

# Trafo-Einschalt-Stromstoß

## Beherrschen, verkleinern, begrenzen oder vermeiden

S. FASSBINDER, M. KONSTANZER Seit es Transformatoren gibt, kennen Fachleute die Probleme mit deren Einschalt-Stromstößen. Bereits beim Einschalten von Transformatoren ab ca. 500 VA Leistung, vor allem bei Ringkerntrafos im Haushaltsbereich, löst häufig die Sicherung aus. Die dem Trafo vorgeschaltete Gerätesicherung wird i.d.R. größer als der Nennstrom des Trafos und superträge ausgelegt und löst deshalb im echten Bedarfsfall nicht aus. Der Trafo ist dann erst durch eine zusätzliche Sekundärabsicherung im Gerät geschützt.

### Ursachen und Wirkungen des Einschalt-Stromstoßes

Die Remanenz im Trafoeisen ist das magnetische Gedächtnis des Trafos. Wird zufällig in der Nähe des Spannungs-Nulldurchgangs eingeschaltet und ist vom Abschalten her eine zur Netzhalbwelle gleichpolige magnetische Remanenz im Eisen des Trafos vorhanden, wird das Eisen in die magnetische Sättigung getrieben. Dann entsteht der größte Einschalt-Stromstoß (Bild 1).

Der Trafo hat dabei seinen *inkaktiven Widerstand weitgehend verloren*. Dieser Zustand kommt einem Kurzschluss gegen Ende der ersten Netzspannungshalbperiode gleich. Der Strom wird dabei *nur durch* die Netzimpedanz, den Spulen-Kupferwiderstand und je nach Trafotyp mehr oder weniger durch die *Streureaktanz* der Trafo-Primärwicklung begrenzt. Im Bild 1 beträgt der Einschalt-Stromstoß das 32fache des Nennstromes. Das hält keine Absicherung aus, die auf den Nennstrom ausgelegt ist. Deshalb haben Trafos mit kleinen Kupferverlustwiderständen besonders hohe Einschaltströme. Wegen der nötigen Strombegrenzung beim Einschalten kann man Trafos nicht mit sehr kleinen Kupfer-Verlusten bauen, weil dann der Einschaltstrom unbeherrschbar groß wäre. Der Fachmann erkennt das am angegebenen Wert der Kurzschlussspannung  $U_k$ . In diesem Wert  $U_k$  sind

die Kupferverluste und die Streureaktanzen der Primär- und Sekundärseite enthalten. Ein Trafo mit kleiner  $U_k$  hat deshalb einen höheren Einschaltstrom als ein Trafo mit großer  $U_k$ .

Ein steifer und verlustarmer Trafo, bis 1000 V Betriebsspannung, hat deshalb eine  $U_k$  von 2 % oder kleiner. Ein einschaltstromarmer Trafo hat eine  $U_k$  von über 4 %.

Hochspannungstrafos, also solche mit primärseitiger Hochspannung, haben aus diesem Grund eine Kurzschlussspannung von größer 4 %, damit die primärseitigen Schalter nicht zu schnell verschleiben.

### Maßnahmen gegen den Einschalt-Stromstoß

Bei einer sicher dimensionierten Anlage mit Transformatoren wird dieses Einschaltstrom-Problem nicht sichtbar. Weil man den Einschalt-Stromstoß nur am Auslösen der Primärsicherung erkennt, nimmt man ihn ansonsten nicht wahr. Wie kann man verhindern, dass die Sicherung beim Einschalten auslöst? Dazu gibt es Maßnahmen, um den Einschalt-Stromstoß zu beherrschen, zu begrenzen, zu verkleinern oder zu vermeiden. Diese Maßnahmen sind im Einzelnen:

**1) Beherrschen:** Absicherung mit trägen Schmelzsicherungen und *Vergrößern des Sicherungsnennwertes auf bis zu dreimal Trafonennstrom*. Die Sicherung dient damit nur noch als Kurzschluss-Schutz für die Zuleitung, die auch entsprechend überdimensioniert werden muss. Als Überlastschutz

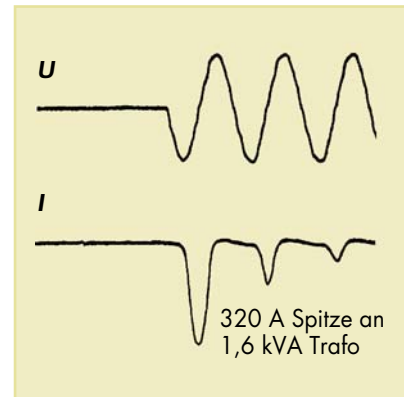


Bild 1: Negative Remanenz vor dem Einschalten ergibt den größtmöglichen Einschaltstromstoß

muss eine weitere Sicherung auf der Trafo-Sekundärseite installiert werden. Dort fließt nur der Nennstrom des Trafos, denn der Einschalt-Stromstoß tritt nur auf der Primärseite auf. Bei einer Trafoüberlastung ist der so abgesicherte Trafo besonders brandgefährdet.

