

===Eine anschauliche Betrachtungsweise der Magnetisierungs- Vorgänge im Transformator. ===

In vielen Elektrotechnischen Lehrbüchern wird zur Erklärung des Trafos von einem idealen Trafo ausgegangen, an dem man aber keine realen Messungen machen kann.

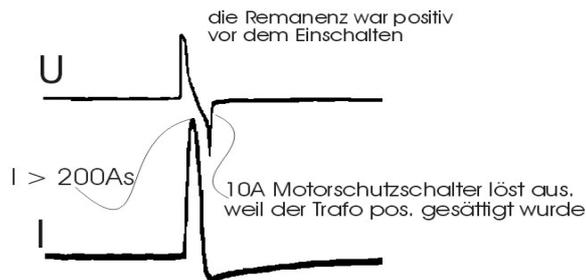
Ein idealer Trafo darf keine Leerlauf- und keine Wirk-Verluste, keine REMANENZ und keinen Einschaltstrom haben.

Ein optimierter Ringkerntrafo kann als fast idealer Trafo angesehen werden, an dem sich auch Messungen durchführen lassen. Nur hat der Ringkerntrafo leider einen hohen Einschaltstrom, den man aber durch richtiges Einschalten umgehen kann. Dann ist er ein fast idealer Trafo. Ganz ideal wäre er dann, wenn er auch noch supraleitende Spulen und gar keine Kernverluste hätte.

Die häufig zitierte Theorie des Trafo- Einschaltens im Scheitel der Netzspannung, erweist sich durch das Auftreten des hohen Einschaltstromes, siehe die Messkurve unten als falsch. Der mit mathematischen Formeln berechneter Scheitelspannungs- Einschaltzeitpunkt gilt nur für den idealen Transformator oder einen Trafo mit einem Luftspalt, der keine oder eine nur kleine Remanenz hat. Für alle andern Trafos ist dieser Scheitelspannungs-Einschaltzeitpunkt verkehrt.

Bild vom Einschalten eines Ringkerntrafos im Scheitel der Netzspannung:

1kVA Ringkerntrafo mit scheinbar-schaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet.



Tseme006.cdr

Scheitel-schalter-auf-trafo1.cdr

Im Leerlaufbetrieb und im Einschaltfall eines Ringkerntrafos kann man die Vorgänge im Trafoeisen sehr gut mit einem Oszilloscop in Form von Spannung und Strom über den Zeitverlauf nachmessen.

### „Beschreibung der Vorgänge im Eisenkern beim Trafo- Dauerbetrieb:“

Die von der Netz-Wechselspannung 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 Leerlauf-Strom, (mA) durch die Primärspule eines größeren Ringkerntransformators. Das Eisen im Trafokern erfährt dabei eine Änderung der magnetischen Flussdichte, Induktion- B genannt, deren Verlauf über die Zeit durch die Form der Hysteresekurve beschrieben ist. 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.



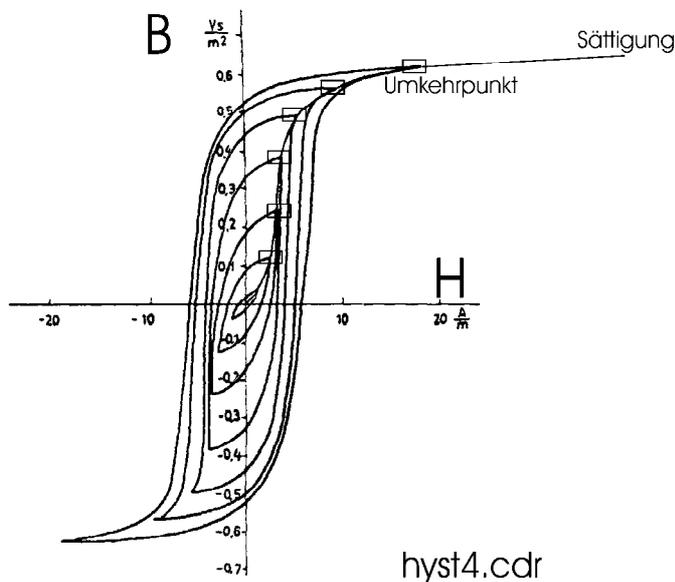
Die Hysteresekurve zeigt den Verlauf der Magnetisierung, (Flussdichte  $B$ ), aufgetragen über der Feldstärke  $H$  im Eisen.

