

## **Verhalten von Transformatoren bei Netzstörungen wie Kurzzeitunterbrechungen.**

Nicht nur beim Einschalten, sondern auch beim Betrieb können Blindstromspitzen durch die Eisensättigung entstehen.

Geräte Entwickler müssen Ihre Produkte heute entsprechend der EMV Norm prüfen. Dazu gehört auch die Prüfung nach der Norm EN 61000-4-11, welche besagt, daß Geräte nach vorgegebenem Muster auf die nach dieser Norm erzeugten Netzunterbrechungen reagieren sollen. Geräte mit 50Hz Netztransformatoren, vor allem mit Ringkerntrafos sind besonders davon betroffen.

Hintergrund der Prüfung sind dabei die durch Netzumschalt-oder Überlastvorgänge auftretenden Kurzzeit-Netzunterbrechungen. Dabei wird unterschieden ob Geräte nach einer solchen Netzstörung unbeeinflußt weiterarbeiten oder nach kurzer Unterbrechung wieder ihren Betrieb wie zuvor aufnehmen oder von Hand neu gestartet werden müssen. Bei Geräten, welche automatisch und unbeaufsichtigt arbeiten müssen, ist das von Hand rücksetzen problematisch, wenn diese Hand nicht schnell genug zum Sicherungswechsel verfügbar ist. Ein Beispiel sei das Netzteil einer Verkehrssignalanlage für Verkehrshinweise wie sie an Autobahnen zu finden sind.

Der Artikel zeigt eine Möglichkeit wie das von Hand rücksetzen, als solcher kann ein Sicherungswechsel bezeichnet werden, entfallen kann.

### **Etwas Physik.**

Wenn ein Transformator keine kontinuierlich verlaufende Netzspannung bekommt, sondern mit deformierter, das heißt insbesondere mit lückender Netzspannung gespeist wird, können genauso wie beim Einschalten des Transformators hohe Stromstöße entstehen. Durch ein nicht symmetrisches Aussteuern der Magnetisierungskurve, durch Lücken oder plötzliche Amplitudensprünge in der Speisespannung hervorgerufen, gerät das Trafoeisen in Sättigung und ruft Spitzenströme hervor, welche noch größer sein können als beim Einschaltvorgang des Transformators im schlechtesten Fall des Einschaltens.

**Normalbetrieb:** Die Magnetisierung im Trafoeisen wird durch die Spannungszeitfläche nur **einer** Netzspannungshalbwelle, entsprechend Ihrer Polarität, von einem Umkehr-(Wende) Punkt auf der Hysteresekurve zum anderen Umkehr-(Wende) Punkt bewegt. Am Ende einer jeden Netzspannungshalbwelle ist die höchste Magnetisierung im Trafoeisen erreicht. Dort liegt zeitlich gesehen auch der Scheitel des Magnetisierungsstromes, der mit steigender Magnetisierung nichtlinear zunimmt. Deshalb hat er auch diese nicht sinusförmigen, spitzen Amplituden, welche genau im Umkehr-(Wende) Punkt der Hysteresekurve liegen.

**Störung:** Wird das Trafoeisen über den betriebsmäßigen Umkehr-(Wende) Punkt der Magnetisierungskurve hinaus, noch stärker magnetisiert, gerät das Trafoeisen in Sättigung, was durch überproportionales Ansteigen des Magnetisierungsstromes erkennbar ist. Ursache ist erstens ein Einschalten mit einer Spannungshalbwelle der gleichen Polarität wie die Restmagnetisierung, und zweitens eine plötzlich auftretende geringere Spannungszeitfläche einer Netzhalbwellen als zuvor, mit anschließend wieder normalen Spannungszeitflächen der Netzhalbwellen. Siehe die Bilder Nr. 1 bis 4.

### **Bisherige Maßnahmen.**

Transformatoren werden zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes oft mit einer Magnetisierungsreserve ausgelegt, damit man sie noch mit Motorschutzschaltern, die auf den Nennstrom eingestellt sind oder mit trägen Schmelzsicherungen absichern kann.