**2) Verkleinern:** Einschaltstromarme Auslegung, bei welcher der Trafo auf einen maximalen Einschalt-Stromstoß von 15-mal Nennstrom ausgelegt wird. Dadurch wird der Trafo aber größer, teurer und hat mehr Verluste. Ist eine flinke Absicherung gewünscht, dann muss die Absicherung dabei vor und hinter dem Trafo erfolgen, weil die flinke primärseitige Absicherung nicht auf den Nennstrom oder die Nennstromsicherung nicht flink ausgelegt werden kann.

**3) Verkleinern und beherrschen:** Eine Einschaltstromarme Auslegung wie zuvor ist bei der Absicherung mit Motorschutzschaltern nötig: Für einen Steuertrafo mit z.B. 2,5 A Nennstrom *einen im Stromwert größeren und sehr trägen (Trafo-)Schutzschalter* mit 2,5 A bis 4 A T Auslösebereich wählen und auf 2,5 A stellen. Der Trafo braucht dann wie zuvor beschrieben eine zusätzliche sekundärseitige Sicherung. Trafo- oder Motorschutzschalter sind nur bei Einschaltstrom-armen Trafos verwendbar.

**4) Verkleinern und beherrschen:** Eine Einschaltstromarme Auslegung wie zuvor ist bei der Absicherung mit Flachautomaten nötig. Dazu einen Typ mit D- oder

Dipl.-Ing. Stefan Faßbinder, Deutsches Kupfer-Institut, Düsseldorf  
Dipl.-Ing. (FH) Michael Konstanzer, Emecko-Ingenieurbüro, Freiburg

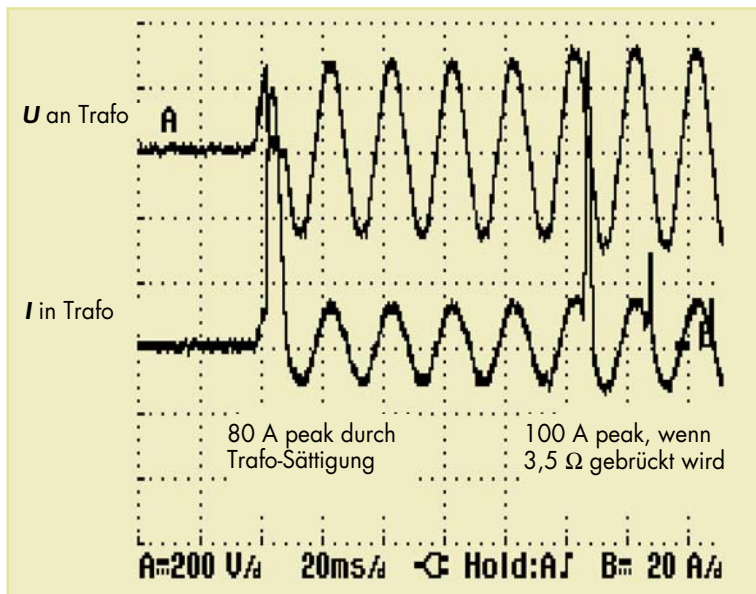


Bild 2: 2-kVA-Ringkerntrafo mit Nennlast eingeschaltet mit Einschaltstrombegrenzung TEBO2 für 230 V, 16 A, mit nach 100 msek. gebrücktem 3,5- $\Omega$ -Vorwiderstand; abgesichert mit 16 A B-Typ-Leitungsschutzschalter, der gerade noch nicht auslöst

besser E-Charakteristik wählen. Typ E hat eine flinke Auslösung bei 21-mal  $I_N$ . Der Trafo braucht dann wie zuvor beschrieben eine zusätzliche sekundärseitige Sicherung. Das geht aber nur bei Verwendung von Einschaltstrom-armen Trafos.