Durch die Induktionsänderung, das ist die Änderung der Flussdichte  $B$ , im Verlauf auf der Hysteresekurve, wird dabei in der Sekundärspule die Sekundärspannung induziert. In der Mitte der Hysteresekurve herrscht die Flussdichte  $B = 0$ . An den Umkehrpunkten herrscht die positive oder negative maximale Flussdichte.

Bild: Hysteresekurve von geschichtetem Kern im Dauerbetrieb:

Hysteresefamilie im Eisenkern eines Trafos

je größer die Spannungsamplitude der Trafoprimarywicklung und je niedriger die Frequenz desto größer die Hystereseschleife



Im Dauerbetrieb des Trafos gilt:

Die Magnetisierung läuft also auf einer Hysteresekurve im Takt der Spannungshalbwellen hin und her. Auf welcher der zwiebelschalenartigen Hysteresekurve die Magnetisierung genau läuft, hängt von der Höhe der Netzspannung und der Dauer einer Spannungs-Halbwellen, (Schwingung) bei einem gegebenen Trafo ab. Bei 60 Hz oder bei einer kleineren Spannungsamplitude, ist die wirkende Spannungszeitfläche jeweils kleiner als bei 50 Hz mit Nennspannung. Deshalb läuft die Magnetisierung dann auf einer kleineren, weiter innen liegenden Kurve als beim Nennbetrieb. (Nachmessbar über die Höhe des Leerlaufstromes.)

Bei 60 Hz und gleicher Spannungshöhe ist die Einwirkungszeit kürzer als bei 50 Hz. Die Spannungszeitfläche der Halbwellen ist dann bei 60 Hz kleiner als bei 50 Hz. Das wird auch durch die Erfahrung bewiesen, dass Trafos die für 60 Hz ausgelegt sind, (USA) dann in Deutschland mit 50 Hz betrieben, einen höheren Leerlaufstrom und Einschaltstrom haben, weil die 50 Hz die Hysteresekurve weiter in die Umkehrpunkte aussteuern. Bei einer kleineren als der Nennspannung, läuft die Magnetisierung auch auf einer kleineren, weiter innen liegenden Kurve. Deshalb nimmt der Leerlaufstrom mit fallender Netzspannung ab und umgekehrt.

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

**Normalerweise bezeichnet man eine solche Kurve als die Abhängigkeit der Induktion  $B$  von der Feldstärke  $H$ .** Das macht Sinn wenn man zum Beispiel bei großen Feldstärken im Gleichspannungsbetrieb der Spule das Eisen in Sättigung treibt. Der Strom in der Spule verhält sich dabei proportional

zur Feldstärke, die Flussdichte  $B$  steigt dann nicht weiter an. Das  $\mu_r$  des Eisens ist dann ab der Sättigung gleich 1, wie bei einer Luftspule.

Man sitzt mit der Stromabhängigkeits-Betrachtung dann vergleichsweise am längeren Hebel, weil die Antwort von  $B$ , auf Änderungen von  $H$ , ausserhalb der Hystereseurve sehr klein ist

Bei Wechselspannungsbetrieb und bei Magnetisierungen Innerhalb der Hystereseurve ist es anschaulicher,  $B$  über der an der Spule einwirkenden Spannungszeitfläche zu betrachten. Die Feldstärke und damit der dazugehörige Spulen-Strom sind zum Beispiel bei einem Ringkerntrafo innerhalb der Hystereseurve verschwindend klein.

Man sitzt mit der Spannungszeitflächen-Betrachtung dann vergleichsweise am längeren Hebel, weil die Antwort von  $H$ , auf Änderungen von  $B$ , innerhalb der Hystereseurve sehr klein ist.