Magnetisierungsreserve bedeutet eine abgesenkte Induktion, auch deshalb so ausgelegt damit eine schlechtere und preiswertere Blechqualität mit höheren Verlusten verwendet werden kann. Eine weitere Maßnahme zum Absenken des Einschaltstromes ist das Vorsehen von Luftspalten.

(Gechweißte EI Trafos.) Luftspalte verschlechtern aber wiederum indirekt den Wirkungsgrad von Trafos und erfordern größere und schwerere Eisenkerne. Ebenfalls werden höhere Primärspulen-Kupferwiderstände dazu verwendet den Einschaltstromstoß zu begrenzen.

Bei Netzfehlern in Form von Halbwellenausfällen, wie sie auch in der EMV-Prüfnorm EN 61000-4-11 beschrieben sind, Testen mit dem Ausfall einer halben Halbwelle = 5 msec., verhält sich ein Trafo mit Magnetisierungsreserve, siehe Bilder 3 und 4, bezüglich der Spitzenströme jedoch genauso wie ein Trafo, der keine Magnetisierungs-Reserven und nur geringe Restluftspalte hat.

Siehe Bilder 1 und 2. – ( Der Stromstoß wird auch bei weichen Trafos nach einem Halbwellenausfall deutlich höher als beim normalen Netzeinschalten. Der Vorteil des geringeren Einschaltstromstoßes gegenüber harten Trafos existiert dann nicht mehr.) Nach dieser Norm müssen Geräte geprüft werden. --Trafos ohne Magnetisierungsreserven erzeugen auch beim normalen Netzeinschalten einen hohen Einschaltstromstoß und können nicht mit einem Motor-oder Trafoschutzschalter abgesichert werden. Einfach ausgedrückt: Beim Halbwellenausfall verhalten sich beide Typen gleich. Den Trafo mit Magnetisierungsreserve bezeichnet der Autor auch als „weichen“ Trafo, weil zusätzlich meistens ein höherer Primärwicklungswiderstand durch dünneren Drahtquerschnitt die Einschaltstrombegrenzung verbessert. Das Betriebsverhalten wird dabei natürlich verschlechtert, dieser Trafo wird heißer als nötig und ist baulich größer.

Optimierte, harte Trafos dagegen erzeugen beim Einschalten und bei Netzfehlern fast gleich große Stromspitzen. Der beim Einschalten bestehende Vorteil eines geringeren Einschaltstromstoßes von Trafos mit Magnetisierungsreserven gegenüber den optimierten Trafos ist bei Netzfehlern damit eher unbedeutend, das heißt der weiche Trafo verhält sich dann wie ein „harter“, also optimierter Trafo.

--Erklärung: Kommt die Netzspannung nach dem Ausfall wieder zurück, und zwar mit der Halbwellenpolarität mit der sie zuletzt beim Ausschalten am Trafo angelegen hat, dann entsteht eine stärkere Eisensättigung wie beim Einschalten aus dem Ruhezustand. : Die Magnetisierung läuft beim belasteten Trafo innerhalb der kurzen Netzhalbwellenausfallzeit nicht in den Ruheremanenzpunkt zurück..— Fazit: wenn weiche Trafos vor diesem Störfall nicht schützen können, dann kann man gleich steife, optimierte Trafos oder Ringkerntrafos nehmen.

**Ein optimierter Trafo** hat andererseits gegenüber einem weichen Trafo beträchtliche Vorteile, weil er z.B. als **Ringkerntrafo** einen geringeren Leerlaufstrom hat und einen höheren Wirkungsgrad und bei gleicher Leistung wesentlich weniger Gewicht als ein weicher Trafo besitzt. Außerdem wird ein harter Trafo, mit geringeren Eisen und Kupferverlusten, weniger warm und kann auch bei schwierigen Einbauverhältnissen ohne forcierte Kühlung betrieben werden. Folgende, mit einem Speicheroscilloskop, Spannungstastkopf und Stromzange aufgenommenen Bilder zeigen die Wirkung von Netzfehlern, Bild 1 und Bild 4 und das Verhalten beim Einschalten an unterschiedlichen Trafos, Bild 2 und 3.

