

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

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

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

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

Die herrschende Lehrmeinung geht davon aus, dass die Hysteresekurve durch die Wirkung des Primärstromes gesteuert wird. – Darstellung der Hysteresekurve als B über H. - H ist stromproportional.- Das soll weiterhin gelten und ist sicher richtig, wenn man die sich deutlich unterscheidenden Hysteresekurven der verschiedenen Trafotypen berücksichtigt. Neu ist auch nicht die Betrachtungsweise, dass B im linearen Teil der Hysteresekurve Spannungs-Zeitflächen proportional verläuft.

Damit vom Praktiker die Vorgänge auf einfache Weise überschaut werden können, weil mit derart kleinen Leerlaufströmen sehr unhandlich umzugehen ist und weil bei einem EI Trafo, ein viel größerer Strom für das gleiche Umlaufen der Hysteresekurve fließt, als bei einem Ringkerntrafo, wird vorgeschlagen eine für alle Trafotypen gleiche Betrachtungsweise einzuführen. Und das ist die nachmessbare These der alleinigen Beeinflussung der Magnetisierung durch die Spannungszeitflächen.

Diese zum Durchlaufen der Hysteresekurve nötige Spannungszeitfläche ist im stationären Betrieb bei allen für 50 Hz ausgelegten Trafos gleich einer Netzspannungshalbwelle und ist überhaupt nicht abhängig vom Typ des Trafos. Also unabhängig vom Kerntyp. Bei anderen Trafos als Ringkerntrafos ist wie gesagt bei gleicher Trafo-Grösse und Leistung dieser Primär-Leerlauf-Strom allerdings um mehr als 100 Mal grösser.

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

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

Eisenkern Wirkung, auch beim leer laufenden Trafo:

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

Das Eisen im Ringkerntrafokern dagegen wird schon mit geringsten Amperewindungen, das ist das Produkt aus Strom durch die Primärspule mal deren Windungszahl, entlang der Hysteresekurve ummagnetisiert und setzt durch die Gegeninduktionsspannung der Primärspule die einen Strom treiben könnende und in der Primärspule wirkende Spulenspannung sehr stark herunter und verhindert dadurch einen höheren Strom. Das gilt jedoch nur solange sich die Magnetisierung im linearen Teil der

Hysteresekurve bewegt, also dann wenn die maximale Betriebsinduktion ein gutes Stück unter der Sättigungsinduktion bleibt. Man kann auch sagen, dass beim Aussteuern des Eisens in Richtung Sättigung, diese Gegeninduktionsspannung der Primärspule stark abnimmt, weil die Hysteresekurve nun viel flacher verläuft und beim Erreichen der Sättigung völlig verschwindet.

Im Lastbetrieb eines fast idealen Ringkerntrafos

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

Der Laststrom wirkt sich grob gesehen nicht auf den Verlauf der Magnetisierung aus. Ausser, dass durch ohmsche Spannungsabfälle in der Primärspule die treibende Primärspannung etwas kleiner und damit die Aussteuerung auf der Hysteresekurve auch kleiner wird. Was bei einem Trafo mit hohem Wirkungsgrad jedoch vernachlässigbar ist. Der Eisenkern wird dabei nicht durch die sehr geringen Eisenkernverluste erwärmt. Die Erwärmung des Trafos kommt allein von den Ohmschen Verlusten in den Kupferwicklungen der Primär und Sekundärseite, die sich proportional dem Strom, der sich bei Belastung einstellt, erhöhen.

Elektrische Leistung im Verhältnis zur Trafogrösse

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

Ursache und Auswirkung des Trafo-Einschaltstroms

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

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

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

Alle vom Autor aufgestellten Thesen und Erkenntnisse sind durch Strom- und Spannungsmessungen mittels Stromzange und Speicher Oscilloscop an Ringkern- und anderen Trafos belegt. Diese Messungen beweisen im Umkehrschluss die vom Autor aufgestellten Thesen über das Verhalten des Transformators und seine Arbeitsweise. Der zeitliche Verlauf des Eingangs-Leerlaufstromes sagt aus wo sich die Magnetisierung auf der Hysteresekurve gerade befindet, präzise zumindest dann wenn der Leerlaufblindstrom sein Maximum hat, weil da die Magnetisierung genau auf einem Endpunkt der Hysteresekurve angekommen ist. Das sanfte Einschalten von Transformatoren wird an anderer Stelle ausführlich beschrieben.