### **Als vereinfachte Betrachtungsweise wird deshalb empfohlen:**

Damit vom Praktiker die Vorgänge auf einfache Weise überschaut werden können, weil mit derart kleinen Leerlaufströmen sehr unhandlich umzugehen ist und weil bei einem E-I Trafo mit Luftspalt, also einem deutlich nicht idealen Trafo, ein viel größerer Strom für das gleiche Umlaufen der Hystereseurve 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, die auf die Primärspule von Transformatoren wirken.**

Diese zum Durchlaufen der Hystereseurve nötige Spannungszeitfläche ist im stationären Betrieb bei allen für 50 Hz ausgelegten Trafos gleich mit der Fläche unter einer Netzspannungshalbwelle und ist überhaupt nicht abhängig vom Typ des Trafos. Also unabhängig vom Kerntyp und seiner Größe. 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, weshalb dann bei einer Betrachtung, welche den Strom als Ursache des Magnetfeldes benutzt, man völlig unterschiedliche STROM-HÖHEN benutzen muß, um den Umlauf der Hystereseurve zu beschreiben.

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.

Übrigens ist die Dimension des Magnetflusses [Vs] was genau der Spannungszeitfläche einer Spannungshalbschwingung entspricht.

Also Spannungszeitflächen verursachen Magnetfluss. Feldstärke in Abhängigkeit des Magnetflusses ergibt einen Arbeitspunkt auf der Hystereseurve. Und diese Feldstärke verursacht den momentanen zum Arbeitspunkt gehörigen Leerlaufstrom-Betrag.

**Ohne Eisenkern:** Im Gegensatz zum Ringkerntrafo wird bei einem gleich großen Lufttransformator, welcher keinen Eisenkern besitzt, bei gleicher Windungszahl wie beim Ringkerntrafo und bei gleicher Primärspannung und Frequenz, ein Riesenstrom fließen. Eine Hystereseurve, die mit der von einem Eisenkern vergleichbar ist, existiert dabei nicht, es wirkt dabei nur die „Gerade Linie“, die einen Punkt bei 1T und 800 A/m schneidet.

**Das Eisen im Ringkerntrafo** dagegen, wird schon mit geringsten Amperewindungen, das ist das Produkt aus Strom durch die Primärspule mal deren Windungszahl, entlang der Hystereseurve 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 Hystereseurve 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 Hystereseurve nun viel flacher verläuft und beim Erreichen der Sättigung völlig verschwindet. Der „Leerlauf-Strom“ Peak für diesen Betriebspunkt nimmt dann sehr stark zu. Bei einer mit der Spannungszeitfläche einer Sinushalbschwingung ausgesteuerten Hystereseurve verläuft die  $H$  oder Strom Antwort jedoch unabhängig vom Trafotyp immer an den gleichen Zeitmarken.

Erst bei Belastung auf der Sekundär-Seite stellt sich ein messbarer Strom durch die Last ein und im Verhältnis der Trafo – Übersetzung, auch auf der Primär-Seite ein. Dieser Strom, mit der Spannung in Phase liegend, sieht auf dem Oszilloscop betrachtet jedoch ganz anders aus, als der zuvor fließende Leerlaufstrom, der teils mit der Spannung liegt und dessen Peak im Spannungsnulldurchgang am Ende der Halbwelle auftritt.

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 "fast" idealen 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.

**Remanenz im Ringkern Transformator:** Die in einem geschlossenen und luftspaltfreien Eisenkern maximal mögliche Remanenzstärke und Polarität hängt nur von der Ausschalt- Spannungszeitfläche und deren Polarität, also von der Vorgeschichte 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.

Der Ringkerntrafo, speziell sein Eisenkern, kommt in seinem Verhalten nahe an einen idealen Transformator heran, wenn man den bis dato hässlichen, hohen Einschaltstrom, der vermieden werden kann, 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 der Anschauungsweise, dass die Spannungszeitflächen den Magnetfluss und die Magnetisierung treiben, nun auch auf den Trafo angewendet werden und ist jedem Elektrotechniker sehr sympathisch. Das Verständnis der Vorgänge im Transformator ist nun auch ohne Formeln und höhere Mathematik und ohne Missverständnisse möglich. Das Verhalten des Transformators ist vor Allem leicht nachmessbar, wenn man mit einem Oszilloscop umzugehen weiss.

