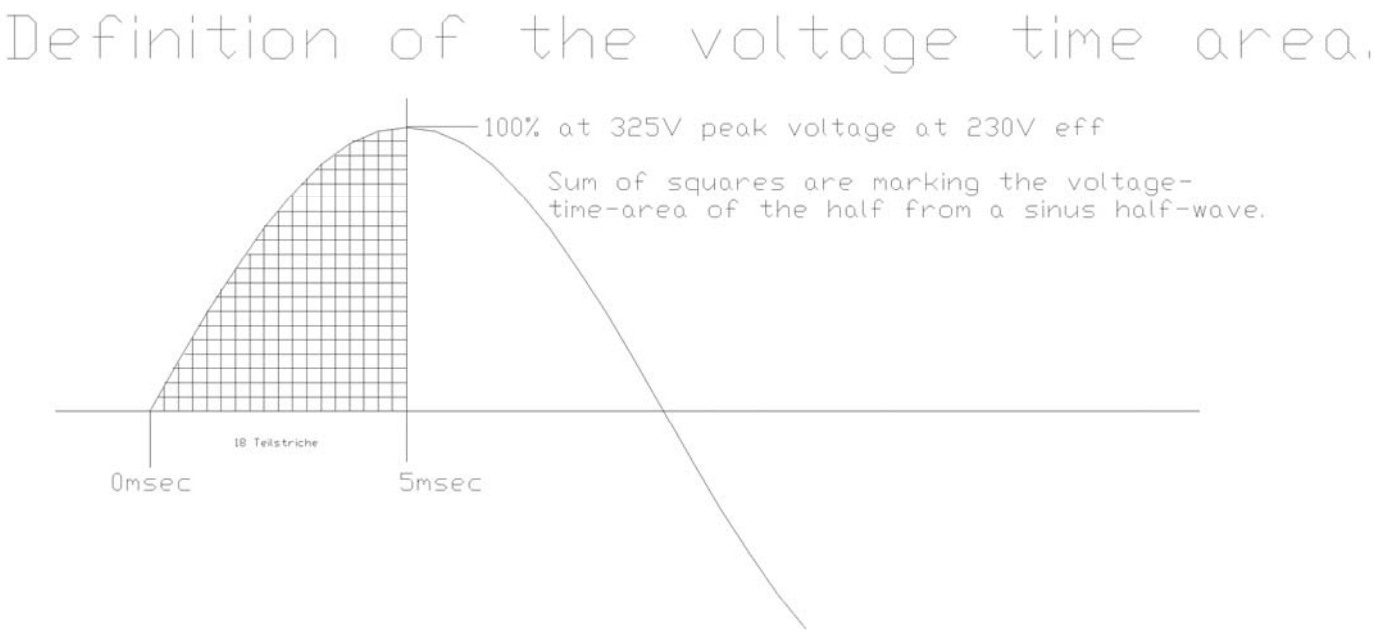
Was ist eine Spannungszeitfläche??

- Für das Verstehen der Wirkung der TSR Einschalt- Prozedur, ist die Sicht mit Spannungszeitflächen hilfreich. (Über die Wirkung Spannungszeitfläche steht bis jetzt noch sehr wenig in Lehrbüchern. Nur Schaltnetzteil Trafo Berechner nutzen sie.)
- Die Dimension des Magnetflusses Phi ist [Vs]
- Der Magnetfluss Phi ist auch = B * A, (A = Kernfläche, B = Flußdichte.)
- Phi und damit B werden permanent geändert im Eisenkern des Trafos und damit entsteht durch die Flußänderung eine Sekundärspannung. Spannung V = delta Phi / delta zeit.

- Phi erreicht seinen Maximalwert am Ende jeder Spannungshalbwelle. [Dimension = V * Sec.] und natürlich am Ende der Betriebs-Hysteresekurve.

- Folglich ist Phi oder B beeinflusst vom Produkt aus Momentanspannung mal Zeitabschnitt. [Volt mal Sekunden.] Siehe die naechsten Seiten.

Nochmal das Beispiel einer Spannungszeitflächen Definition.



- Die Summe der kleinen Quadrate markiert die Spannungszeitfläche von der Hälfte einer Sinusspannungs-Halbwelle. Aber auch jede Teilfläche an beliebiger Position auf der Zeitachse der Kurve ist auch eine Spannungszeitfläche.
- Die Spannungszeitfläche einer Sinusspannungshalbwelle bei 230V und 50 Hz ist ca. 2,0 Voltsekunden groß.

Magnetisierungsstrom oder Spannungszeitfläche-1?

Lehrbücher sagen bisher: der Strom durch die Spule magnetisiert den Eisenkern und erzeugt die Spannung in der Spule. **(Der Strom kommt aber in den Formeln für die Spannungserzeugung auf den vorherigen Folien gar nicht vor!! Man muß ihn über den Umweg der Hysteresekurve ermitteln.)**

Dass der Strom das Magnetfeld für die Anzugskraft aufbaut, ist für einen Elektromagneten der mit Gleichspannung betrieben wird ganz einleuchtend.

Aber man kann auch sagen die Induktion einer Spannung erfolgt **nicht** durch die Magnetfeldänderung delta H, sondern durch die Flußänderung delta B, beide sind ja durch die Hysteresekurve verkoppelt und dann braucht man den Strom nicht. Der Umweg über den Magnetisierungs-Strom ist also unnötig oder zumindest umständlich. Siehe Folie 68-70.

Warum ist der Leerlauf-Strom bei unterschiedlichen Trafotypen gleicher Größe um bis zu Faktor 50 verschieden? Die Spannung und die Frequenz am Trafo, (damit die Spannungszeitfläche) ist doch gleich groß, also gemeinsam bei allen Trafotypen! Die Hysteresekurve wird auch gleich weit ausgesteuert.

Um die Wirkungen an verschiedenen Trafos in Abhängigkeit von der Spannung zu beurteilen eignet sich deshalb die Spannungszeitfläche viel besser als der Strom als Ursächliche Größe. Der Strom ist bei unterschiedlichen Trafotypen jedes mal ein anderer, die Spannungszeitfläche ist immer gleich. (Wenn der Laststrom dazu kommt wird es noch undurchsichtiger.)

Viele Studenten hätten mit dieser Sichtweise weniger Probleme den Trafo zu verstehen. Bei der Berechnung von Schaltnetzteil Transformatoren wird die „Spannungszeitfläche“ schon lange verwendet.

Magnetisierungsstrom oder Spannungszeitfläche-2?

Das Verständnis der Dinge die im Trafo passieren wird sehr erleichtert wenn man sagt:

Der Strom in den leer laufenden Trafo hinein ist **NUR** die **Antwort** des Trafos auf die primärseitige Spannungszeitflächen- Änderung.
(Umgekehrt soll aber nicht die Spannung die Antwort auf die Strom-Änderung sein.)
Der Leerlauf-Strom hängt nur von der Kernbauform und vom Kernmaterial ab.
Man sollte deshalb sagen: Nicht der Strom treibt die Magnetisierungs-Änderung, also das B entlang der Hysteresekurve, sondern die Spannung die an den Trafo angelegt wird, transportiert zusammen mit der einwirkenden Zeit die Magnetisierung B im Eisenkern entlang der Hysteresekurve.
Der Strom zeigt nur was im jeweiligen Trafo durch die Einwirkung der Spannungszeitfläche passiert. Korrekt muß man sagen es ist das Integral der **Windungsspannung** über die Zeit, weil damit der Zusammenhang zur Hysteresekurve ohne Angabe der Windungszahlen gegeben ist.

Das ist auch bei Trafos für Schaltnetzteile nicht anders.

Magnetisierungsstrom oder Spannungszeitfläche-3?

- **Hier ein Auszug aus einer Diskussionsseite im Wikipedia zur Transformatorwirkungsweise:**
- Beitrag von EMEKO: Hallo XYZ. Dein Text hier und der weiterhin folgende:
- *"*4. [[Elektromagnetische Induktion|Änderung des magnetischen Flusses]] → elektrische Spannung: Die "Änderung" des magnetischen Flusses induziert sowohl in der Primärwicklung als auch in der Sekundärwicklung eine elektrische Spannung. Die in der Primärwicklung induzierte Spannung ist ihrer Ursache entgegen gerichtet ([[Lenzsche Regel]])."*
- Das ist soweit richtig, aber du gehst davon aus, dass der Strom den Magnetfluss Phi aufbaut, weil du weiter schreibst: Die an den Trafo angelegte Spannung lässt einen Strom fliessen, der das Magnetfeld im Kern oder der Spule aufbaut. (Beim Luftspaltfreien Kern ist das Magnetfeld im Kern verschwindend klein gegenüber dem einer Luftspule.) Deine Schilderung beschreibt wie das Pferd von hinten aufgezäumt wird.
- Beweis: Nimm zwei Trafos gleicher Leistung und Spannung, aber einen als Ringkern und einen als EI Kern. Der EI Kern braucht 50 mal mehr Leerlaufstrom als der Ringkern. Wenn der Strom den Fluss erzeugt, dann müsste der EI Kern einen 50 mal größeren Fluss haben als der Ringkern. Hat er aber nicht. Beide Kerne gehen bei 1,8 Tesla Magnetfluss in die Sättigung, haben also den gleichen maximalen Magnetfluss. Dessen Dimension: [Vsec. pro qcm.] Wo ist da der Strom? Merkst du schon was? Anderes Beispiel: Nimm den Einschaltstromstoß als Beispiel, dabei ändert sich der Magnetisierungs-Strom in großem Umfang, weil das Eisen gesättigt ist. Der Einschaltblindstrom müsste nach deiner Beschreibung auch eine hohe Magnetflussänderung hervorrufen. Tut er aber nicht. Nach deiner Beschreibung müsste dabei eine besonders große Gegenspannung induziert werden, die wiederum dem Anstieg des Einschaltstromes entgegenstünde. Wird sie aber nicht, wie jeder leicht nachmessen kann, denn der Peak-Strom errechnet sich aus der Scheitelspannung dividiert durch den Strom-Kreiswiderstand. Nicht die Stromänderung ezeugt also die Induktion sondern die Magnetflussänderung und die wird durch die Spannungszeitfläche herbeigeführt solange die Max. Hystereskurve nicht zu Ende ist. Also ist es nicht der Strom, der den Magnetfluss aufbaut sondern die Spannungszeitfläche und die GEGENSPANNUNG wird induziert durch die Änderung der Magnetflussdichte B und die wird nur durch das Einwirken der Spannungszeitfläche erhöht, aber nur bis zur Eisensättigung. Wenn du verstehen würdest wie das Trafoschaltrelais funktioniert, bzw. wie es den Trafo beeinflusst, dann würdest du auch verstehen wie der Trafo funktioniert. Vielleicht machst du dir mal die Mühe. Immer nur in den alten Fachbüchern nachlesen bringt in dieser Sache leider keinen Erkenntnisgewinn. Dazu muß ich ein neues Fach Buch erst schreiben. Aber auf meiner Homepage gibt es viele Hinweise darüber. Aber die willst du wohl nicht lesen wie du immer wieder antwortest, Schade.

Magnetisierungsstrom oder Spannungszeitfläche-4.