Bild 1

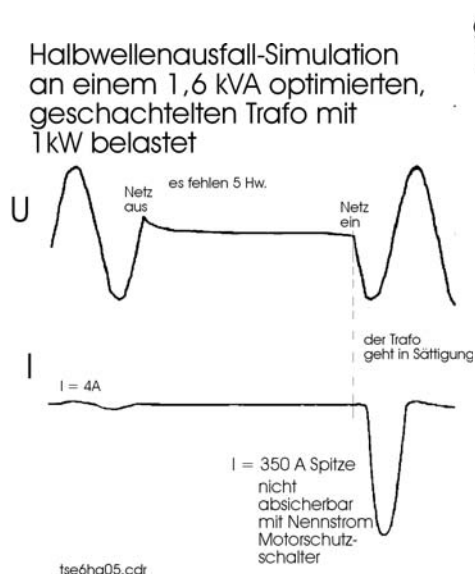
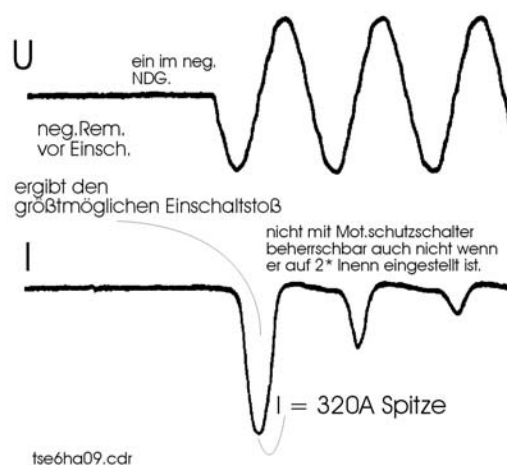


Bild 2

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



Solche Netzfehler können zum Beispiel bei Netzzusammenbrüchen durch ferne Hochspannungsleitungs-Kurzschlüsse entstehen, wie an Weihnachten 1999 durch den Sturm Lothar zu beobachten war. ( Das vom Autor beobachtete Flackern der Wohnungsbeleuchtung war kein

Wackelkontakt einer Glühbirne, sondern wurde durch Netzkurzzeitunterbrechungen erzeugt. Ein Nachziehen der Glühbirne in der Lampen-Fassung war die erfolglose erste Reaktion des Autors.) Auch das teilweise Herausrutschen eines Steckers aus der Steckdose die einen Elektronikeinschub speist, in dem ein größerer Ringkerntrafo eingebaut ist, kann diesen Effekt erzeugen. Eingebaute Einschaltstrombegrenzer schützen aufgrund ihres trägen Brückrelaisabfalls davor nicht.

Die Stromspitze von 350A Spitze ist beim Ausfall von 5 Halbwellen größer als der 35 fache Nennstrom. Siehe Bild 1. (Beim Ausfall nur einer Halbwelle ist die Stromspitze noch etwas größer.) Beim Einschalten im schlechtesten Fall, Einschalt polarität gleich Remanenz polarität, siehe Bild 2, das ergibt den größten Einschaltstromstoß, erzeugt dieser Trafo eine Stromspitze von 320A Spitze. Das ist fast genausoviel wie beim Ausfall von 1, 3, 5 ...Halbwellen. Beim optimierten Trafo ist also, wie hier durch Messung nachgewiesen, der Einschaltstromstoß beim ersten Einschalten fast genauso hoch wie bei Netzhalbwellendefekten.