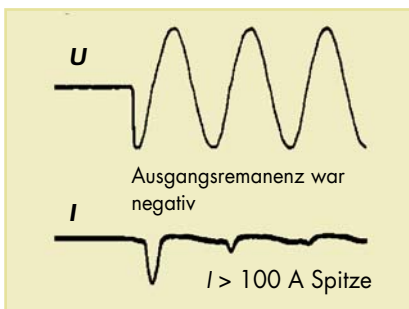


Bild 3: Geschachtelter 1-kVA-UI-Trafo mit scheidelschaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet

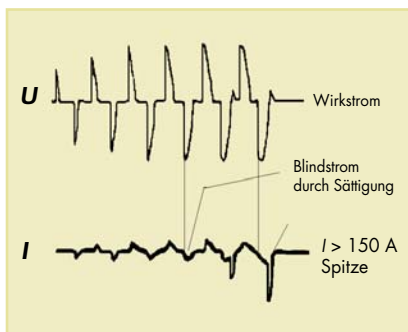


Bild 4: 1-kVA-Ringkerntrafo mit symmetrisch andimmendem Halbleiterrelais eingeschaltet; trotz Nennlast löst Sicherung aus, weil Trafo in Sättigung geht

5) **Begrenzen:** Einen *Einschaltstrombegrenzer* mit Vorwiderstand oder Heißeiter (NTC), der nach kurzer Zeit automatisch von einem Relais gebrückt wird, zwischen Schalter und Trafo-Primärseite einbauen. Das ergibt eine Begrenzung des Stromstoßes auf Werte, welche die Primärsicherung gerade noch nicht zum Auslösen bringen.

Wenn Trafos unter Last eingeschaltet werden, muss der Vorwiderstand gerade so niederohmig ausgelegt werden, dass die Sicherung bei diesem scheinbaren Kurzschlussfall nicht auslöst. Beim Brücken des Begrenzungswiderstandes entsteht unter Last ein zweiter Stromstoß. Die Absicherung kann deshalb trotzdem nicht nach dem Trafo-Nennstrom erfolgen.

Liegt jedoch hinter dem Trafo beim Einschalten ein echter Kurzschluss vor, verbrennt der Vorwiderstand, oder das Überbrückungsrelais nimmt Schaden. Außerdem muss nach jedem Einschaltvorgang wegen der Erwärmung des Begrenzungswiderstandes mindestens *eine Minute gewartet werden*, bis erneut eingeschaltet werden darf (Bild 2).

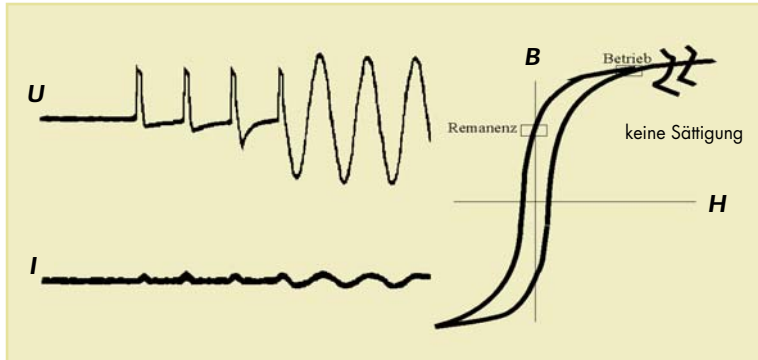
6) **Begrenzen:** Eine speziell an den Trafo angepasste *Drossel* zwischen Schalter und Trafo einbauen. Diese Drossel wird von einem Überbrückungsschalter automatisch gebrückt. Die Drossel

ist groß und teuer. Die primärseitige Absicherung muss träge sein.

**7) Mit nullspannungsschaltendem Halbleiterrelais einzuschalten,** ergibt in 50 % aller Fälle den ungünstigsten Fall (weil in 50 % der Einschaltfälle in Richtung der Remanenzpolarität eingeschaltet wird. Die Remanenzpolarität er-

deutlich größer, teurer und mit mehr Verlusten behaftet als gewöhnliche Trafos. Die bleibenden Verluste am durchgeschalteten Halbleiterrelais und das Zur-Verfügung-Stellen einer DC-Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis (**Bild 3**).

**10) Mit symmetrisch andimmendem Halbleiterrelais einschalten**



**Bild 5:** Spannungsverlauf (u.) und Stromverlauf (i.) an der Trafo-Primärseite, Trafo im Leerlauf. Die Magnetisierung bleibt immer innerhalb der Betriebs-Hysteresekurve. Mit einem TSR lässt sich der Einschaltstromstoß vermeiden

gibt sich aus der Polarität der letzten Strom-Halbwellen vor dem Ausschalten.)

Die am durchgeschalteten Halbleiterrelais verbleibenden Verluste und das Zur-Verfügung-Stellen einer DC-Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis. Für die Absicherung gilt das unter Punkt 1 Gesagte.