- **Hier ein weiterer Auszug aus einer Diskussionsseite im Wikipedia zur Transformatorwirkungsweise**
- Andere Ansicht
  - EMEKO schreibt: Hallo xyz, schau doch nach in meiner Messreihe über den Stromwandler, die ich dir gemailt habe. Dort habe ich auch Stromwandler mit offenem Ausgang vermessen, ohne dass das Signal verzerrt wäre. Auch ein Beweis für die Spannungszeitflächen. Denn wenn der Ausgang offen ist, dann kann der Strom ja auch nicht durch die Spule fliessen. Da sagst du dann aber der Strom kommt eben vom Eingang der durch die eine Windung fließt und dann an der steilen Hysteresekurve vom Ringkern die große Änderung vom B macht bei offenem Ausgang des Wandlers. In dem Fall hättest du Recht. Beim Ritz KSO74 Wandler sind es ca. 2,6 A die bei offenen Klemmen noch keine Verzerrung am Ausgang bringen. Das passt dann bei dem Wandler mit ca. 5 cm Feldlinienlänge und einer Feldstärke von ca. 0,5 A/ cm, für ein mittleres B mit 1 Tesla. Also kann man beim Stromgesteuerten Wandler wirklich von der Aussteuerung der Hysteresekurve durch den Strom sprechen. Hier ist es einfach weil du die Windungszahl = 1 kennst. Bei einem Trafo mit unbekannter Windungszahl ist eben die Betrachtung per Spannungszeitfläche viel geeigneter. Gruß. --Emeko 17:58, 24. Aug. 2011 (CEST)

Magnetisierungsstrom oder Spannungszeitfläche-5

Auszug aus der Trafo-Artikel Diskussion in 08.2011

- Natürlich kann man immer alles auch ganz anders machen. In diesem Sinn ist auch der Trafoartikel ein willfähriges Opfer für eine Überarbeitung. Es sollte aber dabei nicht passieren, daß dann das Grundprinzip des Induktionsgesetzes wieder auf den Kopf gestellt wird, so wie es in einer vormaligen Version schon einmal war. Im Induktionsgesetz kommt eben zunächst gar kein Strom vor und deshalb hüte man sich auch davor, den Magnetisierungsstrom wieder zur Mutter des Prinzips zu machen. Was dann nämlich passiert, kann man auf der Disk von Rainald62 schon nachlesen: Da werden dann aus Phasenverschiebungen und "Stromänderungsraten" Sekundärspannungen konstruiert bzw. induziert, von denen dann kein Mensch mehr weiß, daß sie mit der Primäspannung grundsätzlich phasengleich sein müssen und warum dies so ist. Anders gesagt, wer mit dem Strom beginnt, gerät didaktisch in den Wald und führt den hilflosen Leser aufs Glatteis. Der Unfug beginnt schon damit, daß da ein "90° phasenverschobener Strom" fließt. Fakt ist, daß die Spannung den Fluss bedingt und dieser erst den Strom und zwar abhängig vom Fluss **und vom Kernmaterial**. Dabei ist es eben so, daß gerade die im Trafobau heute vielfach verwendeten kornorientierten Bleche, insbesondere wenn sie als luftspaltlose Ringkerne eingesetzt werden, einen mit der Spannung weitgehend **phasengleichen** Magnetisierungsstrom zur Folge haben, der auch alles andere als sinusförmig verläuft, vielmehr rechteck- bzw. trapezförmig ist und deshalb wesentliche "Änderungsraten" auch nur noch in den Nulldurchgängen aufweist. Jeder, der versucht, diese beobachtbaren Fakten mit Grundprinzipien, die mit dem Strom beginnen (siehe oben), in Übereinstimmung zu bringen, muß verzweifeln. Da passt nämlich nichts. Also, der langen Rede kurzer Sinn: Überarbeitet, was ihr wollt, aber so, etwas überspitzt formuliert, daß der ideale Trafo auch ohne Magnetisierungsstrom noch funktioniert und der Magnetisierungsstrom ist nur ein Dreckeffekt auf Grund von Unzulänglichkeiten im Kernmaterial. Die Zahl von 1500 Zugriffen täglich in der Jahreszeit wo Schule ist hat mich sehr beeindruckt. Zeigt sie doch wer diesen Artikel liest, nämlich Schüler und Auszubildende und die haben es verdient fachlich und didaktisch richtige Erklärungen zum Trafo zu bekommen, die von dieser offensichtlich nicht auszurottenden Kindergartenphysik befreit sind. ELMIL 21. Aug. 2011 (CEST) Ganz meine Meinung.

Was beim Elektromagneten passiert-1.

Für die Beurteilung der Kraftwirkung von Elektromagneten im Luftspalt ist der Strom maßgebend! Elektromagnete haben immer einen großen Luftspalt im Magnetkern.

Bei einem Gleichspannungs-Elektromagneten mit oder **ohne Eisenkern**, fließt der Strom **nicht sofort** nach dem Anlegen der Spannung in voller Höhe.

Er steigt von Null an bis zum Endwert I = U/R, nach der Funktion der Zeit Tau = L/R. (Ohne Eisenkern in der Spule steigt bei gleicher Windungszahl der Strom wesentlich schneller an.)

Auch hier wird die Magnetisierung zwar durch die Spannungszeitflächen getrieben, wenn man die Spannungszeitfläche bei DC-Spannung als ein Rechteck ansieht, dessen Höhe durch die Spannung und dessen Breite durch die Zeit bestimmt wird. Die Spannungszeitfläche baut den Magnetischen Fluss auf und über die Hysteresekurve erhält man das Magnetfeld, das dann die Kraft verursacht. Es folgt dem sich einstellenden Strom.

Ab dem Erreichen des Stromendwertes nützt die längere Zeit einer Spannungszeitfläche nichts mehr, weil der Strom dann durch den elektrischen Widerstand der Spule und oder der Quelle begrenzt wird. Deshalb ist für DC Magnete der Strom das Kriterium.

Was beim Elektromagneten passiert-2.

Für die Beurteilung der Kraftwirkung von Elektromagneten im Luftspalt ist der Strom maßgebend!

Auch bei einem Gleichspannungs-Elektromagneten **mit Eisenkern**, fließt der Strom **nicht sofort** nach dem Anlegen der Spannung in voller Höhe.

Er steigt von Null an bis zum Endwert I = U/R, nach der Funktion der Zeit Tau = L/R. Das L ist durch den Eisenkern allerdings viel größer als bei der Spule ohne Kern.

Auch hier wird die Magnetisierung, der Fluss Phi, durch die Spannungszeitflächen getrieben, wenn man die DC-Spannungszeitfläche als ein Rechteck ansieht, dessen Höhe durch die Spannung und dessen Breite durch die Zeit bestimmt wird.

Ab dem Erreichen des Stromendwertes nützt die längere Zeit nichts mehr, die Kraft nimmt nicht mehr zu, weil der Strom durch die Sättigung des Kernes stark ansteigen will, aber dann durch den elektrischen Widerstand der Spule und oder der Quelle begrenzt wird.

Was beim Elektromagneten passiert-3.

Solange die Sättigung im Kern der Spule nicht erreicht wird, die Spule also spannungseingeprägt läuft und der treibende Strom nicht vom R begrenzt wird, kann man sagen, dass beim Anlegen von Wechselspannung an eine Spule, es die Spannungszeitflächen sind, welche die Magnetisierung, das B, in der Spule entlang der Hysteresekurve auf- und ab- treiben.

Die Kraft $F = (B / K)^2 * A$.

Hier kommt auch kein Strom vor in der Formel, A ist die Kernfläche. Über die Hysteresekurve kann der Strom ermittelt werden.

Siehe die diversen Kern-Formen, mit und ohne Luftspalt. Da man das B aber schlecht messen kann im Luftspalt, es ändert sich auch über den Abstand der Kern-Pole, ist es hier sinnvoller den Strom zur Beurteilung der Magnetkraft heranzuziehen.

Der Strom ist die Projektion der Magnetisierung B auf die waagerechte Achse unter der Hysteresekurve und damit eine Reaktion auf die Spannungs-Zeitflächen.

Für die Beurteilung der Magnetkraft im Luftspalt, ohne den Weg über die Hystereskurve zu gehen, ist der Strom oder die Feldstärke im Spalt maßgebend.

Man kann die Trafophysik auch vom Strom her betrachten.

Die Magnet. Durchflutung Theta = I * N, hat die Dimension [A]
Oder Theta = H * L, Feldstärke mal Länge L der Feldlinien. Dim. [A/cm * cm]

H * L = I * N, zeigt, dass der Strom I von der Feldstärke H abhängt, wenn L und N für einen bestimmten Trafo als gegeben gelten.

I * N / Rm = B * A , Durchflutung / Magn. Widst. = Magnetfluss. Dim. [Vsec.]

Vorsicht vor Verwechslung: Es ist beim Trafo hier nicht der zu übertragende Strom I sondern „nur“ der Leerlaufstrom I gemeint, der nicht auf die Sek. Seite übertragen wird.

Sonst müsste beim Trafo der plötzlich belastet wird, die Feldstärke H sich drastisch ändern gegenüber dem Leerlauf, was aber nicht der Fall ist, was man leicht nachmessen kann.

Die Magnetisierung läuft bei Belastung immer noch auf der gleichen Hysteresekurve wie im Leerlauf.

Nochmal gesagt: Der Leerlauf-Strom kann als Antwort des Trafos auf die Wirkung der Spannungszeitflächen angesehen werden. Das gilt für jeden Betriebszustand des Trafos und für jede Form der Hysteresekurve.

Induktionssatz-1.

Der Induktionssatz, Ut = dphi / dt, die Änderung von B pro Zeiteinheit, gilt als ursächlich für die Physik im Trafo zum Erzeugen der Spannung an der Sekundärspule.

Aber auch die Gegeninduktionsspannung wirkt in der Primärspule. Sonst wäre der Leerlauf-Eingangsstrom zum Beispiel 230V / 0,3 Ohm, (Cu-Widerstand), eben so groß wie der Einschaltstrom.

In Wirklichkeit ist die (Ersatz)- Spannung, welche den Eingangsstrom verursacht viel, viel kleiner. Sie ist nämlich die Eingangsspannung minus der Gegeninduktions- Spannung und damit sehr klein.

Diese Vorstellung der Gegenspannung in der Primärspule selbst fällt schwer, man kann sie nicht direkt messen.

Die Gegenspannung ist nur beim Ausschalten der Spule messbar, wenn sich das Magnetfeld bis zur Remanenz abbaut.

Induktionssatz-2.

Wenn man beim Durchflutungssatz den Leerlaufstrom einsetzt, dann passt das Ergebnis auch zum Induktionssatz.

Durchflutung = I * N. I * N / Rm = B * A = Magnetfluss.

Rm ist der magnetische Widerstand, A die Kernfläche, I der Leerl.Strom, N die Windungszahl.

In Analogie dazu: U / R = I. I*N = magn. Spannung. B*A = magn. Strom.

Wobei die magn. Spannung = I * N ist, wo der Strom drinsteckt und der magn. Strom = B * A ist, wo die Spannung drinsteckt.

Es ist also genau umgekehrt wie beim Ohmschen Gesetz.

Das zeigt, dass die Trafophysik natürlich auch über die Wirkung des Stromes verstanden werden kann, wenn man die Regel nach Ampere verwendet und **man den Rm kennt.** Der Rm steht aber in keinem Trafodatenblatt.

