

Entstörung von HiFi-Anlagen

Thomas-Michael Rudolph
TMR Elektronik GmbH, Berlin

ENTWICKLUNGSGESCHICHTE:

Seit zwanzig Jahren beschäftigt sich die Firma TMR mit Unterhaltungselektronik speziell auf dem Highend-Sektor. Mit Lautsprecherboxen haben wir seinerzeit angefangen; 1984 kam dann noch Verstärkerelektronik, d.h. speziell Class-A-Endverstärker, hinzu.

Aus markttechnischen Gründen hatten wir dann aber dieses Elektronikprojekt zurückgestellt.

1990 wurde dann die Entwicklung der Verstärkerelektronik fortgesetzt.

Zwischenzeitlich hatten wir uns einen extrem aufwendigen Meßgerätepark zugelegt, der in der Branche, glaube ich, immer noch einzigartig ist.

Bei den Entwicklungsarbeiten für die Verstärkerelektronik stellten wir fest, daß Meßergebnisse, die wir in nächtlichen Sitzungen gewonnen hatten, am nächsten Vormittag nicht mehr nach zu vollziehen waren.

Zum Teil waren zum Beispiel Klirrfaktoren vormittags um eine ganze Zehnerpotenz höher als am Abend zuvor. Man muß jedoch hinzufügen, daß dies meistens die dritte oder vierte Stelle hinter dem Komma betraf. Es war aber eben auffällig.

Im übrigen ging dies auch mit den klanglichen Eindrücken parallel.

So begannen wir, zunächst für den eigenen Bedarf, Netzfilter zu entwickeln.

Wir haben Meßmethoden entwickelt, um die Wirksamkeit verschiedener Filtertypen zu überprüfen.

Dabei sind wir auf eine Reihe von merkwürdigen Zusammenhängen gestoßen, die letztendlich zu dem vorliegenden Netzfilterkonzept von TMR geführt haben.

THEMATIK:

Unser Thema heißt aber nicht nur Netzfilter sondern etwas allgemeiner : „Die Entstörung von HiFi-Anlagen“.

Dabei sind die reinen **Netzstörungen** eigentlich nur ein **Teilaspekt** der ganzen Geschichte.

Daß elektrische Geräte von anderen elektrischen Geräten in ihrer Funktion gestört werden, ist eigentlich mittlerweile eine Binsenweisheit. Seit 1994 gibt es das europaweite **EMV-Gesetz**, das die Verantwortlichkeiten für Störausstrahlung und Störempfindlichkeit bei elektrischen Geräten regelt.

Diese Regelung ist aber nicht ausreichend.

In Flugzeugen und bestimmten Bereichen von Krankenhäusern ist mittlerweile der Betrieb von Handys, CD-Playern oder Laptops verboten, weil die von ihnen ausgesandte Störstrahlung die Funktion von anderen, hochempfindlichen elektrischen Geräten stört.

Diese Geräte sind nicht netzmäßig miteinander verbunden, sondern die Störeinstrahlung findet über die Luft statt.

Wenn durch elektromagnetische Felder Geräte sogar in ihrer Funktion gestört werden, kann man mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, daß der elektrische Signalverlauf in Hifi-Geräten ebenfalls gestört wird.

Für die Entstörung in der Hifi-Technik heißt dies, daß **Abschirmung vor elektromagnetischen Feldern** der zweite wichtige Punkt neben der reinen Netzentstörung ist.

STÖRUNGURSACHEN:

Störungsverursacher sind alle elektrischen Geräte, die entweder mit hochfrequenten Betriebsspannungen arbeiten (z. B. Taktgeneratoren für Computer, CD-Player und DA-Wandler, Multiplex-LCD-Anzeigen, Timern, Mikrowellen, Zwischenfrequenzen bei Tunern, TV, Video und DAT, HF-Vormagnetisierung bei Bandgeräten und Cassettenrekordern, Schaltnetzteilen) oder durch ihre Funktionsweise parasitäre transiente Störspannungen (Induktion, mechanische Schalter, Thyristor-Schalter, Kollektor-Motoren) oder Gleichspannungen (Leistungsregelung von Haartrocknern) erzeugen.

Man erkennt hier deutlich, daß die meisten Störungsverursacher im eigenen Haushalt, wenn nicht sogar in der eigenen HiFi-Anlage zu finden sind.