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

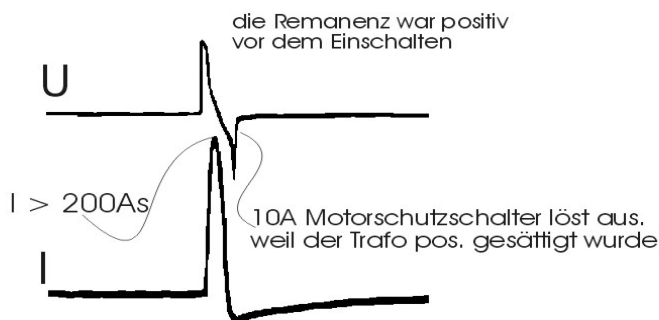
Anschauliche These: Während dem Einschaltstromstoss scheint das Eisen bei einem Ringkern-Trafo wie nicht vorhanden zu sein, weil die Magnetisierung des Eisens in diesem Fall der Sättigung der Induktion nicht mehr durch die Netzspannung geändert werden kann und deshalb der induktive Widerstand fehlt,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

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

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

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

1 kVA Ringkerntrafo mit scheinbar-schaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet.



Tseme006.cdr

Scheitel-schalter-auf-trafo1.cdr

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

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

Leider wird fälschlicherweise in der Literatur immer noch vom Einschalten im Scheitel der Spannung als dem besten Einschalt- Verfahren gesprochen.

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

Hysteresekurve im Trafoeisen im Dauerbetrieb

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

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

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

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

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

I ist der Strom

N ist die Windungszahl der Primärspule

l ist die Länge der Magnetfeldlinien im Eisen.

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

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

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

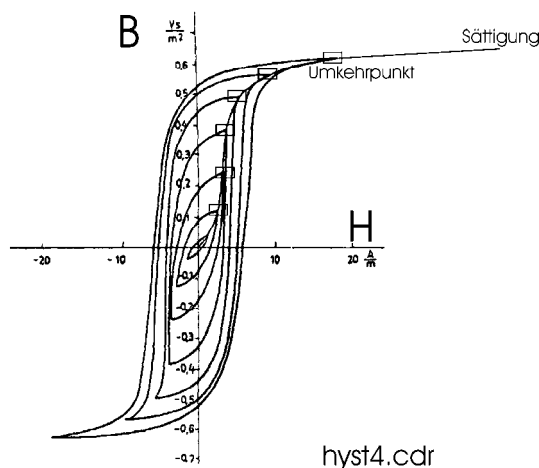


Bild 2 Hysteresekurvenfamilie im Eisenkern eines Trafos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hystereseurve eines EI-Trafos

Hystereseurve eines Ringkerntrafos

der drei definierte Luftspalte im Kern hat.

der keinerlei Luftspalte im Kern hat.

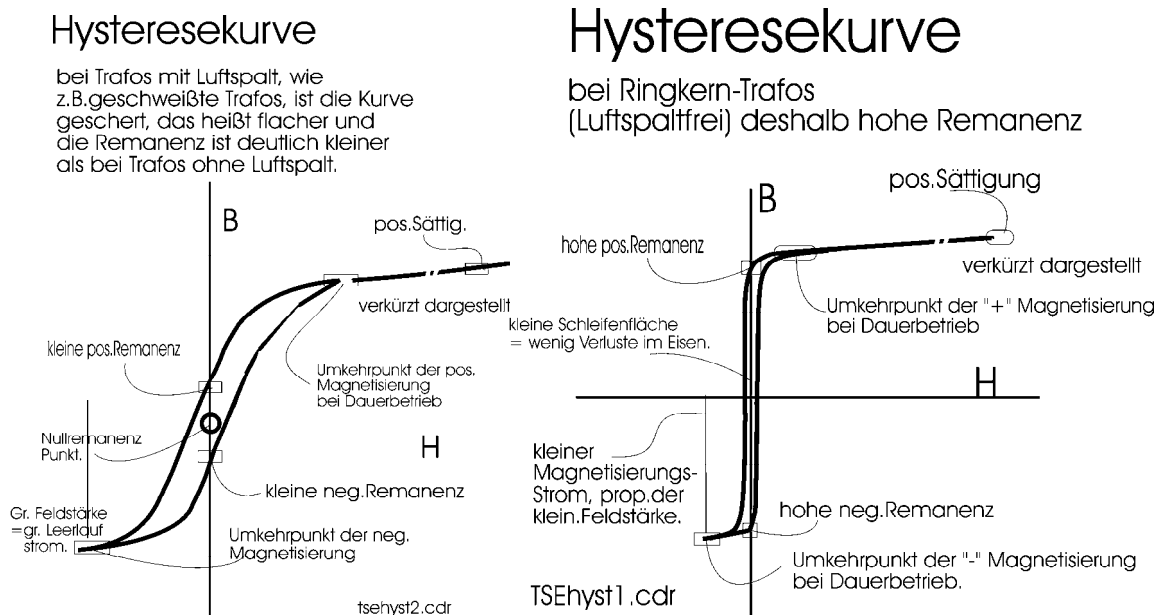


Bild 3 Je nach Eisenkern-Typ sehen die Hysteresekurven, links und rechts in Ihrer Form völlig unterschiedlich aus.