Auch aus diesem Grund soll hier beim Wechselspannungs-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.

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

Die Hysteresekurve eines geschachtelten Trafos mit E-I Kern, der an den Stoßstellen der Bleche 3 Luftspalte im Kern hat, ist um fast 45 Grad nach rechts gekippt und hat eine breite Hysteresekurve hat eine geringe maximale positive oder negative Remanenz. Die Hysteresekurve eines Ringkerntrafos der keine Luftspalte im Kern hat, ist sehr schmal, senkrecht stehend und hat eine große maximale Remanenz.

Bild: Hysteresekurve E-I Kern:

#### Hysteresekurve

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

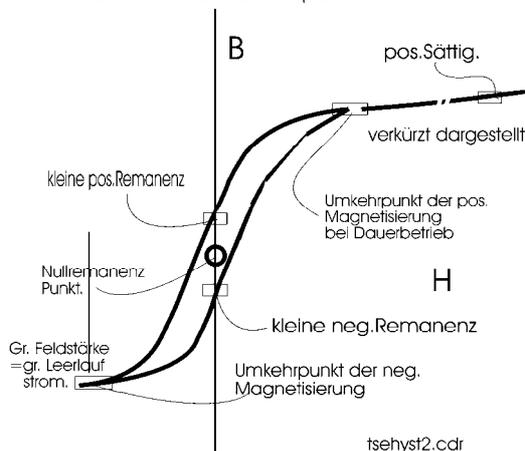
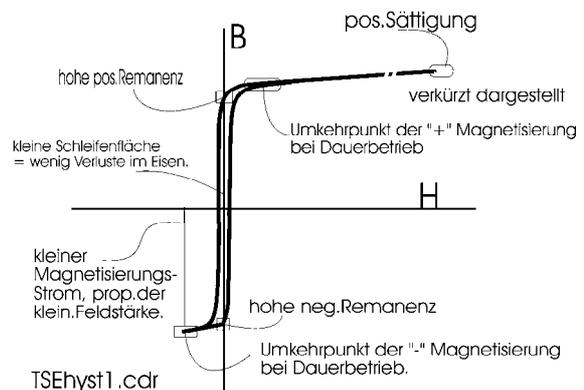


Bild: Hysteresekurve Ringkern:

#### Hysteresekurve

bei Ringkern-Trafos (Luftspaltfrei) deshalb hohe Remanenz



## Sättigung:

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 Strom und Spannungs-Messkurven vom Trafotein-schalten.-

Der Trafo sollte konstruktiv so ausgelegt sein, dass die Magnetisierung bei Nennbedingungen einer-seits 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.

Der Leerlaufstrom, welcher der Spannung um 90 Grad nacheilt, fließt auch bei Last und hat mit dem Laststrom nichts zu tun. Der Leerlaufstrom ist alleine der zur Ummagnetisierung und zum Magnet-flussaufbau 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 alleine ab-hängig vom Trafokerntyp 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 kurzgeschlos-sene 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 gleichmä-ßige Feldverteilung nur stören würde. Diese Erkenntnis wird nicht von allen Fachleuten als selbstver-ständlich angesehen, weil diese bisher davon ausgehen das Eisen ließe sich beliebig stark magneti-sieren, wenn nur die Energie dazu bereitgestellt wird.

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

[WWW.fh-duesseldorf.de/DOCS/FB/MUV/staniek/dokumente/hysterese.htm](http://WWW.fh-duesseldorf.de/DOCS/FB/MUV/staniek/dokumente/hysterese.htm).

## Trafo Berechnung:

Trafos werden bei der Berechnung so ausgelegt dass keine nennenswerte Sättigung im Eisen beim Nennbetrieb entsteht.

(Das Eisen soll möglichst nur im linearen Teil der Hysteresekurve um-magnetisiert werden.)

