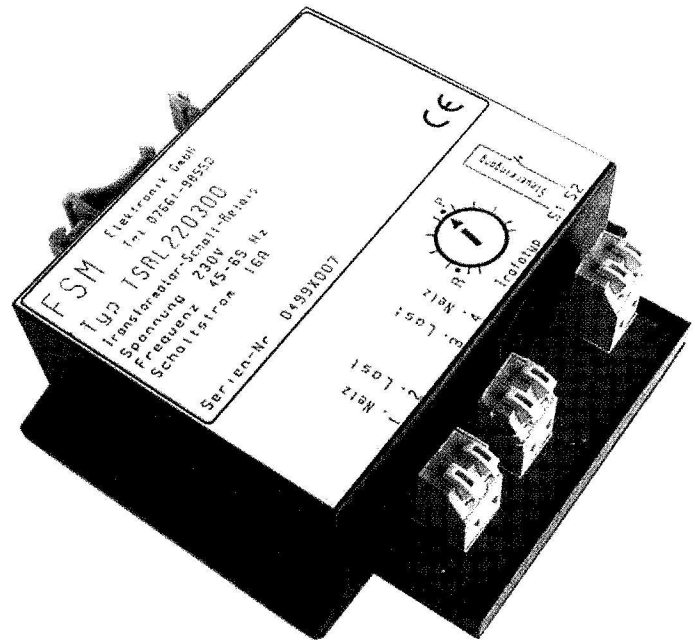


# Gefahren aus dem Stromnetz

## Verhalten von Transformatoren bei Netzstörungen



Michael Konstanzer, Freiburg

Einschaltstromstöße oder sehr kurze Unterbrechungen der Netzspannung lassen die Sicherung ansprechen oder können sogar die nachfolgende Elektronik gefährden. Ein Transformator-Schaltrelais kann beide Störquellen ausschalten. Damit eignet es sich besonders für Anlagen, die unbeaufsichtigt arbeiten.

Geräteentwickler müssen ihre Produkte heute entsprechend den EMV-Normen 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 50-Hz-Netztransformatoren, vor allem mit Ringkerntrafos, sind besonders davon betroffen.

Hintergrund der Prüfung sind dabei die durch Netzumschalt- oder Überlastvorgänge auftretenden Kurzzeit-Netzun-

terbrechungen. Dabei wird unterschieden, ob Geräte nach einer solchen Netzstörung unbeeinflusst weiterarbeiten, 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 Rücksetzen von Hand problematisch, wenn diese Hand nicht schnell genug zum Sicherungswechsel verfügbar ist. Ein Beispiel dafür ist das Netzteil von Verkehrssignalanlagen, wie sie an Auto-

bahnen zu finden sind. Der Artikel zeigt eine Möglichkeit, wie das Rücksetzen von Hand – also der Sicherungswechsel – entfallen kann.

Dazu etwas Physik: Wenn ein Transformator keine kontinuierlich verlaufende Netzspannung bekommt, sondern mit deformierter, das heißt insbesondere mit lückenhafter 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 Speisenspannung hervorgerufen, gerät das Trafoeisen in Sättigung und ruft Spitzenströme hervor, welche noch größer sein können als beim ungünstigsten Einschaltvorgang des Transformators.

Im Normalbetrieb wird die Magnetisierung im Trafoeisen durch die Spannungszeitfläche nur einer Netzspannungshalbwelle, entsprechend ihrer Polarität, von einem Wendepunkt auf der Hystereseurve zum anderen Wendepunkt bewegt. Am Ende einer jeden Netzspannungshalbwelle ist die höchste Magnetisierung im Trafoeisen erreicht. Dort liegt zeitlich gesehen auch der Scheitel des Magnetisierungsstroms, der mit steigender Magnetisierung nichtlinear zunimmt. Des-