Aber die vorangegangen Seiten zeigen, dass das Verständnis erleichtert wird, wenn man mit Spannungszeitflächen nach Faraday arbeitet.

Induktionssatz-3.

Fazit:
Der Elektrotechniker ist es gewohnt die Spannung als Ursache anzusehen:

Der Strom ist die Wirkung der Spannung am Widerstand, das heißt die Spannung treibt den Strom durch den Draht.

Damit ist dann die auch Wirkungsweise des Trafos viel leichter verständlich.

Bei Transformatoren für Schaltnetzteilen wird für deren Dimensionierung schon lange mit Spannungszeitflächen gerechnet. Wohl weil man es dort mit Rechteckspannngen zu tun hat, womit das Integral U * t ist.

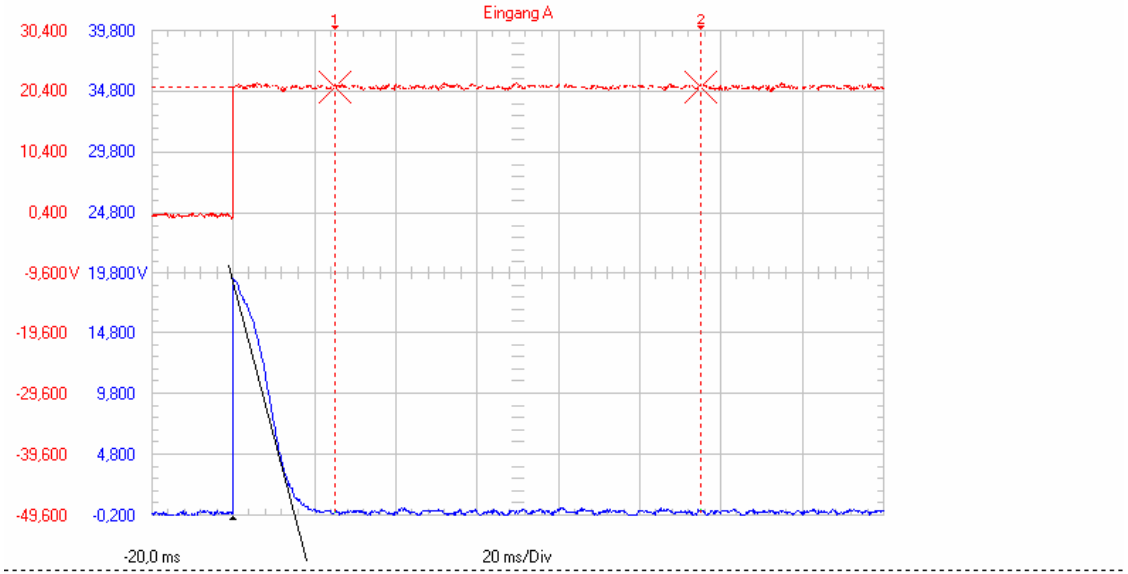
Auf den nächsten Seiten wird mit Messungen an einem Ringkern Trafo und einem Stromwandler-Trafo, auch ein Ringkern, gezeigt wie die Spannungszeitflächen auf den Trafo wirken. Es wurde immer von einem Max. Remanenz Punkt ausgegangen.

Einmal in Richtung Sättigung und einmal in Richtung Ummagnetisierung.

Die Induktion funktioniert nur, solange der Eisenkern **un**gesättigt ist. Bild 80

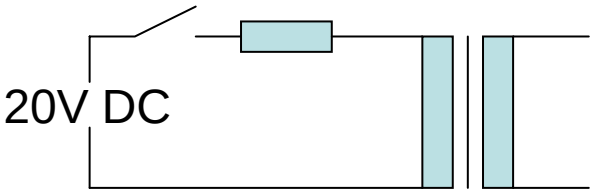
Die Remanenz war positiv: Hier ist der Ring-Kern kurz nach dem Einschalten gesättigt, weil er **nicht ummagnetisiert** wird.

- Die rote Kurve zeigt die 20V Gleichspannung, die an die Trafo-Primärspule über einen 100 Ohm Widerstand angelegt wird.
- Die blaue Kurve zeigt die induzierte Spannung direkt an der Primär Spule.
- Sie bricht nach wenigen Millisek. zusammen, wenn der Kern in Sättigung geht, weil mit der Aufmagnetisierung von der pos. Remanenz aus in pos. Richtung gestartet wurde.



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

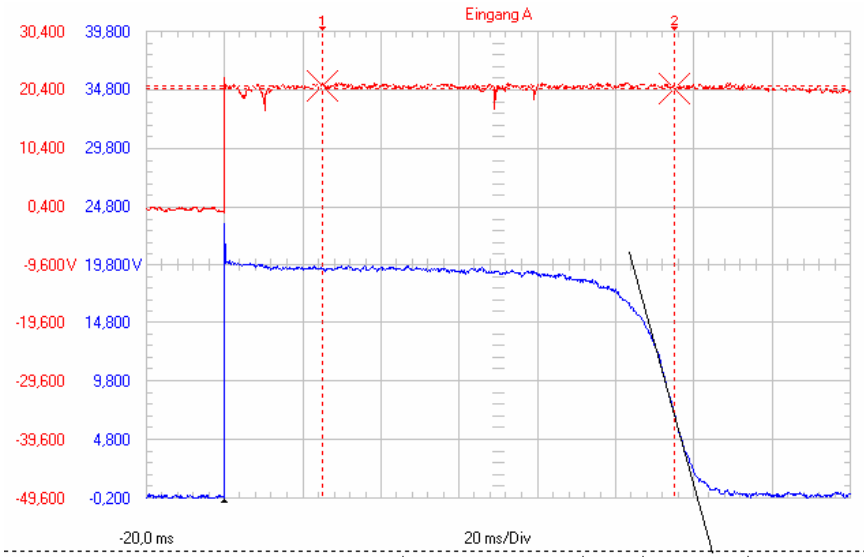
Die wirksame Spannungszeitfläche ist hier 0,3Vsec



Siehe die Hysteresekurve Beim Ringkern.

Die Induktion funktioniert nur, solange der Eisenkern ungesättigt ist. Bild 81

- Die rote Kurve zeigt wie zuvor eine Gleichspannung, die an die Trafo-Primärspule über einen 100 Ohm Widerstand angelegt wird.
- Die blaue Kurve zeigt die Spannung direkt an der Primär Spule. (An der Sek. Spule ist sie gleich groß.)
- Sie bricht erst später zusammen, dann wenn der Kern in Sättigung geht.
  Die Remanenz war zuvor auf den neg. Wert gesetzt worden, was bedeutet, dass das Eisen durch die pos. Spannungszeitfläche **ummagnetisiert** wird.
- Die Spannungszeitfläche, die auf die Spule einwirkt, ändert sich nur über die Zeit, weil die Gleich-spannung konstant ist und ändert dabei die Flussdichte im Kern mit einer konstanten Geschwindigkeit, weshalb auch eine konstante Spannung = Utreib induziert wird, solange der Kern nicht gesättigt ist.



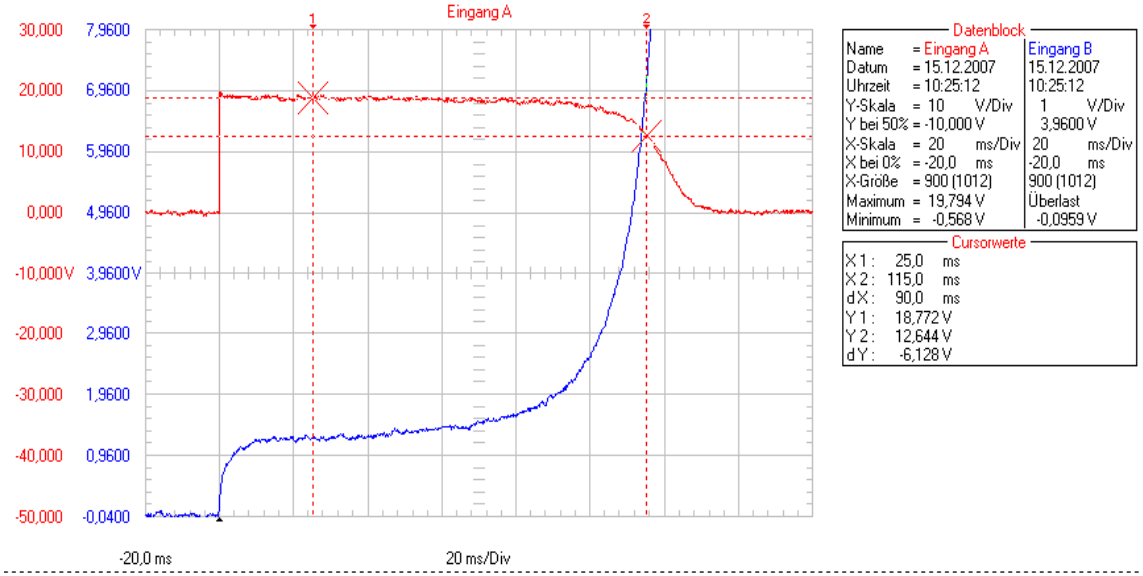
Trafo-grundlagen-19.bmp, Ringkerntr. wie Bild 1, jedoch von neg. Rem. aus +20V Sprung.

Korrektur : wie Bild 18

Gleiches Schaltbild wie zuvor: Die wirksame Spannungszeitfläche ist hier ca. 2 Voltsekunden groß und damit so groß, wie die einer 230V, 50Hz Spannungs-Halbwelle.
Es ist ja auch ein 230V zu 230V Trafo benutzt worden, der erst bei Spannungszeitflächen größer 2,3V sek. in Sättigung geht.

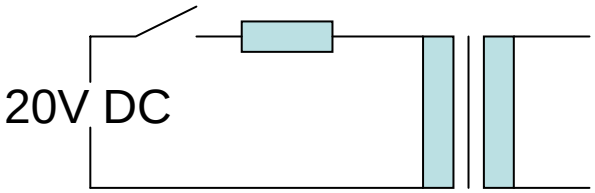
Die Induktion funktioniert nur, solange der Eisenkern ungesättigt ist. Bild 82

- Die Messung zeigt die Wirkung der Gleichspannung, die an die Trafo-Primärspule über einen 100 Ohm Widerstand angelegt wird. Die Spannung der roten Kurve ist nun direkt an der Primärspule gemessen.
- Die Spannungszeitfläche ändert sich nur über die Zeit, weil die Gleichspannung konstant ist und ändert dabei die Flussdichte im Kern, mit einer konstanten Geschwindigkeit, weshalb eine konstante Spannung induziert wird.
- Die blaue Kurve zeigt den Strom der in die Spule hineinfließt.
- Der Strom bleibt lange auf einem konstanten Wert und steigt erst dann an, wenn der Kern in Sättigung geht. Die Spannung an der Spule geht dann zu Null. Die Remanenz war zuvor auf den neg. Wert gesetzt worden.