Das wird von keinem passenden Motorschutzschalter mehr ausgehalten. Auch nicht wenn er wie üblich auf den nächstgrößeren Wert ausgelegt und auf den kleinsten Wert eingestellt wird. Auch überdimensionierte Gerätesicherungen lösen dabei aus. Die B-16A Leitungsabsicherung von Steckdosen löst dabei natürlich sofort aus.

( Die Messungen wurden mit einem Netzausfallsimulator an einem Stromnetz mit  $0,4 \Omega$  Innenwiderstand gemacht.)

Bei einem geschweißten Trafo ist der Einschaltstromstoß um ca 21 mal größer als der Nennstrom. Siehe Bild 3. Dieser Trafo ist gerade noch mit einem Trafoschutzschalter absicherbar. Geräte-Absicherungen auf Nennstrom ausgelegt und auch die vorgeschalteten B-16A Leitungsabsicherungen lösen dabei immer aus.

Bild 3

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

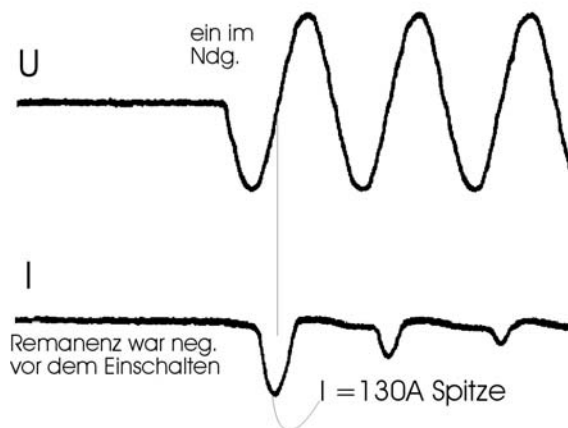
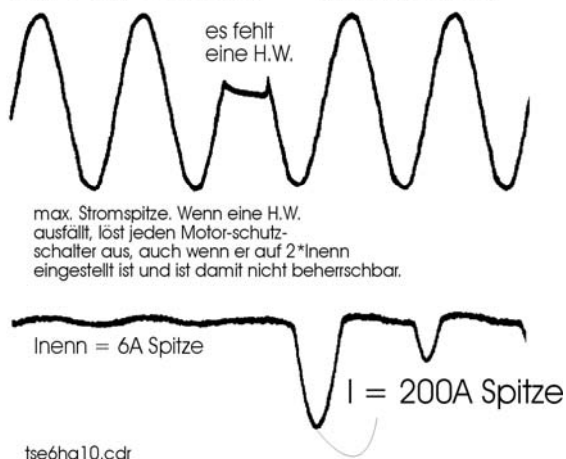


Bild 4

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



Beim geschweißten Trafo ist der Stromstoß nach einem Halbwellenausfall größer als der 33 fache Nennstrom (200 A Spitze.) Das ist deutlich größer als der Einschaltstromstoß mit nur 130 A Spitze und damit 21 fachem Nennstrom.. Siehe die beiden Bilder oben.

Wenn die Absicherung bei solchen Netzfehlern nicht auslösen darf, nützt es also nichts, einen weichen Trafo mit Magnetisierungsreserve auszuwählen.

Übliche Einschaltstrombegrenzer können auf solche kurzen Netzunterbrechungen nicht schnell genug reagieren, weil das Relais, welches den Strombegrenzungswiderstand brückt, nicht schnell genug öffnen kann und sind damit für diesen Fall als Einschaltstrombegrenzer wirkungslos.