MASSNAHMEN GEGEN STÖREINSTRALUNG:

Was kann man als HiFi-Interessierter gegen diese Störungen tun ?

- Zunächst einmal sind die Hersteller der **Geräte** selbst gefordert. Eine Konstruktion der einzelnen Anlagenkomponenten gemäß den geltenden EMV-Vorschriften reicht zwar aus, um die reine Funktion der Geräte zu gewährleisten, aber eine Signalbeeinflussung und damit eine gehörmäßige Veränderung ist damit nicht ausgeschlossen.

Nach unserer Ansicht ist die Aufgabe von HiFi-Geräten allein die unverfälschte Reproduktion des originalen Inhalts des Tonträgers, egal ob CD, Schallplatte oder Band. Daher ist die störungsfreie Weiterleitung des Signals vom Tonträger zum Schallwandler die Hauptaufgabe bei der Entwicklung von Komponenten.

Dem Gehäusematerial von Hifikomponenten kommt daher eine große Bedeutung zu.

Man findet Kunststoff-, Eisenblech- und Aluminiumblech-Gehäuse auf dem Markt. Die Wirksamkeit dieser Gehäusematerialien hängt mit der Besonderheit von elektromagnetischen Wechselfeldern zusammen.

Magnetische und elektrische Wechselfelder durchdringen einander und stehen mit ihren Feldlinien senkrecht (90°) zu einander. Die Energie befindet sich abwechselnd im magnetischen und elektrischem Feld.

Ferromagnetische¹ Stoffe wie Eisenblech erzeugen Wirbelströme, deren Magnetfeld so groß wie das einstreue Feld, jedoch diesem entgegen gerichtet ist. Dadurch wird das zwar das magnetische Störfeld aufgehoben. Das elektrische Feld wird aufgrund der schlechteren Leitfähigkeit von Eisenblech im Vergleich zu beispielsweise Kupfer oder Aluminium nur teilweise abgeschirmt.

Leider hat Eisenblech als Gehäusematerial die fatale Eigenschaft, magnetische Felder, die in einem bestimmtem Teil der Audio-Schaltung, beispielsweise im Netzteil, erzeugt werden, aufgrund der guten magnetischen Leitfähigkeit in andere Bereiche der Audio-Schaltung, beispielsweise in die Eingangsstufe, weiter zu leiten und damit in den Leiterbahnen Störspannungen zu erzeugen.

Daher ist Aluminium als Gehäusematerial aus vielen Gründen erste Wahl. Gegen magnetische Felder ist zwar Aluminium aufgrund seiner paramagnetischen¹ Eigenschaften fast wirkungslos; aber dank der vergleichsweise guten elektrischen Leitfähigkeit können äußere elektrische Felder die Schaltung im Inneren des Gerätes kaum beeinflussen. Wird das elektrische Feld kurzgeschlossen, so kann sich als Folge davon auch nicht das zugehörige magnetisches Feld aufbauen.

Übliche Kunststoffe schützen kaum gegen elektromagnetische Wechselfelder von innen und außen.

Die Gehäuse der TMR-Verstärker sind komplett aus Alu-Blech gefertigt, zudem sind Netzteil und beide Stereokanäle elektrisch und mechanisch voneinander getrennt und durch ein separates Gehäuse von einander entkoppelt.

Die TMR-Netzfilter sind zweifach mit einem Eisenblech und einem Alublech-Gehäuse abgeschirmt.

- Neben den **Abschirmeigenschaften der Gehäuse** muß selbstverständlich auch Augenmerk auf die **Verbindungsleitungen und Stromverteiler** gelegt werden. Alle Leitungen und Verteiler sollten ebenfalls abgeschirmt sein.
- Da die empfangene Störspannung proportional der Länge der als Antenne dienenden Strom- oder Signalleitungen ist, empfiehlt sich in jedem Fall, **alle Leitungen so kurz wie möglich** zu halten.
- Stromversorgungsleitungen sollten möglichst weit von Signalleitungen verlegt werden.
- Geräte, die über nicht abgeschirmte Netztrafos verfügen, sollten **nicht übereinander** gestellt werden.
- Die **elektrischen Potentiale**² zwischen Schutzleiter und Gehäusemasse sollten bei den einzelnen Geräten **möglichst gering sein**, damit die Potentialausgleichsströme zwischen den Geräten ebenfalls möglichst gering sind. Daher empfiehlt sich das phasenrichtige Anschließen der einzelnen Netzstecker.
- Als letzte Maßnahme ist der **Einsatz von Netzfiltern** empfehlenswert.