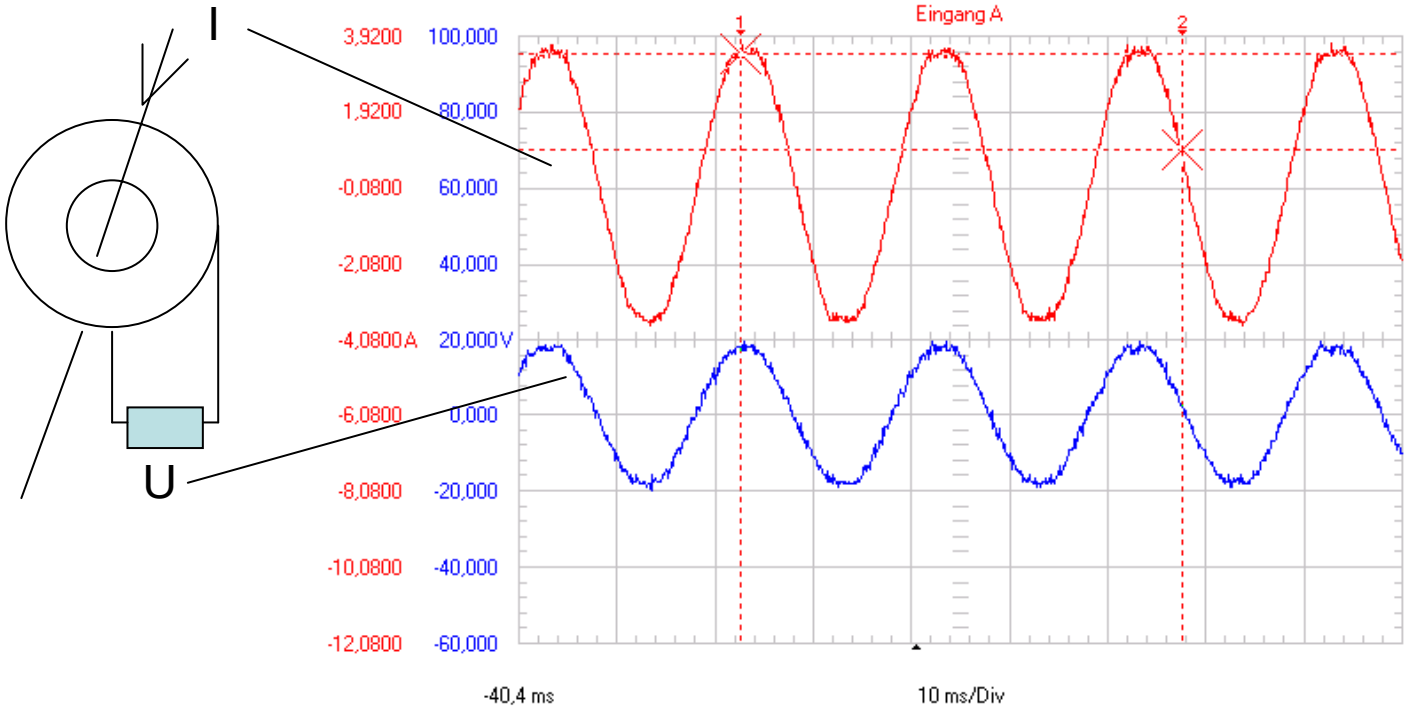


Trafo-grundlagen-17.bmp, Ringkerntrafo 1kva, von neg. Remanenz aus mit pos.kleinem Sprung. A=Utreib, B= U an Rv mit 100 Ohm, also 10mA/div

Wie Bild zuvor nur mit anderen Meßgrößen. Die blaue Kurve ist jetzt der Strom in die Spule.



Zum Vergleich, Test an Stromwandler-1. (Auch ein Trafo.)

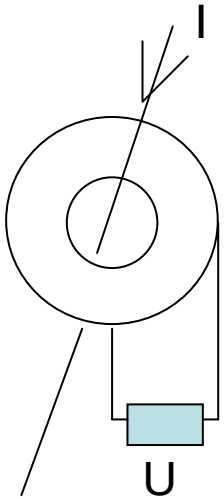


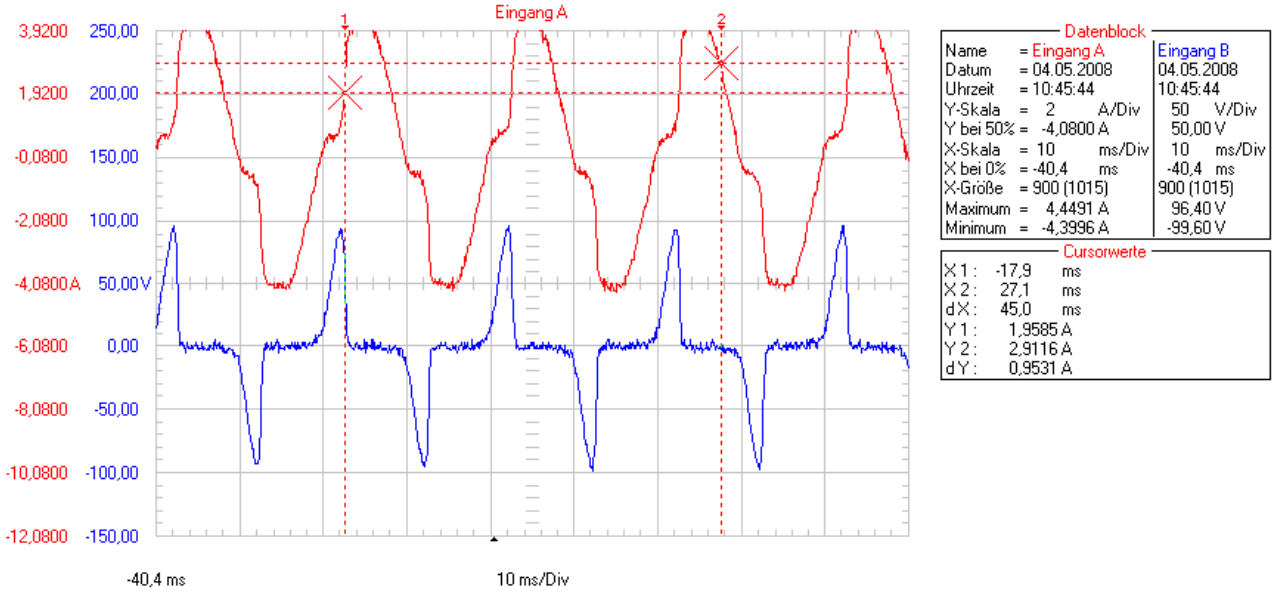
Datenblock		
Name	= Eingang A	Eingang B
Datum	= 04.05.2008	04.05.2008
Uhrzeit	= 10:43:30	10:43:30
Y-Skala	= 2 A/Div	20 V/Div
Y bei 50%	= -4,0800 A	20,000 V
X-Skala	= 10 ms/Div	10 ms/Div
X bei 0%	= -40,4 ms	-40,4 ms
X-Größe	= 900 (1016)	900 (1016)
Maximum	= 3,7360 A	19,363 V
Minimum	= -3,6871 A	-19,838 V

Cursorwerte		
X 1 :	-17,9	ms
X 2 :	27,1	ms
dX :	45,0	ms
Y 1 :	3,4697 A	
Y 2 :	0,9260 A	
dY :	-2,5438 A	

- Stromwandler VAC ZKB 465/501-03-160 A3 , Ü=50A / 0,05A. An 200 Ohm Bürde. Der Eingangsstrom beträgt 3,5 A peak. Der Wandler kann 50A und kann also durch diesen Strom bei einer 200 Ohm Bürde nicht gesättigt werden.
- An der 5k Ohm Bürde hier, stehen ca. 18V peak an. (3,5mA * 5000 V/A)
- Die Ausgangsspannung folgt dem Eingangsstrom, obwohl die Bürde zu hochohmig ist. Die treibende Spannungszeitfläche ist hier ca. 0, 130 Vsec. groß.

Test an Stromwandler-2.

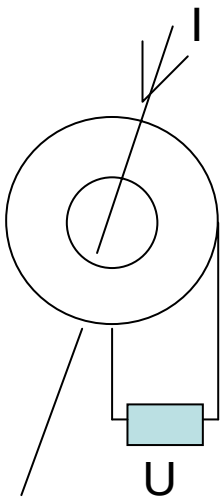


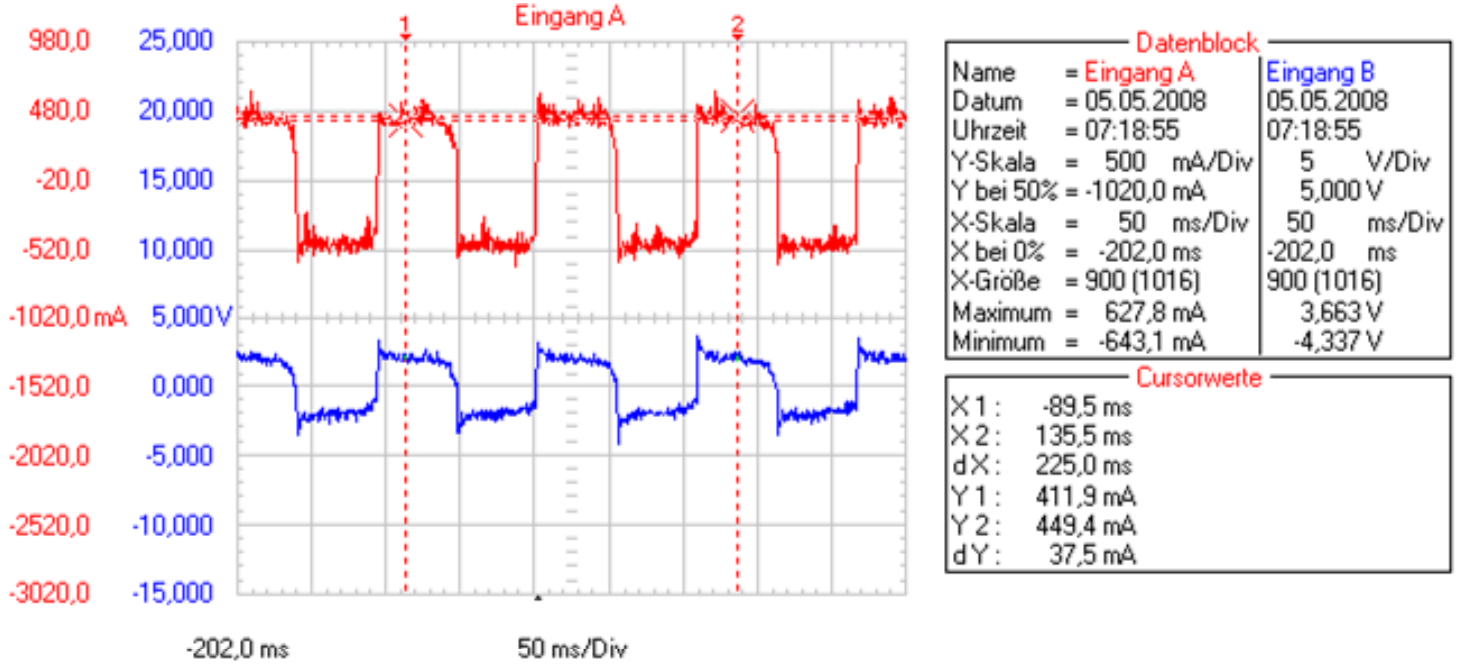


Stromwandler-test-6.bmp, wie 5 jedoch keine Bürde, also offen. Starke Sä ttigung. Eingangsstrom wird beeinflusst.