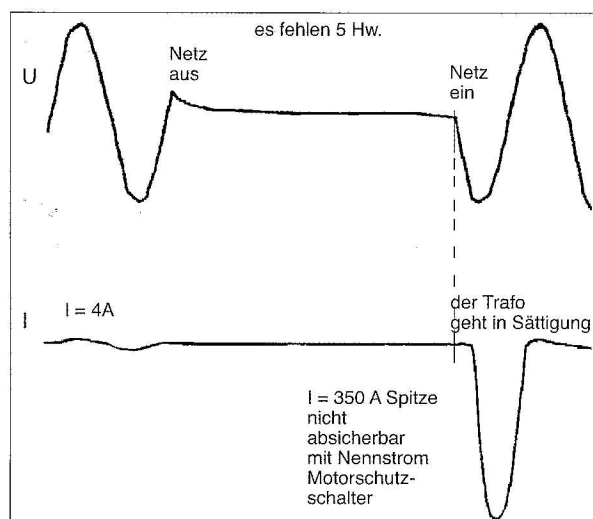


Bild 1. Simulation eines Halbwellenausfalls bei einem optimierten Trafo mit 1,6 kVA – die Belastungsspitze ist mit 350 A nicht viel höher als beim Einschaltstromstoß

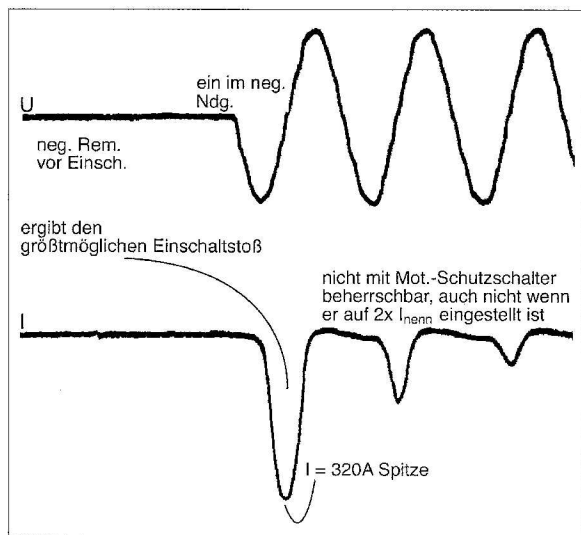


Bild 2. Der größte Einschaltstromstoß an einem auf 1,6 kVA optimierten, mit 1 kW belasteten Trafo beträgt 320 A Spitze

halb hat er auch diese nicht sinusförmigen, spitzen Amplituden, welche genau im Wendepunkt der Hystereseurve liegen (vergleiche auch Bilder 6 und 7).

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

### Maßnahmen gegen den Einschaltstromstoß

Transformatoren werden zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes oft mit

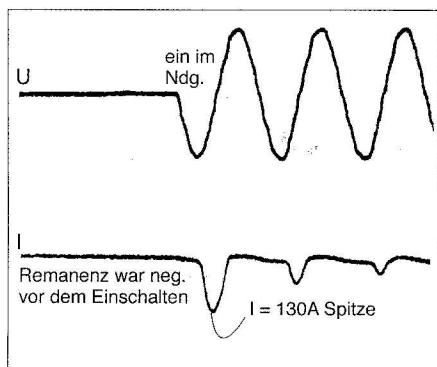


Bild 3. Die Simulation ergab beim weichen Trafo mit 1 kVA Größe 130 A als größten Einschaltstromstoß

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, damit auch eine schlechtere Blechqualität mit höheren Verlusten verwendet werden kann. Eine weitere Maßnahme zum Absenken des Einschaltstroms ist das Vorsehen von Luftspalten (geschweißte EI-Trafos). Luftspalte verschlechtern aber wiederum indirekt den Wirkungsgrad von Trafos und erfordern größere und schwerere Eisenkerne.

### Harte und weiche Trafos

Bei Netzfehlern in Form von Halbwellenausfällen, wie sie auch in der EMV-Prüfnorm EN 61000-4-11 beschrieben sind, verhält sich ein Trafo mit Magnetisierungsreserve, siehe Bilder 3 und 4, bezüglich der Spitzenströme jedoch genauso wie ein Trafo, der keine Magnetisierungsreserven und nur geringe Restluftspalte hat (Bilder 1 und 2). Nach dieser Norm müssen Geräte geprüft werden. Trafos ohne Magnetisierungsreserven erzeugen 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 ver-

schlechtert, 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 als 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.