Diese haben jedoch nur optimale Wirkung, wenn nach dem Netzfilter keine weiteren Störungen in die Geräte einstreuen können.

Zusätzlich muß auch der Einsatzort der Netzfilter innerhalb einer Anlagenkonfiguration beachtet werden. Je nach Einsatzort treten die unterschiedlichsten Effekte auf. Dies hängt mit der Wirkungsweise der Netzfilter zusammen.

Hochwertige Netzfilter reflektieren bei sachgemäßem Einsatz nur die Störungen.

Nur ein kleiner Teil der Störungen wird durch sogenannte Y-Kondensatoren über den Schutzleiter abgeleitet. Die maximale Höhe des sog. Ableitstrom wird von VDE-Richtlinien auf einen kleinen Wert begrenzt.

Um den Einsatz von Netzfiltern herrscht immer noch vielerorts Unkenntnis.

Netzfilter sind keine schwarzen Kisten, die man einfach vor ein Gerät schaltet, damit es anschließend besser klingt. Wer so an die Sache herangeht, wird keinen Erfolg haben.

Netzfilter wirken in beide Richtungen, d.h. sowohl zum Gerät wie auch zum Stromnetz hin.

Das Hauptproblem bei der Anwendung von Netzfiltern liegt eigentlich nicht im Einsatz gegen Störungen aus dem Stromnetz; hier ist die Anwendung problemlos. Je besser, d.h. je wirksamer das Filter, desto größer die positive klangliche Auswirkung.

Anders sieht es mit den Störungen aus, die vom zu schützenden HiFigerät selbst ausgehen.

Ohne Netzfilter werden die hochfrequenten Störungen am niedrigen Innenwiderstand des öffentlichen Stromnetzes kurzgeschlossen.

Beim Einsatz eines hochwirksamen Netzfilters wird das Netz für die vom Gerät ausgehenden Störungen hochohmig. Um die Wirkungsweise weiter zu verstehen, müssen wir uns leider etwas in die Niederungen der HF-Technik begeben.

Durch die Abkopplung der hochfrequenten Störungen vom Stromnetz wirkt die Netzleitung des Gerätes bis zum Netzfilter wie ein offener Schwingkreis, also eine Antenne. Je nach Störfrequenz und Netzleitungslänge bildet sich am sog. Fußpunkt der Antenne, in diesem Fall am Netzteil des HiFi-geräts, ein Störstrom- oder Störspannungsmaximum. Eine drastische Verschlechterung des Klanges kann die Folge sein.

Zudem kann sich noch der Wellenwiderstand der Netzleitung bemerkbar machen. Je Leitungsinduktivität und -kapazität wird ein Teil der Störenergie am Netzfilter reflektiert und ins Gerät phasenverschoben zurückgeschickt. Leider wirkt sich auch dieser Umstand nur klangverschlechternd aus.

Speziell bei analogen Geräten wie Vorverstärker und - hier besonders - Endstufen wirkt sich der letztere Umstand besonders fatal aus, da die vom Gerät erzeugten Störkomponenten im Nutzsignalfrequenzbereich liegen.

Hier kann man dann die merkwürdige Situation erleben, daß ein technisch weniger aufwendiges und daher sogar unter Umständen preiswerteres Netzfilter zu besseren klanglichen Ergebnissen als mit dem hochwirksamen Netzfilter führen kann, wenn keine weiteren, noch später zu erläuternden Zusatzmaßnahmen getroffen werden.

Speziell bei Geräten, die entweder nur über eine einfache Netzteilsiebung verfügen und daher besonders viele Störungen durch die Ladevorgänge im Netzteil produzieren, oder bei Röhrenendstufen, die mit ihren Netzteil eine Aufwärtstransformation vornehmen (Sekundärspannung > 250V) und daher auch im gleichen Verhältnis die Störspannungen herauftransformieren, kann sich eine effektive Netzfilterung ohne weitere Maßnahmen klanglich negativ auswirken.