- Der Eingangsstrom ist der gleiche wie zuvor. Ohne Bürde nimmt die Ausgangsspannung stark zu und sättigt den Kern gleich nach dem ersten Drittel der Spannungskurve. Merke: Der eingespeiste Strom ist in der Amplitude gleich wie in der Folie zuvor, er ist allerdings durch die Rückwirkung der Sättigung etwas beeinflusst. (Gegen EMK.)
- Das ist ein schöner Beweis dafür, dass nicht der Strom den Kern sättigt, sondern die Spannungszeitfläche, wenn sie zu groß wird. Die max. Spannungszeitfläche des Kerns ist hier ca. 0,2 Vsec. groß. Ab da geht der Kern in Sättigung. Die treibende Spannungszeitfläche für das getreue Signal wäre bei diesem Eingangsstrom = 1Vsec. groß. (Dann müsste die blaue Kurve auch ein Sinus sein. Der Kern ist aber zu klein dafür oder die Bürde zu hochohmig.)

Test an Stromwandler-3.

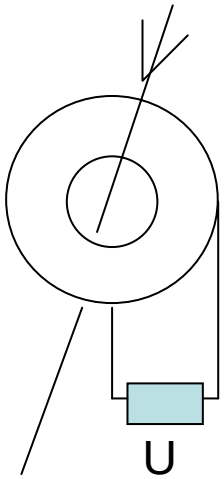


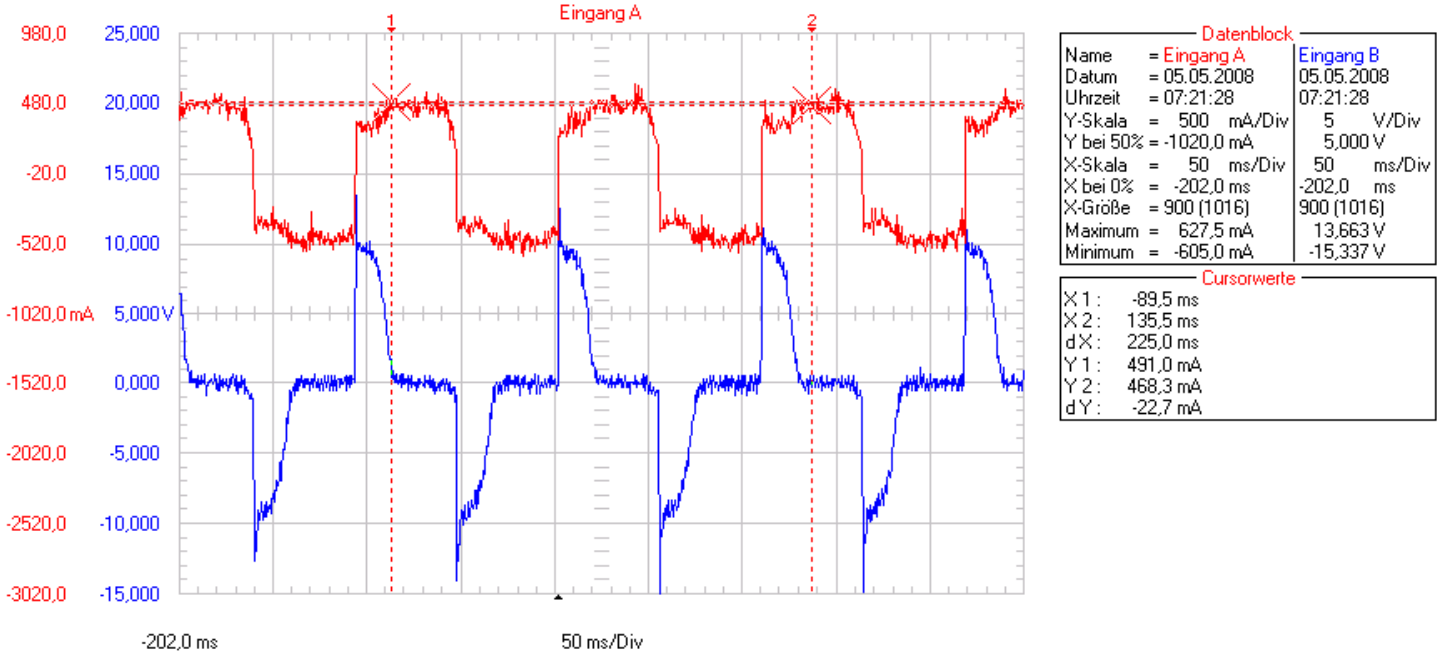


Stromwandler-test-9.bmp, wie 1 jedoch Rechteckstrom in Draht durch Wandler-Loch. mit 1k Ohm Bürde, A= Iprim, B= Usek

- Der Wandler ist nicht gesättigt bei 8Hz. Der Eingangsstrom ist nur 0,5A peak. hoch. Die Ausgangsspannung beträgt 2,5V peak. Der Kern ist nicht gesättigt. (Die treibende Spannungszeitfläche beträgt hier 0,125Vsec. Sättigung ab 0,2 Vsek.)

Test an Stromwandler-4.





Stromwandler-test-10.bmp, wie 9 jedoch ohne Bürde. A=Iprim, B=Usek. Sätt igung.

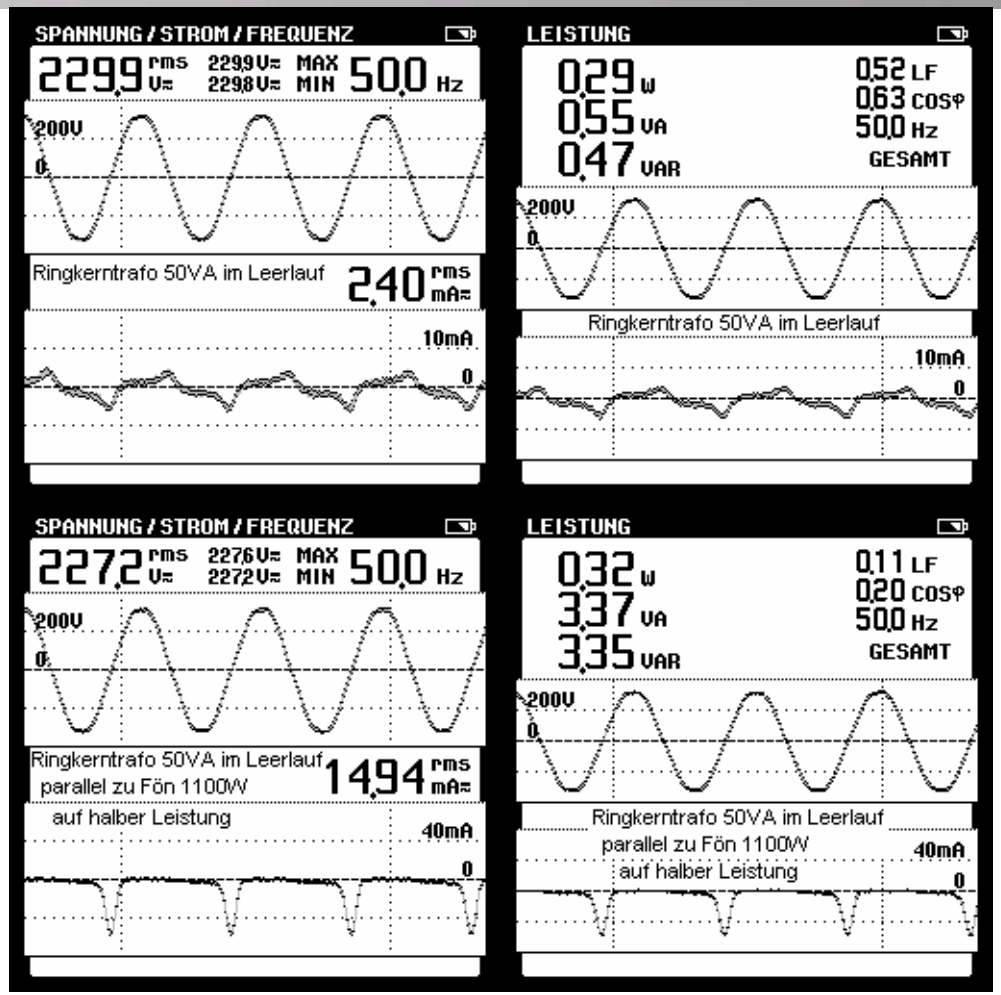
- Der Wandler ist nach 20 msec. von jeder der Spannungszeitflächen gesättigt. Die nutzbare Spannungszeitfläche ist ca. 0,2Vsec. groß. Ab da geht der Kern in Sättigung, die blaue Kurve bricht zusammen. Wie bei den Beispielen zuvor.

Fazit von Test an Stromwandler. = Beweis für die Wirkung Spannungszeitfläche.

- Stromwandler beinhalten immer einen Ringkern, weil damit die Übertragungsfehler am kleinsten sind. Deshalb fließt nur ganz wenig Strom in der Ausgangswicklung beim Transport von B auf der fast senkrecht laufenden schmalen Hysteresekurve. (Ringkerne haben ein <<H und damit einen sehr kleinen Magnetisierungsstrom.) Damit wird das Stromsignal per Wirkung des Stromhubs auf der Hysteresekurve, getreu übertragen.
- Man kann den Stromwandler als Beispiel für die **Dualität der Sichtweise** ansehen. Entweder erfolgt die Induktion über den Magnetisierungsstrom am Eingang per Amperewindung oder über die Spannungszeitfläche am Ausgang. Beide Sichtweisen sind richtig. Wenn die Hysteresekurve nur einen kleinen Hub erfährt durch die angeschlossene Niederohmige Bürde, ist die Spannungszeitfläche klein.
- **Fazit bei hochohmigerer Bürde:** Dieser Stromwandler überträgt jede Kurvenform eines Eingangsstromes getreu auf die Ausgangsseite solange die Spannungszeitfläche der am Ausgang entstehenden Spannung nicht größer als 0,2Vsec. ist.
- Von der Eingangs-Stromstärke hängt die Übertragungstreue nicht ab, siehe die Messkurven zuvor, weil diese dabei unterschiedlich war und das Signal trotzdem getreu übertragen wurde.
- Also ist auch hiermit bewiesen, dass man sagen kann, die Flussdichte B im Eisenkern wird von der Spannungszeitfläche auf der Hysteresekurve transportiert. D**er Strom kann bei offener Bürde nicht aus dem Ausgang herausfließen, ist aber als Eingangsstrom für das Durchlaufen der Hysteresekurve vorhanden.** Er ist zum Anderen bei den Kurven ohne sichtbare Begrenzung der Ausgangsspannung, als Eingangsstrom um Faktor 4 unterschiedlich ohne dass sich das negativ auswirkt oder damit eine Sättigung erreicht würde. Aber sobald die Spannungszeitfläche am Ausgang größer als 0,2 Vsec. ist pro Halbwelle, wird das Signal begrenzt. Also ist auch hier die Sicht per Spannungszeitfläche die sinnvollere und übersichtlichere weil dabei die Form der Hysteresekurve keine Rolle spielt .

Wirkung von asymmetrischen Spannungszeitflächen am Ringkerntrafo.