**8) Mit nullspannungsschaltendem Halbleiterrelais einschalten,** das so gesteuert ist, dass immer **gegenpolig zum Ausschalten eingeschaltet** wird. Die Steuerung des Schaltens und die Messung der Ausschalt polarität ist aufwendig und teuer. Es entsteht jedoch trotzdem bei jedem Schalten ein kleinerer Einschaltstromstoß. Beim ersten Einschalten nach einem Netzausfall versagt die Einrichtung vollkommen, weshalb doch wieder übersichert werden muss. Die bleibenden Verluste am durchgeschalteten Halbleiterrelais und das Zur-Verfügung-Stellen einer DC-Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis.

**9) Mit scheidelschaltendem Halbleiterrelais einschalten** ergibt nur bei Trafos mit definiertem Luftspalt befriedigende Ergebnisse. Solche Trafos haben keine magnetische Remanenz, sind aber

ergibt nur bei ohmsch belasteten Trafos, die einen Luftspalt haben, befriedigende Ergebnisse. Bei gewöhnlichen Trafos im Leerlauf oder bei solchen ohne jeden Luftspalt wie z.B. Ringkerntrafos erge-



**Bild 6:** TSR für 400 V, 32 A, zum Einschalt-Stromstoß-freien Schalten von Einphasentrafos als Platine zum Einbau in Geräte (li.) und TSR für 230 V, 16 A, im Gehäuse zum Aufrasten auf die Hutschiene oder zur Wandbefestigung (re.)

ben sich auch im belasteten Fall hohe Einschaltstromspitzen (**Bild 4**). Die bleibenden Verluste am durchgeschalteten Halbleiterrelais und das Zur-Verfügung-Stellen einer DC-Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis.

Außerdem gilt: Die Schaltkontakte zum direkten Einschalten von Trafos (in obigen Fällen 1 bis 6) müssen in Klasse AC3 ausgelegt werden, wie zum Schalten von Mo-

toren, die auch einen erhöhten Anlaufstrom haben. (Motoren haben aber nur einen Einschaltstrom bis zu max. 12-mal Nennstrom, optimierte Trafos dagegen bis zu 50-mal Nennstrom.) Der hohe Einschaltstrom lässt die Schaltkontakte sonst früher als nötig verschleifen oder gar verschweißen.

**11) Einschaltstrom vermeiden** mit einem Trafo Schalt Relais (TSR), welches den Trafo zuerst vormagnetisiert und dann im physikalisch richtigen Punkt auf der Netzspannungskurve einschaltet. Die Remanenz im Trafoeisen wird vor jedem Einschalten auf den zum Einschalten optimalen Wert gebracht.

Das Trafo Schalt Relais wird zwischen die Sicherung und die Trafoprimärseite eingebaut oder ersetzt einfach den bisherigen Schalter oder das Schütz.

Ein kleiner Schließer-Hilfskontakt kann den Einschaltvorgang starten. Das TSR lässt den Einschalt-Stromstoß niemals entstehen. Somit kann ein Trafo allein auf der Primärseite entsprechend seiner Last abgesichert werden, auch flink, selbst superflink und sogar unterhalb des Nennstroms. Das hat Konsequenzen für lange Leitungen nach dem Trafo, die

damit im Querschnitt dünner und länger werden können (bei Anlagen wichtig), weil der Kurzschluss-Strom nun sicher und allein von der primärseitigen Sicherung abgeschaltet wird.

Die Messkurve von Einschaltvorgang mit TSR zeigt **Bild 5**.

Die Einschaltstrom-Vermeider heißen TSR, Trafo Schalt Relais. Man kann diese nämlich auch zum Schalten des Trafos benut-

zen und spart dann den Netzschalter, ein Relais oder einen Schütz. Die TSR sind beim Einschalten auf einen Kurzschluss bei richtiger Absicherung des Trafos kurzschlussfest. Die Lebensdauer der TSR beträgt über fünf Millionen Einschaltvorgänge unter Vollast. Wartezeiten nach dem Einschaltvorgang sind nicht erforderlich. Durchschaltverluste entstehen nicht. Das TSR vermeidet Einschaltstromstöße im Gegensatz zu Einschaltstrom-Begrenzern auch bei sehr kurzen Netzunterbrechungen, so genannten Halbwellenausfällen.

Bei konsequenter Ausnutzung aller Vorteile, was die Absicherung, den Schalterersatz und die Trafaoauslegung betrifft, lassen sich in Verbindung mit den TSR insgesamt System-Kosten einsparen.