Bei Röhrengeräten kommt noch hinzu, daß die Störstrahlung in der Regel durch die offen stehenden Röhren völlig ungehindert in das jeweilige Gerät eindringen kann; diese würde aber normalerweise zumindest teilweise durch den niedrigen Innenwiderstand des Stromnetzes kurzgeschlossen werden, bei Verwendung eines Netzfilters würden diese Störungen wieder ins Gerät reflektiert werden

Bei üblichen Geräten, die über eine Abwärtstransformation verfügen (250V zu z.B. 60V) werden auch in der Regel diese Störspannungen hinuntergeteilt, wenn sie nicht noch zusätzlich durch eine kapazitive Kopplung weitergeleitet werden.

Sind die hochfrequenten Störspannungen einmal in der Audioschaltung, werden sie wie in einem einfachen Rundfunkempfänger, einem sog. Geradeausempfänger, in den Halbleitern oder Röhren demoduliert, d.h. gleichgerichtet. Übrig bleiben nur noch die Amplitudenschwankungen der hochfrequenten Störspannungen; diese liegen in der Regel im Hörbereich.

SPEZIALNETZKABEL:

Aus all dem oben aufgezählten ist zu folgern, daß man zwischen Gerät und Netzfilter ein Element einfügen muß, das die Störungen zwischen Gerät und Netzfilter so weit wie möglich eliminiert.

Dazu dienen unsere speziellen Netzkabel mit Absorbtienswirkung.

Bei unseren Kabeln ist jede Ader einzeln von einer Ferritpaste ummantelt.

Ferrit ist ein Material, das sich sehr leicht magnetisieren läßt.

Ein stromdurchflossener Leiter baut ein Magnetfeld mit einer bestimmten Polarität um sich herum auf. Wechselt die Stromrichtung, wird das alte Magnetfeld abgebaut und ein neues mit entgegengesetzter Polarität aufgebaut.

Natürlich geht dieser Vorgang stufenlos bzw. im Sinne des fließenden Stromes vor sich.

Bei diesem Auf- und Abbau wird Arbeit geleistet, d. h. Energie verbraucht.

Man spricht hier von sogenannten Ummagnetisierungsverlusten. Je hochfrequenter der fließende Strom ist, desto stärker ist das Magnetfeld, das aufgebaut wird, und desto größer sind natürlich die Ummagnetisierungsverluste.

Wir haben also eine Leitung, bei der mit zunehmender Frequenz des fließenden Stromes die elektrischen Verluste stark zunehmen. Hier wird also störende Energie in Wärme umgewandelt.

Aus elektrischen und klanglichen Gründen empfehlen wir vorzugsweise das TMR NK2 mit 3x 2.5 qmm Leiterquerschnitt.

NETZFILTER IM ALLGEMEINEN:

Hochwertige Netzfilter gibt es eigentlich schon ziemlich lange; nur wurden sie früher hauptsächlich im Medizinelektronikbereich, in der Forschung und bei sensiblen Fertigungsmaschinen angewendet.

Netzfilter ist dabei nicht gleich Netzfilter. Theoretisch darf sich selbst ein kleiner Kondensator, parallel zu Phase und Null, schon als Filter bezeichnen. Der Kondensator bildet dabei, je nach Wert des Kondensators, für sehr hohe Frequenzen einen Kurzschluß. Manchmal ist dann noch eine klitzekleine Spule in der Phase in Reihe geschaltet.

Dies ergibt dann die bekannten Stecker-Netzfilter für um die fünfzig D-Mark. Die Wirksamkeit ist natürlich begrenzt und ist hauptsächlich durch einen flachen Dämpfungsverlauf im Megahertz-Bereich gekennzeichnet.

TMR-Netzfilter beginnen mit ihrer Dämpfung sehr früh und erreichen bei 10 kHz bereits eine Dämpfung von 20 dB. Die maximale Dämpfung bei optimalem Filterabschluß liegt bei ca. 90 dB und ist bereits im Schnitt (je nach Filtertyp) bei ca. 300 kHz erreicht. Die Filtercharakteristik setzt sich dann auf diesem Level bis in den Megahertz-Bereich fort.

Dies sind Spitzenwerte, die von keinem vergleichbarem Filter auf dem Markt bis jetzt erreicht oder gar übertroffen worden sind.

Die TMR-Netzfilter sind aus mehreren hintereinander geschalteten PI-Gliedern aufgebaut. Trotzdem sind die TMR-Netzfilter durch extrem aufwendige und hochbelastbare Ferritkerne sehr niederohmig, so daß Leitungsverluste vernachlässigbar sind.