- Messung vom Deutschen Kupfer Institut.
- Wenn die negative Halbwelle eine etwas höhere Amplitude hat, wird die Hysteresekurve nicht mehr symmetrisch durchlaufen, sondern eine negative leichte Sättigung erreicht am Ende jeder neg. Halbwelle.
- Die Sp.Zeitfläche der neg. HW ist etwas größer.
- Hier wurde ein niederohmiger Lastwiderstand über eine Diode am Stromnetz parallel zum Trafo betrieben. **Der Strom fließt nicht über den Trafo!!** Nur die pos. Halbwellen vom Netz wurden belastet, weshalb die positiven kleiner und die negativen Halbwellen größer wurden und die resultierende Spannung dann die Hysteresekurve asymmetrisch aussteuerte.
- Fazit: Ringkerntrafos vertragen keine unsymmetrischen Spannungszeitflächen, weil Ihr Kern luftspaltfrei ist. Auch das beweist die Wirkung der Spannungszeitflächen

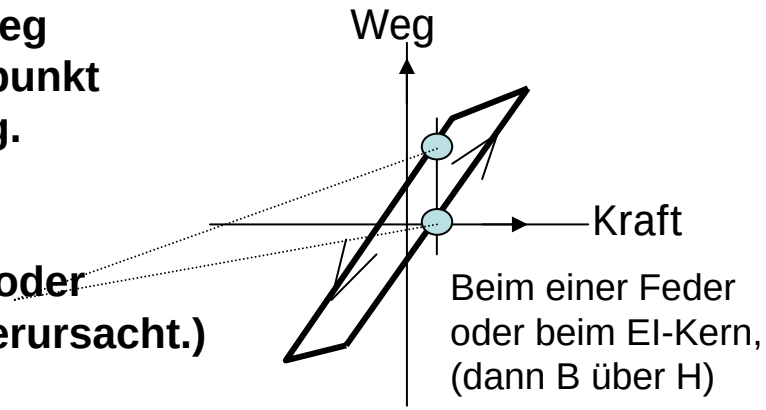


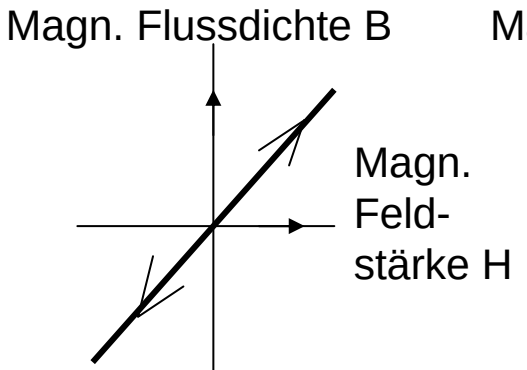
Die Ursache der Asymmetrie ist über die Spannungszeitfläche leicht zu verstehen.

Was ist eine Hysteresekurve?

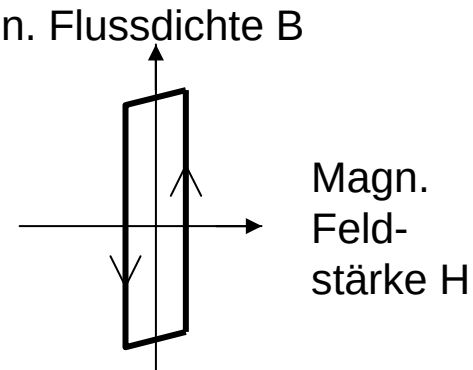
- Sie beschreibt zum Beispiel bei einer mechanischen Druckfeder den Verlauf des Federweges unter dem Einfluss der auf sie einwirkenden Kraft.
- Oder beim Magnetismus beschreibt sie den Verlauf der Flussdichte B unter dem Einfluss der Feldstärke H mit einem anderen Rück- als Hinweg.
- Aber man kann auch sagen sie beschreibt den Verlauf von H in Abhängigkeit von B und damit von der Spannungszeitfläche, die proportional zu B ist.

Zur gleichen Kraft gehört beim Hinweg ein anderer Wegpunkt als beim Rückweg. Es besteht eine Umkehrspanne. (Durch Spiel und oder innere Reibung verursacht.)





Im Magnetfeld der Luft Existiert keine Hysterese, Folglich auch keine Remanenz



Beim Ringkern ist es eine Rechteckkurve

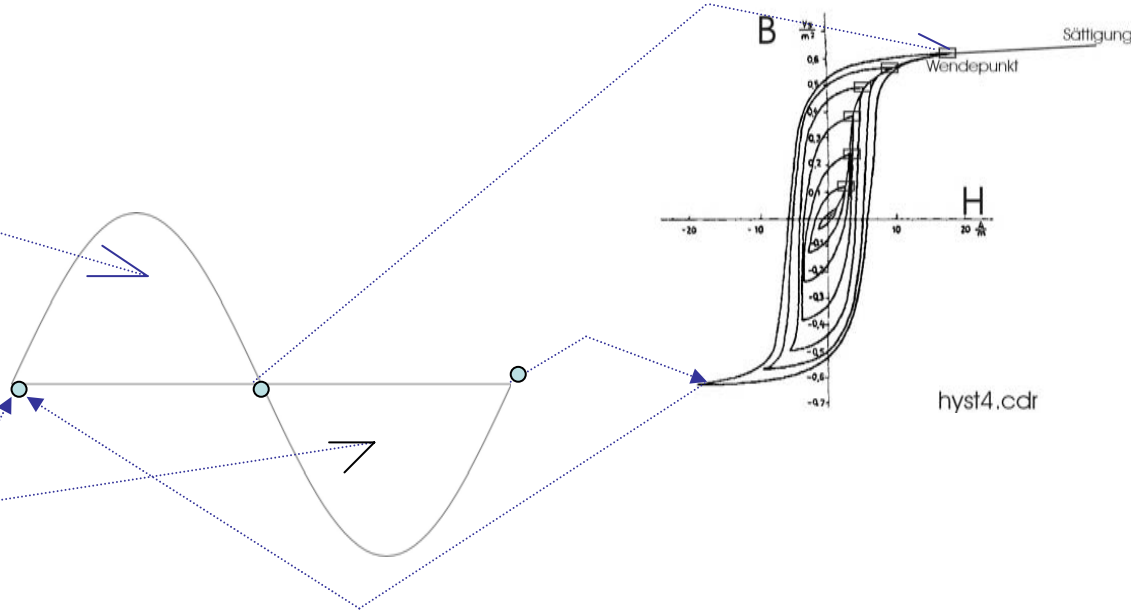
Physik im Trafo

Was im Eisenkern passiert. Wiederholung.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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

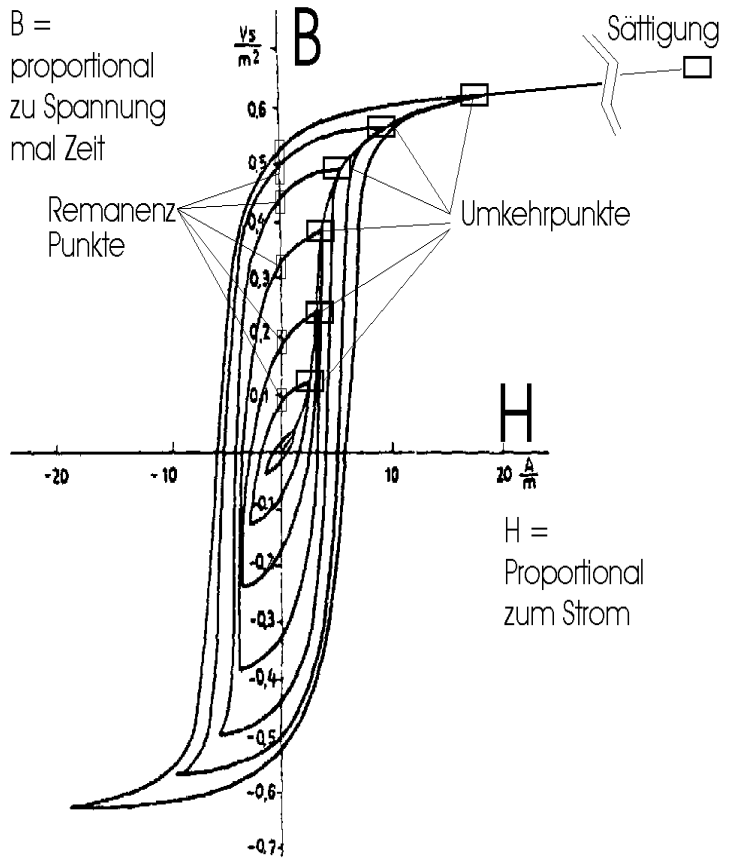
- **Im Dauerbetrieb gilt:**
- Die positive Spannungs-halbwelle transportiert die Magnetisierung B, vom negativen zum positiven Wendepunkt, Umkehrpunkt, der Hysterese-kurve.
- Die negative Spannungshalb-welle bringt B wieder zurück.
- Und so weiter.



Die **Spannungszeitfläche ist maßgebend**.
Mit der Spannungszeitfläche einer ganzen Vollwelle, siehe oben, läuft die Magnetisierung B, einmal um die Hysteresekurve um 360 Grad herum. –Man kann die Magnetisierung auch über den Strom betrachten, das ist aber viel umständlicher.

Der Verlauf von B auf der Hysteresekurve ist abhängig von der Spannungszeitfläche-1.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos



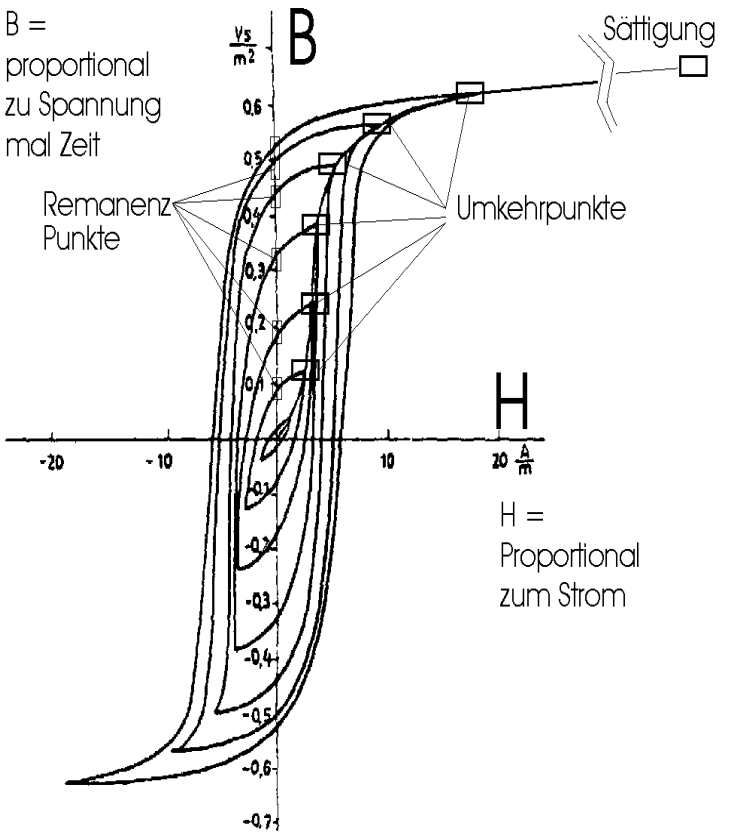
- Im Dauerbetrieb geschieht eine ständige Ummagnetisierung des Eisenkernes. (Davon lebt das Trafoprinzip der Induktion.)
- Aber Achtung, hier ist die Änderung des Magnetflusses Phi gemeint, die veränderung von B, nicht der Feldstärke H, die ja im senkrechten Teil der Hysteresekurve fast unverändert bleibt. Der größte Teil der Induktionsänderung findet im senkrechten Teil der Hyst. Kurve statt.
- Eine **Spannungs-Halbwelle** bewirkt dabei mit der Zeitdauer in der sie auf den Kern über die Primärspule einwirkt, den Transport der Magnet-Flussdichtedichte B auf der Hysteresekurve von einem Umkehrpunkt zum Gegenüberliegenden.
- Bei kleiner Spannungszeitfläche wird auf einer kleineren Kurve verfahren. Das kann durch eine kleinere Spannung **oder eine kleinere Periodendauer, höhere Frequenz,** geschehen.