Die Spannung U<sub>1</sub>, 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<sub>max</sub> = 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: Je grösser die Eisenkernfläche die senkrecht zum Magnetfluss steht und je grösser die Induktion ist, desto weniger Windungen sind für eine bestimmte Betriebs-Spannung nö-tig. 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. Die Leistung eines Transformators wird dadurch noch nicht beschrieben. Hierzu ist es wichtig noch die Größe des Laststromes zu kennen. Wegen der Stromdichte von maxi-mal 2-5 A / qmm Querschnittsfläche im Wickeldraht, ist damit der Drahtdurchmesser und letztendlich der Wickelraum und damit die Kern-Größe festgelegt bzw. auszuwählen.

Zum Nulldurchgang der Spannung befindet sich die Magnetisierung wie gesagt genau im zugehörigen Umkehrpunkt der Hysteresekurve, wie es der Magnetisierungs- oder Leerlaufstrom anschaulich zeigt. 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 ist nur mit großem Luftspalt oder mit vielen verteilten Luftspalten möglich:**

Bei einem Trafo ohne bleibende Magnetisierung, Remanenz genannt, bleibt die Magnetisierung nach dem Ausschalten des Trafos nicht auf dem Punkt auf der Induktions Achse bei Feldstärke Null sitzen, welcher zum Ausschaltzeitpunkt auf der Hystereseurve gerade gegenüber steht.

Hier läuft die Magnetisierung nach dem Ausschalten der Primärspannung auf direktem Weg genau zur symmetrischen Mitte der Hystereseurve.

Transformatoren ohne Remanenz im Eisenkern haben aber große Luftspalte und sind für 50-Hz-Trafos unwirtschaftlich.

Wegen der dann geneigten Hystereseurve haben sie bei gleicher Amperewindungszahl, (magnetische Spannung), eine geringere Flussdichte im Eisen (und in den Luftspalten) und damit eine kleinere Spannung pro Windung. Es werden dann mehr Windungen in den Spulen und damit mehr Kupfer benötigt als wenn kein Luftspalt vorhanden wäre. Oder bei gleicher Windungszahl ist dann der Leerlaufstrom und damit sein Leerlauf- Verlust deutlich größer als wenn kein Luftspalt vorhanden wäre.

Nur bei Trafos ohne Remanenz, also mit Luftspalt, ist das Einschalten im Scheitel der Netzspannung richtig, egal mit welcher Polarität, weil ja dann am Anfang nur die halbe Hystereseurve durchfahren wird, wofür die halbe Spannungszeitfläche gerade richtig ist.

### **Eisenkern mit Remanenz, wenn kaum oder gar keine Luftspalte vorhanden sind:**

Bei jedem Trafo mit Remanenzverhalten läuft die Magnetisierung nach dem Ausschalten nicht einfach wie oben geschildert zur Mitte der Hystereseurve. Wo die Magnetisierung hinläuft, hängt von der Form der Hystereseurve und zusätzlich dazu vom Ausschaltzeitpunkt ab.

Wird genau im Nulldurchgang zum Ende der Speisespannungshalbschwinnung ausgeschaltet, wenn also die Magnetisierung auf dem Umkehrpunkt der Hystereseurve steht, dann läuft die Magnetisierung von dort aus auf der rückwärts laufenden Hystereseurve zum höchsten möglichen Remanenzpunkt auf der B-Achse bei Feldstärke Null. Das ist der Schnittpunkt der Kurve mit der senkrechten Achse.

Die Remanenz in Eisenkernen wurde übrigens 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. Zum Löschen der Information wurde der Kern entmagnetisiert.

Der Weicheisenkern ist hier also auch etwas dauermagnetisch, jedoch mit sehr geringer Koezitiv-Feldstärke. 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](http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/e_lehre_1/induktion/trafo.htm)**

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

Der Remanenzpunkt ist stabil und bleibt lange erhalten. Es gibt allerdings eine noch höhere und zeitlich instabile Kurzzeitremanenz die bei ganz kurzen Netzunterbrechungen von zwei bis zehn Millisekunden innerhalb einer Halbwelle, erschwerend für die Beherrschung des dann folgenden hohen Einschaltstromes zum Tragen kommt.

Das sanfte Einschalten von Transformatoren, ganz ohne Einschaltstromstoß, wird an anderer Stelle ausführlich beschrieben. Siehe Trafoschaltrelais, was mit Google oder im Wikipedia leicht zu finden ist.

Emeko, Version vom 10.02.08