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

Die rechts in **Bild 3** dargestellte Kurve zeigt die Hystereseurve eines Ringkerntrafos der keine Luftspalte im Kern hat. Die maximale Remanenz ist dabei groß.

Durch die Induktionsänderung, das ist die Änderung der Flussdichte B, im Verlauf auf der Hystereseurve, wird dabei in der Sekundärspule die Sekundärspannung induziert. In der Mitte der Hystereseurve herrscht die Flussdichte $B = 0$. An den Umkehr-(Wende) Punkten herrscht die pos. oder neg. maximale Flußdichte.

Die magnetische Feldstärke „H“ im Trafo Eisenkern ist mit der magnetischen Flussdichte „B“ im Kern verkoppelt, wie die Hystereseurve es zeigt. (Weil die Spannungszeitfläche die Induktion B transportiert, wird hier nun so und nicht wie üblich andersherum argumentiert.) Die Feldstärke H ist also die Folge der Position von B auf der Hystereseurve.

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

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

Dieser, der Spannung um 90 Grad nacheilende Leerlaufstrom, fliesst dann aber auch bei Last und hat mit dem Laststrom aber nichts zu tun. Der Leerlaufstrom ist alleine der zur Ummagnetisierung gehörende Strom. Die Ummagnetisierung findet immer statt, egal ob der Trafo belastet oder im Leerlauf ist. Ob sich das Eisen leicht oder nur schwer ummagnetisieren lässt, ist stark abhängig vom Trafokern-typ und vom Kernmaterial.

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

Fortlaufende Hysteresekurve im Eisenkern eines 50Hz Transformators im Leerlauf

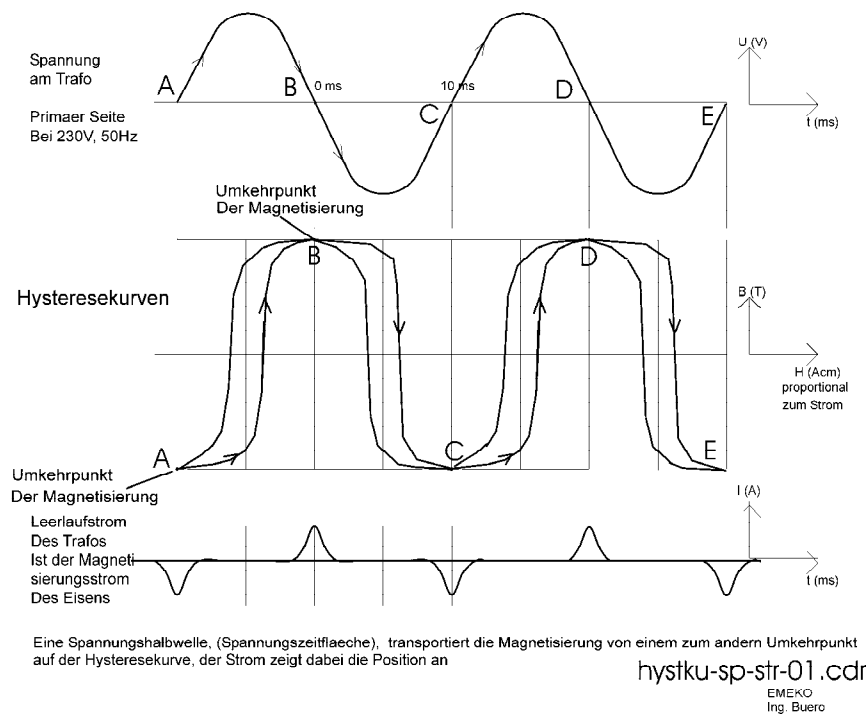


Bild 4, beim Transformator im Leerlauf. Oben. Verlauf der Netzspannung. Mitte: Abgewickelte Hysteresekurve
Unten: Leerlaufstrom = Magnetisierungsstrom

Bild 4, zeigt die folgenden Verhältnisse

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

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

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

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

Hysteresekurve und Remanenz

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

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

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

Bei der **Speisung mit Wechselfspannung**, stellt sich ein messbarer Primärstrom *beim guten* Ringkerntrafo, erst bei einer sekundärseitigen Belastung ein. Der Strom I ist dann als Leerlaufstrom in die Formel einzutragen.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Eisenkern ohne Remanenz:

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

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

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

Eisenkern mit Remanenz:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Das sanfte Einschalten von Transformatoren wird an anderer Stelle ausführlich beschrieben.