**Nun können Trafos endlich steifer ausgelegt werden.** Sie brauchen nicht mehr Einschaltstrom-arm gebaut werden. Die Beschränkung auf den Einschaltstrom von max. 15-mal Nennstrom entfällt, wenn man wie folgt verfährt:

Wenn die TSR verwendet werden, lassen sich Trafos nun ohne Rücksicht auf den Einschaltstromstoß vom Trafo-Hersteller berechnen. Kornorientiertes Trafoblech lässt sich generell einsetzen. Die Induktion kann auf 1,6 bis 1,7 T erhöht werden. Luftspalte lassen sich bis auf das fertigungstechnisch unvermeidbare Maß vermindern. Vor allem die Kupferverluste lassen sich durch eine Erhöhung der Kupferdrahtquerschnitte deutlich reduzieren. Ein Ringkerntrafo hat, so ausgelegt, einen Einschalt-Stromstoß von ca. 50-mal Nennstrom, der aber mit dem TSR nicht mehr auftritt. Ringkerntrafos können nun ohne Beschränkungen eingesetzt werden (Bild 6).

### Klassische Fälle für die Anwendung der TSR

- Das Stromnetz soll nicht mit den störenden Einschaltstromstößen belastet werden, damit es keine Netzspannungseinbrüche zeigt, die wiederum andere Verbraucher stören.
- Wenn Trafos mit kleiner Ausgangsspannung und hohen Strömen auf der Sekundärseite primärseitig eingeschaltet werden, ist die Absicherung auf der Se-

kundärseite problematisch und teuer. Hier hilft die Verlagerung der Sicherung auf die Primärseite ebenfalls, Kosten zu sparen. Allerdings muss dann der Einschaltstrom mittels Einsatz eines TSR vermieden werden. Hier ist das TSR ein Muss.

- Wenn Trafos mit hoher Ausgangsspannung auf der Sekundärseite primärseitig eingeschaltet werden, ist die Absicherung auf der Sekundärseite ebenfalls problematisch und teuer, weil Hochspannungssicherungen sehr voluminös und teuer sind. Dies trifft insbesondere für gleichgerichtete Hochspannung nach dem Trafo zu. Hier hilft die Verlagerung der Sicherung auf die Primärseite ebenfalls, Kosten zu sparen. Allerdings muss auch hier der Einschaltstrom mittels Einsatz eines TSR vermieden werden.

- Oft befinden sich solche Trafos beim Einschalten im Leerlauf, was es erlaubt, einen großen Trafo mit einem kleinen TSR einzuschalten, das zudem flink abgesichert ist. Anschließend wird das TSR mit einem Schütz umgangen. Die Absicherung im Einschaltkreis kann flink auf weit unter Nennstrom geschehen. Damit führen Hochspannungsüberschläge hinter dem Trafo durch Anlagenfehler nicht mehr zu Zerstörungen von Bauteilen.

- Wenn ein Trafo eine hohe Überlastbarkeit haben soll, hat er eine kleine Kurzschlussspannung, also geringe Verluste und damit einen hohen Einschalt-Stromstoß, der durch die TSR vermieden wird.

- Wenn ein optimierter Trafo bei Netzhalbwellenausfällen die Sicherung nicht auslösen darf, hilft nur das TSR.

- Wenn ein Trafo für elektromedizinische Geräte die flinke Absicherung im OP nicht auslösen darf, hilft das TSR.

- Wenn ein tragbarer Trafo leicht sein soll und trotzdem keinen Einschalt-Stromstoß haben soll, hilft das TSR.

- Wenn der Trafo in engen und wärmeaustauscharmen Gehäusen eingebaut werden muss, dann muss er verlustärmer als üblich ausgelegt werden. Besonders die Kupferverluste müssen dann reduziert werden, was automatisch den Einschalt-Stromstoß hochtreibt, der wiederum nicht von einer auf Nennstrom ausgelegten Absicherung beherrscht werden

kann. Das trifft auch zu, wenn Trafos in Fahrzeugen, wie Funkübertragungswagen usw., eingebaut werden und als Trenntrafos für von außen eingespeisten Strom vorgeschrieben sind. Dort müssen nicht nur die Verluste klein sein wegen des gekapselten Einbaus, sondern das Trafogewicht sollte so klein wie möglich sein. Bei diesem Trafo ist der Einschaltstrom ein echtes Problem. Mit dem TSR braucht die Konstruktion des Trafos auf den Einschaltstrom keine Rücksicht mehr zu nehmen.

1