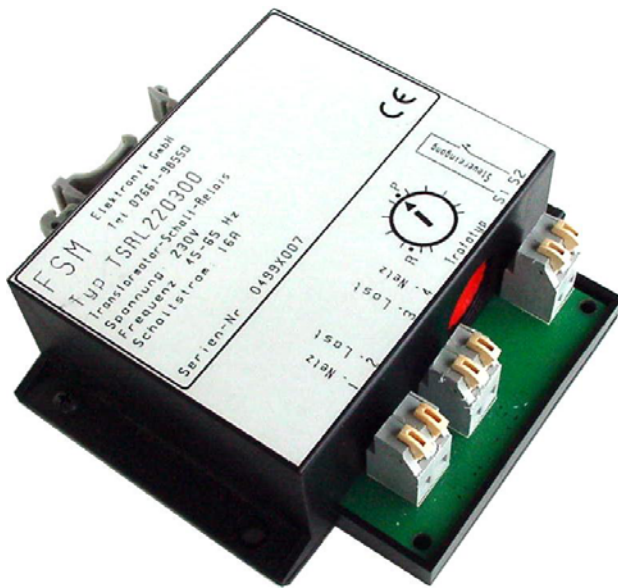
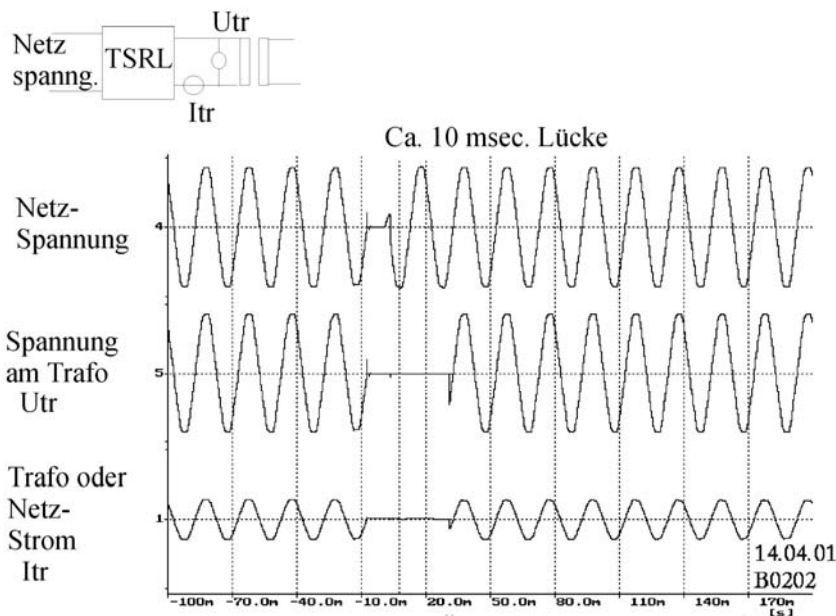


Bild 5

Ein **Transformator-Schalt Relais**, (TSR), mit schneller Halbwellenausfall Erkennung vermeidet diesen Nachteil. Siehe Abbildung oben, Bild 5. Es erkennt die beschriebenen Defekte der Netzspannung schon vor ihrer schädlichen Wirkung, trennt den Trafo sofort vom Netz und schaltet so schnell wie möglich, hier nach 40 Millisekunden wieder sanft und ohne jeglichen Einschaltstromstoß ein. Die TSR lassen sich von Trafogrößen ab 500VA wirtschaftlich einsetzen. Ein TSR kann auch mehrere Trafos schalten und schützen. Das TSR ist auch als Platine in Geräte leicht einzubauen.

Halbwellenausfalltest, TSRL vor 1kVA Ringkerntrafo.  
 Netzausfall durch Wackelkontakt erzeugt.  
 TSRL erkennt den Ausfall und verhindert die Eisen-Sättigung des Trafos. TSRL schaltet so früh wie möglich wieder ein.



In so einem Fall, nach solch einer Netzlücke, würde ein Trafo ohne TSRL davorgeschaltet voll in die Sättigung gehen..

Emeko Ing.büro  
 TSRL0201.cdr

Bild 6

Im Bild 6 ist der schnell reagierende Ausschaltvorgang und das schnelle wieder-Einschalten zu sehen. Ohne den TSRL davor würde unweigerlich die Primärsicherung auslösen.