Verlauf der Flussdichte B über der Feldstärke H

Physik im Trafo

Der Verlauf von B auf der Hysteresekurve ist abhängig von der Spannungszeitfläche-2.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

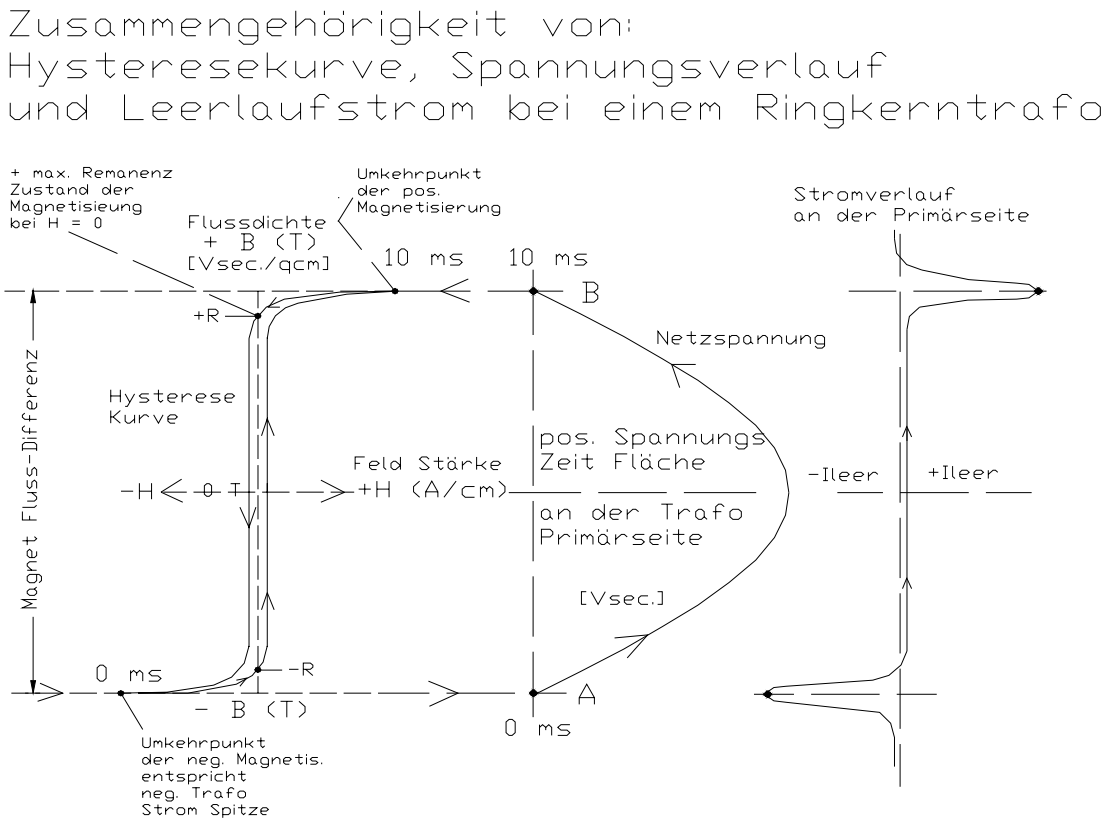


Auf welcher Hüllkurve, (Zwiebelschale), das B läuft, hängt von der Spannungshöhe und der Periodendauer, (der Frequenz), ab.
Eine kleinere Periodendauer, bei z.B.60Hz, gegenüber 50Hz, oder eine kleinere Spannungshöhe ergibt einen Umlauf auf einer mehr innen liegenden, kleineren Kurve.
Praktischer Beweis: Ein Trafo der für 60Hz ausgelegt ist und dabei einen max. Einschaltstrom von 12 mal dem Nennstrom erzeugt, der erzeugt beim Betrieb mit nur 50 Hz einen höheren Einschaltstrom von z.B. 15 mal Inenn, weil das B nun auf einer größeren Kurve läuft und damit weiter in die Sättigung gelangt.

Verlauf der Flussdichte B über der Feldstärke H

Verlauf von B über H, Spannung und Strom über dem zugehörigen Zeitverlauf gezeichnet.

- Diese Darstellung ist in keinem Lehrbuch zu finden, kann aber von jedermann selbst nachgemessen werden.
- Sie zeigt wie B durch die Spannungszeitfläche entlang der Hysteresekurve bewegt wird und wann dabei ein Strom-Peak entsteht.
- Der gemessene Leerlauf-Strom ist proportional der Feldstärke im Eisen und hat seine Spitzen an den Enden der Hysteresekurve, weil da das Eisen in eine leichte Sättigung geht. Er kann damit dem Hysteresekurven- Verlauf zugeordnet werden.
- Das ist ein weiterer Beweis für die Wirkung der Spannungszeitflächen.



Hystereskurve B über H | Spannungshalbwelle U über t | Strom I über t

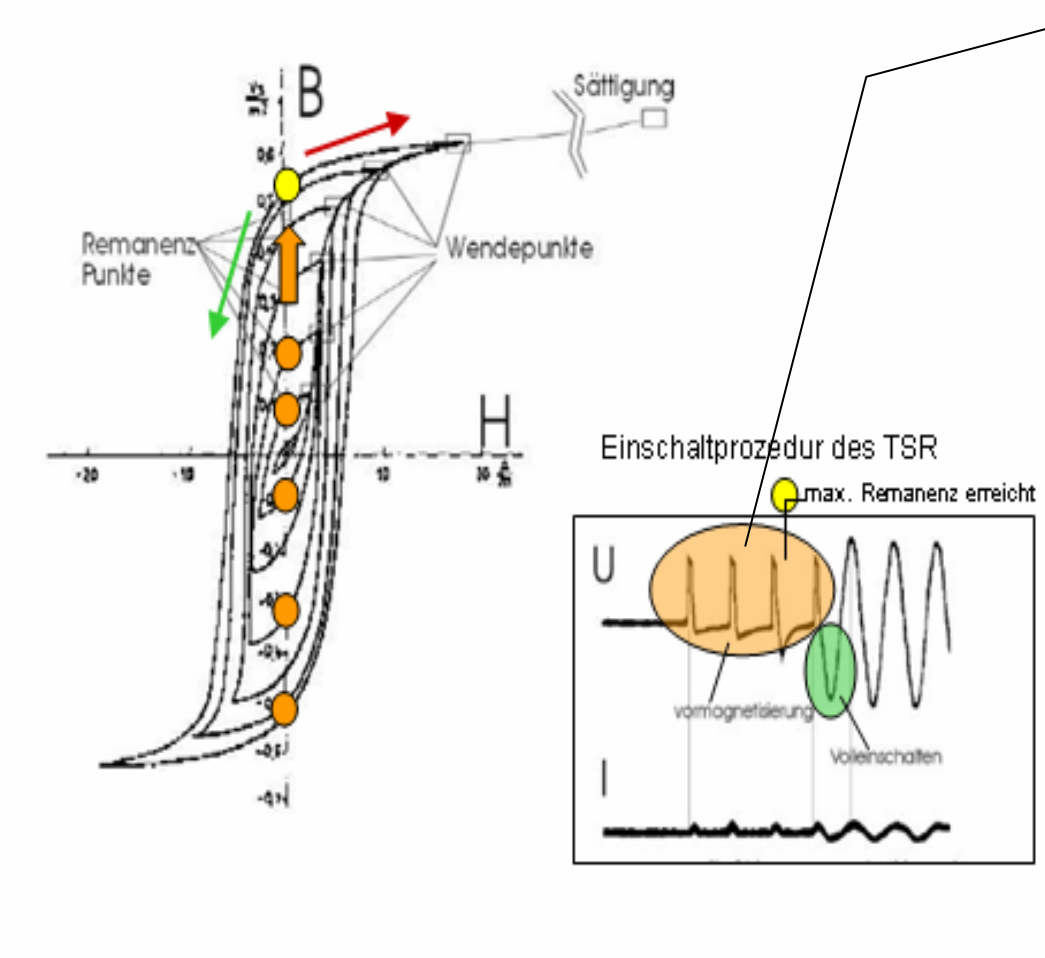
Das TSR benutzt kleine, definierte Spannungszeitflächen,

- um die Magnetisierung behutsam zu beeinflussen.

- Die Berücksichtigung der Physikalischen Gesetze und des Aussehens der verschiedenen Hysteresekurven, bei verschiedenen Trafokerntypen, ist es was das TSR Einschaltverfahren mit dem Vormagnetisieren beinhaltet.

  Die Flussdichte B wird durch die Vormagnetisierung zuerst an einen, dem TSR bekannten Punkt auf der Hysteresekurve gebracht und dann erst wird der Trafo voll eingeschaltet.

Softstart Prozedur des TSR und Wirkung auf B im Eisenkern.



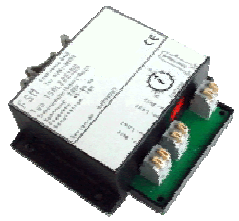
Jeder der positiven Spannungs-zipfel, (in der orange markierte Elipse,) transportiert das B von der momentanen Remanenz ein Stück höher. (Orange markierte Punkte.) Mit einer genügenden Anzahl von Spannungs-Zipfeln erreicht B somit immer den gelb markierten Punkt der max. Remanenz. Zu viele Zipfel sind **nicht** störend, weil dann jeder Zipfel das B nur vom gelben Punkt bis zum zugehörigen Umkehrpunkt, Wendepunkt, transportiert, worauf das B in der Pulspause wieder in den gelben Punkt zurückläuft. Beim anschließenden Volleinschalten, (grün markierte Ellipse,) was im Nulldurchgang beginnt, läuft dann das B sofort wie im Dauerbetrieb auf der Hysteresekurve, was der Strom zeigt.

Und wenn die Hysteresekurve nicht verlassen wird entsteht auch keine Stromspitze.