Die Vorstellung, daß durch den Einsatz von Netzfiltern die Dynamik eingeschränkt werden könnte, entspringt einem Mißverständnis beobachteter klanglicher Effekte bei nicht sachgemäßem Einsatz oder einfach der Tatsache, daß sich durch die Klirrfaktorreduzierung auch eine Reduzierung des subjektivem Lautstärke-Empfindens einstellt.

Auf deutsch: Reduziere ich den Klirrfaktor in meiner Übertragungskette, sinkt die Lästigkeit; man kann lauter hören, ohne das Gefühl zu haben, an der Grenze angelangt zu sein.

Das Gegenbeispiel wäre ein Transistorradio mit einer Ausgangsleistung von 5 Watt, wo man beim vollen Aufdrehen schnell das Gefühl unerträglicher Lautstärke bekommt.

Zudem kennt jeder erfahrene „Highender“ das Phänomen, daß je authentischer eine Kette Musik reproduziert, oberflächlich betrachtet, die Musik immer „unspektakulärer“ wirkt. Das dennoch Spektakuläre liegt dann in der Erfahrung neuer Nuancen und Details und in der Ermüdungsfreiheit beim Hören.

Dies genau vermag eine Netzfilterung, richtig ausgeführt, zu leisten.

Wichtig ist auch der richtige „Abschluß“ des Filters. Die Filter haben nur für definierte Abschlußwiderstände (Impedanzen) eine definierte Filterwirkung. Die Impedanz der Last (in unserem Fall das zu schützende Hifigerät) läßt sich aus dem Laststrombereich des Gerätes (überschlägig erkennbar an den Werten der Gerätesicherung) berechnen (Impedanz = Netzspannung (250-230V) / Laststrom). Natürlich schwankt die Lastimpedanz der Geräte entsprechend ihrem Stromverbrauch.

Diese Tatsache wird von den meisten anderen Herstellern von Netzfiltern speziell für die Audioelektronik, meist Nachzügler auf dem Markt, nicht beachtet.

Die TMR-Netzfilter sind nach 3-5-8-16 Ampere gestaffelt.

Von ihrer Konstruktion sind sich jeweils TMR FS3 und TMR FS8, bzw. TMR FS5 und TMR FS15 ähnlich. Aufgrund ihrer besseren Filterwirkung sind die letzteren (FS5 und FS15) vorzuziehen, wenn es der dafür vorgesehene Etat zuläßt.

Andere Konzepte:

Trenntrafos:

Das Hauptanwendungsgebiet für Netzfilter sehen wir in der Trennung von analogen und digitalen HiFi-Geräten.

CD-Player, Laufwerk und Wandler, Tuner und Videorekorder sollten tunlichst vom Rest der Anlage getrennt werden.

Schaut man sich die betreffenden Geräte an, so wird man feststellen, daß die meisten Geräte der Schutzklasse II mit Schutzisolierung entsprechen.

Erkennbar ist dies an einer zweiadrigen Netzleitung mit Euro-Stecker.

Der Schutzleiter wird also nicht mit von der Steckdose zum Gerät geführt.

Meistens wird dies von den Herstellern gemacht, um Brummschleifen zu vermeiden.

Genau das ist normalerweise die Aufgabe eines Trenntrafos.

Einen CD-Player der Schutzklasse II mit einem Trenntrafo abzukoppeln, ist also, wie man volkstümlich sagt „doppelt gemoppelt“. Die zusätzlich denkbare Filterwirkung ist mehr als bescheiden.

Natürlich hat man, wenn VDE-gemäß sämtliche Geräte einzeln über einem Trenntrafo angeschlossen sind, einen hervorragenden Schutz vor asymmetrischen Störungen, d.h. vor Störspannungen, die zwischen jeweils einem Leiter und dem Schutzleiter auftreten könnten. Dies stellt aber eine extrem teure und aufwendige Lösung dar, die der Vollständigkeit halber in jedem Fall durch Netzfilter mit symmetrischer Störunterdrückung ergänzt werden müßten.

Bei stromintensiven Geräten wie Endstufen stellt zudem der Innenwiderstand und die Belastbarkeit des Trenntrafos eine nicht zu vernachlässigende Größe dar.