Nach dem Ausfall von 1 Netzhalbwellen, den schlechtesten Fall für einen Ringkerntrafo überhaupt, entsteht bei Netzwiederkehr keine Stromspitze. Der Trafo liefert für die meisten Fälle auf diese Art schnell genug wieder Strom, sodaß eine Gerätefehlfunktion auch nach solchen Netzstörungen gar nicht auftritt.

Die Ursache, warum bei Trafos ohne große Magnetisierungsreserve, wie zum Beispiel bei Ringkerntrafos, der Unterschied des Einschaltstromes und des Stromstoßes bei Netzwiederkehr nach kurzen Unterbrechungen gering ist, ist folgendermaßen begründet: Die Ruhe-Remanenz ist nach langer Zeit bei diesen Trafos fast die gleiche wie nach kurzzeitigem Ausschalten von wenigen Netzhalbwellen.

Bei Trafos mit Magnetisierungsreserve in Form von geschachtelten und erst recht bei geschweißten Trafos ist der Unterschied der Ruhe Remanenz und der Remanenz nach Kurzunterbrechungen deutlich größer als bei Optimierten oder Ringkerntrafos. Je geringer die Ruheremanenz vor dem gleichpoligen Einschalten, desto geringer ist der Einschaltstromstoß.

Bei Trafos mit Magnetisierungsreserve und mit Luftspalt ist die Remanenz nach den kurzen Netz Unterbrechungen höher als nach längerer Pause.

Deshalb nützt bei kurzen Netzunterbrechungen ein Luftspalt nicht viel zum Begrenzen des Einschaltstromstoßes.

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

#### **Ein Wort für die Vorteile von Ringkerntrafos:**

Gerade für tragbare Stromversorgungen bieten Ringkerntrafos jedoch aufgrund Ihres geringeren Gewichtes gegenüber Pakettrafos deutliche Vorteile. Auch ist ihr Leerlaufstrom, Blindstrom, vernachlässigbar klein.

Durch das Einschalten mit den TSR wird natürlich auch der Einschaltstromstoß vermieden.

Die Trafoschaltrelais TSR haben zum Steuern des Einschaltens einen Steuereingang, der mit einem externen Kontakt oder mit einer 5-32V Fremdspannung bedient werden kann.

**Der Nachteil ist überwunden.** Ein Ringkerntrafo hat im Gegensatz zum immer luftspaltbehafteten „eckigen“ Trafo eine hohe Ruhe-Remanenz, weil kein Restluftspalt im Eisen existiert. Durch Netzfehler, welche wie am Anfang beschrieben, eine kurzzeitige Gleichstrommagnetisierung bewirken, ist solch ein Trafo leicht in Sättigung zu bringen, weil der fehlende Luftspalt keine Gleichstrommagnetisierung erlaubt.

Mit dem TSR läßt sich ein Ringkerntrafo nicht nur optimal einschalten, sondern auch vor den dargestellten Netzhalbwellenfehlern schützen.

**Weshalb mit Netzwechselspannung betriebene Transformatoren** immer noch Vorteile haben:

Nicht für alle Stromversorgungen von Elektronikeinrichtungen sind Schaltnetzteile geeignet, weil die erzeugten Hf Störungen nur mit großem Aufwand zu dämpfen sind. Auch ist die MTBF von Schaltnetzteilen lange nicht so groß wie die von 50Hz Trafos.

Mit der vorgestellten Applikation für die Trafoschaltrelais lassen sich alle störenden Nachteile von Netztrafos beseitigen.

Die Absicherung des Trafos kann auf der Primärseite mit Nennstrom und sogar flink geschehen.

Der Netztrafo kann besonders verlustarm und hart ausgelegt werden und für Einbauverhältnisse mit schlechter Kühlung eingesetzt werden. Der Wirkungsgrad solcher 50 HZ Klein-Trafos liegt dann je nach Größe mit 90 % bis 98 % auf jeden Fall immer noch höher als bei Schaltnetzteilen.