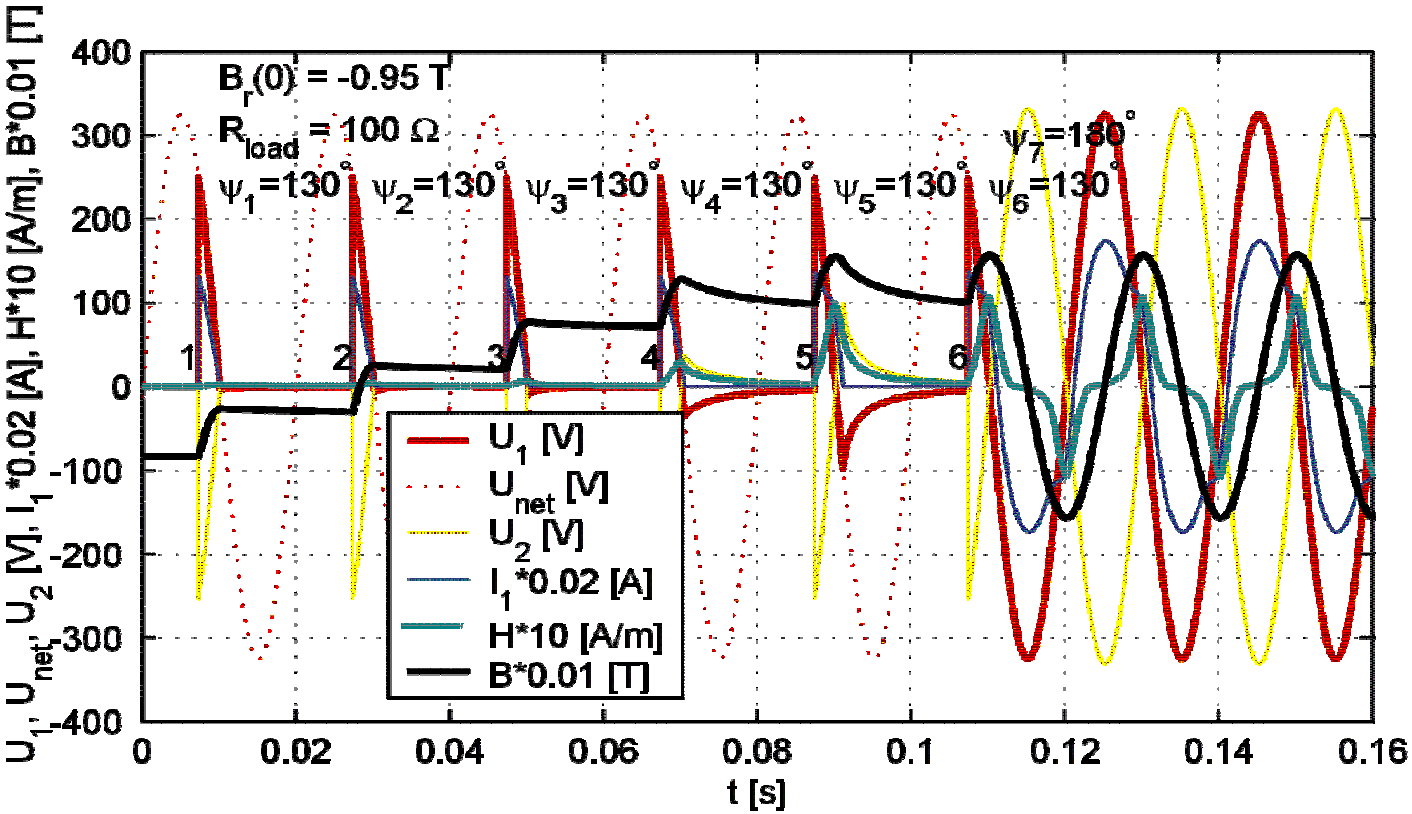
Physik im Trafo

Diese Folie der Universität Liberec in der CZ, wo das TSRL für eine Doktorarbeit durchgemessen wurde, beweist die Wirkung des Verfahrens.

Transformer soft-start an EI Kern. Start bei B = -0.95 Tesla, Max. Remanenz Punkt bei + 1 Tesla



FSM Elektronik GmbH Kirchzarten



B läuft auf der schwarzen Kurve. Der Trafo ist belastet, sinusförmiger Wirk-Strom v. 3,6ASp.

Zum Verständnis der Vorgänge im Trafo ist es wichtig zu verstehen,

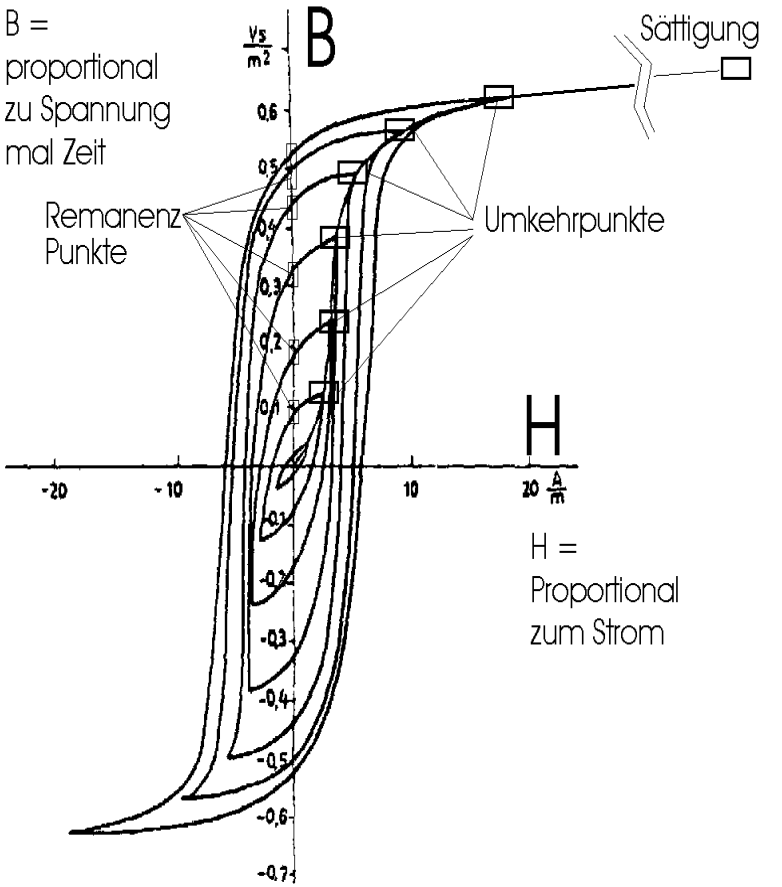
a.) dass die unipolaren Spannungszeitflächenstücke nur im linear verlaufenden Teil der Hysteresekurve, bis zum maximalen Remanenzpunkt vom Eisenkern **integriert werden** und sie damit die Magnetisierung nur in eine Richtung transportieren.

b.) Dass diese Integration und damit der Transport in eine Richtung aufhört wenn die Hystereskurve in Richtung Sättigung verlassen wird oder die Remanenz über den Max. Remanenzpunkt hinausgeht.

c.) Egal wie hoch das Eisen magnetisiert wird, auch in Sättigung getrieben wird, es stellt sich immer nur die maximale Remanenz ein, wenn die Magnetisierung durch die von außen wirkende Spannungszeitfläche vorbei ist. Weil das das Eisen eben nur bis zur Sättigung magnetisiert werden kann.

Hysteresekurve und Funktion des TSR.

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

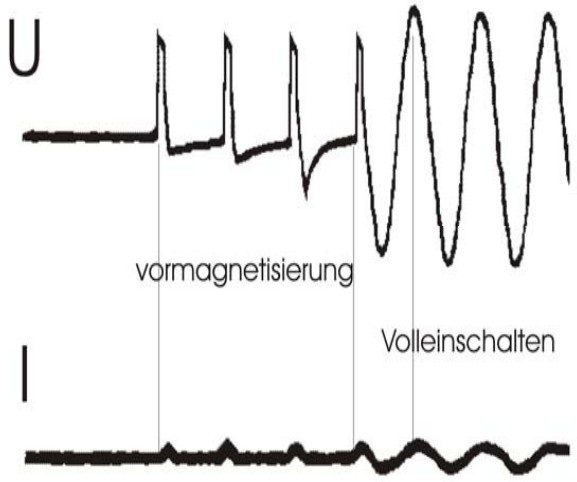


- Die unipolare Vormagnetisierung transportiert also Schritt für Schritt das B von der unbekannten Remanenz aus entlang der kleinen Hysteresekurven etwas höher. Nach jedem Schritt liegt das remanente B ein Stück höher als zuvor.
- Vor dem Ende der Vormagnetisierung wird das remanente B max. erreicht, worauf nach dem Ende eines weiteren Spannungszipfels dann voll eingeschaltet werden kann, wie es auf der vorigen Folie beschrieben ist.
- Zu viele Zipfel schaden also überhaupt nicht.
- Die Sättigung des Kernes wird somit immer vermieden, weil das B sofort nach dem Volleinschalten auf der gleichen Kurve läuft wie im Dauerbetrieb.
- Die Zipfelbreite muss allerdings an die Form der Hystereskurve angepasst werden, wozu das Poti auf dem TSR dient.
- (Das trägt dem vertikalen Abstand von B zwischen der max. Remanenz und dem Umkehrpunkt Rechnung.)

Spannungs- und Strommesskurve von der TSR Softstart Prozedur.

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

mit unipolaren fixen Spannungsabschnitten vor-magnetisiert für 60msec.



es fließt immer nur der Nennstrom.

** das TSR Verfahren ist patentiert

tseme010.cdr

- Zum Volleinschalten wird der Thyristor, der die Vormagnetisier-Spannungszipfel erzeugt, von einem Relais überbrückt.
- Das Relais hilft dem Thyristor und schützt ihn vor Ueberhitzung und vor Ueberstrom und der Thyristor hilft dem Relais und schützt es vor dem Lichtbogen beim Schalten.
- Dadurch wird eine Lebensdauer von 5 Millionen Schaltzyklen unter Nennlast erreicht.
- Das Relais alleine könnte das nur 25.000 Mal schalten bis es verschlissen ist.
- Beim Volleinschalten ist nur der Wirkstrom und keine Blindstromspitze, (Einschalt-stromspitze), zu sehen.
- Deshalb ist das TSRL auch kurzschlussfest.

Bei der Fraunhofer Gesellschaft entwickelt.

- Der Erfinder der TSR – Geräte:
- Im Emeko- Ingenieur-Büro, Michael Konstanzer.
- Hier ein Bild von 1994 aufgenommen für die Zeitschrift Fraunhofer, anlässlich der Verleihung des Fraunhofer Preises, zusammen mit TSR Prototypen und vielen Trafos.
- Bis Ende 2006 war M.Konstanzer bei Fraunhofer zuletzt in Teilzeit-Anstellung beschäftigt.
- Bis Ende 2011 war er nur noch für die Vermarktung der TSR tätig.

Der Hersteller und Weiterentwickler der TSR –Geräte seit 1998:

Fsm-Elektronik. In Kirchzarten bei Freiburg.

In 2012 mit ca. 110 Mitarbeitern.

Hysteresekurven selber aufzeichnen.

In der Literatur findet man Schaltvorschläge zum Aufzeichnen der Hysteresekurve an einem Trafo mittels Lissajous Figuren auf einem Oscilloscop.-

WWW.fh-uesseldorf.de/DOCS/FB/MUV/staniek/dokumente/hysterese.htm

Alles klar?

- Richtig verstanden hat man das ganze hier erst dann, wenn man es an verschiedenen Trafos mit dem TSR selber ausprobiert, das heißt mit Stromzange und Oscilloscop gemessen hat und zum Beispiel mit einem Trafoschaltrelais, welches auch absichtlich de-justiert wird, selber Einschaltversuche macht.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Noch mehr über die Trafoschaltrelais, TSR und deren Anwendung zu erfahren gibt es unter:

www.EMEKO.de