Gleichanteilunterdrückung im Stromnetz:

Mittlerweile sind Geräte auf dem Markt erhältlich, die einen eventuellen Gleichstromanteil in der Stromversorgung herausfiltern sollen.

Nach unseren Erfahrungen hat ein Gleichstromanteil, wenn er eine bestimmte Größe nicht überschreitet, keinen Einfluß auf das Nutzsignal, da spätestens auf der Sekundärseite des Netztrafos der Gleichstromanteil wieder verschwunden ist.

Allerdings reagieren manche Netztrafos besonders „knurrig“ auf einen Gleichanteil im Stromnetz, so daß bei bestimmten HiFi-Geräten der Einsatz dieser Geräte schon von Nutzen ist.

Die Trafos in den TMR-Verstärkern haben sich aufgrund ihrer Konstruktionsweise bisher als weitgehend unempfindlich gegen einen Gleichanteil im Stromnetz erwiesen.

Andere Netzkabel:

Ein gutes Netzkabel benötigt einen möglichst dicken Leiterquerschnitt und eine wirksame Abschirmung. Zusätzlich kann durch eine Ferritummantelung eine Störunterdrückung erzielt werden.

Andere Konzepte sind für uns derzeit nicht nachvollziehbar.

Spannungsstabilisierung:

Ein äußerst nützliches Gerät stellt, wenn es richtig konstruiert wird, ein Spannungsstabilisator dar.

Hier werden Spannungsschwankungen manuell oder automatisch ausgeglichen.

Je nach Auslastung des Netzes kann die Spannung zwischen 200V und 250V schwanken.

Nicht nur die abgegebene Verstärkerleistung kann sich verändern, sondern auch die Arbeitspunkte der Audio-Schaltungen können nicht mehr optimal liegen und so eine deutliche Klangverschlechterung hervorrufen.

Leider sind Konzepte, die für den Einsatz in High-End-Anlagen geeignet sind, sehr aufwendig und entsprechend kostspielig.

Bei preiswerten Lösungen besteht die Gefahr, sich durch den Einsatz von z.B. Thyristor-Schaltungen neue Störungen einzuhandeln und den Innenwiderstand des Stromnetzes zu verschlechtern.

Wie geht man bei einer Entstörung einer HiFi-Anlage planmäßig vor ?

1. Austausch aller Netzkabel durch abgeschirmte Netzkabel bzw. TMR-Absorptionskabel
2. Austausch aller Verteiler durch abgeschirmte Steckdosenleisten
3. Einsatz eines oder mehrerer Netzfilter vor den digitalen Komponenten (CD-Player, usw.)
4. Einsatz eines oder mehrerer Netzfilter vor den analogen Komponenten (Verstärker, usw.)

Der Einsatz einer Filterkombination, d.h. eines Geräts mit Steckdosen für jeweils digitale und analoge Geräte, ist nur dann sinnvoll, wenn eine totale elektromagnetische Abschottung zwischen beiden Filterkreisen gewährleistet ist.

Optimale Voraussetzung für eine ideale Stromversorgung für die HiFi-Anlage läßt sich erreichen, wenn man die Möglichkeit zur Installation von Drehstrom (Dreiphasenstrom) hat.

Beispielsweise kann man eine Phase nur für die HiFi-Anlage, eine weitere für die Beleuchtung und die letzte Phase für Haushaltssteckdosen usw. einrichten.

Eine komplett abgeschirmte und gefilterte HiFi-Anlage sendet keinen „Elektro-Smog“ aus.

Anmerkungen:

¹ **Permeabilität:** Verhältnis von mag. Flußdichte zu mag. Feldstärke

Diamagnetisch: Permeabilitätszahl < 1

Paramagnetisch: Permeabilitätszahl > 1

Ferromagnetisch: Permeabilitätszahl $\gg 1$

² Die **Potentialdifferenz** ergibt sich aus dem Anschluß des Trafos ans Stromnetz. Der Anfang und das Ende einer Trafospulenwicklung hat jeweils einen anderen Abstand zum Eisenkern des Trafos, der meistens mit dem Gehäuse leitend verbunden ist. Ist der Phasenleiter mit dem äußeren Ende der Trafowicklung verbunden, ergibt sich ein höheres kapazitiv aufgebautes Potential, als wenn der Phasenleiter mit dem inneren und damit dichter am Eisenkern liegenden Trafowicklungsende verbunden wäre.