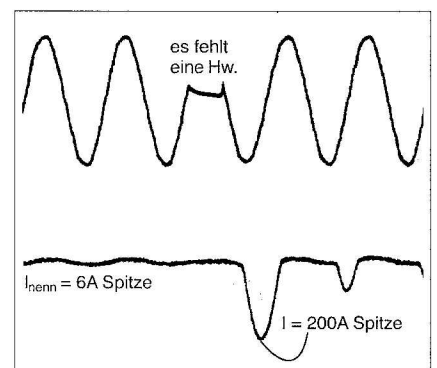


Bild 4. Bei diesem simulierten Ausfall nur einer Halbwellen beim weichen Trafo mit 1 kVA Größe würde jeder Motorschutzschalter auslösen, auch wenn er auf zweifachen Nennstrom eingestellt ist

Ein optimierter Trafo hat andererseits gegenüber einem weichen Trafo beträchtliche Vorteile, weil er zum Beispiel als Ringkerntrafo einen geringeren Leerlaufstrom hat, einen höheren Wirkungsgrad und bei gleicher Leistung wesentlich weniger Gewicht als ein weicher Trafo. Außerdem wird ein harter Trafo, mit geringeren Eisen- und Kupferverlusten, weniger warm und lässt sich auch bei schwierigen Einbauverhältnissen ohne forcierte Kühlung betreiben.

Die Bilder 1 und 4, mit einem Speicheroszilloskop, Spannungstastkopf

und Stromzange aufgenommen, zeigen die Wirkung von Netzfehlern, die Bilder 2 und 3 das Verhalten beim Einschalten, jeweils an »harten« und »weichen« Trafos.

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 Lampenfassung war die 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 davor jedoch nicht.

Die Stromspitze von 350 A Spitze ist beim Ausfall von fünf Halbwellen größer als der 35fache Nennstrom, siehe Bild 1. Beim Ausfall nur einer Halbwellen ist die Stromspitze noch etwas größer. Das Einschalten im schlechtesten Fall - Einschalt polarität gleich Remanenz polarität - zeigt Bild 2. Bei diesem größten Einschaltstromstoß erzeugt dieser Trafo eine Stromspitze von 320 A Spitze. Das ist fast genauso viel wie beim Ausfall von einer, drei, fünf oder mehr Halbwellen. Beim optimierten Trafo ist also, wie hier durch Messung nachgewiesen, der Einschaltstromstoß beim ersten Einschalten fast genauso hoch wie bei Netzhalbwellendefekten.

Das hält kein passender Motorschutzschalter mehr aus. 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-16-A-Leitungsabsicherung von Steckdosen löst dabei natürlich sofort aus. Die dargestellten Messungen wurden mit einem Netzausfallsimulator an einem Stromnetz mit 0,4 Ω Innenwiderstand durchgeführt.

Bei einem geschweißten Trafo ist der Einschaltstromstoß um etwa 21-mal grö-

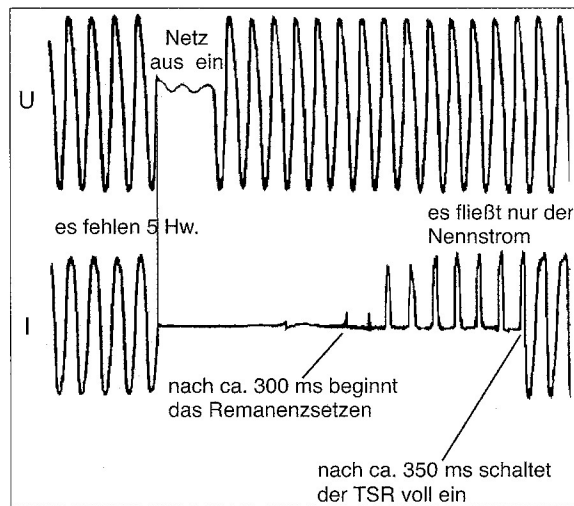


Bild 5. Die gemessene Verzögerung bis zum erneuten Einschalten beträgt nur 350 ms

ber als der Nennstrom (Bild 3). Dieser Trafo ist gerade noch mit einem Trafoschutzschalter absicherbar. Geräteabsicherungen, die auf Nennstrom ausgelegt sind, und auch die vorgeschalteten B-16A-Leitungsabsicherungen lösen dabei immer aus.

Beim geschweißten Trafo ist der Stromstoß nach einem Halbwellenausfall größer als der 33fache Nennstrom (200 A Spitze). Das ist deutlich größer als der Einschaltstromstoß mit nur 130 A Spitze und damit 21fachem Nennstrom (siehe Bilder 3 und 4). 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 Netzunterbre-

chungen nicht schnell genug reagieren, weil das Relais, welches den Strombegrenzungswiderstand brückt, nicht schnell genug öffnen kann. Damit sind sie für diesen Fall als Einschaltstrombegrenzer wirkungslos.

Ein Transformator-Schaltrelais (TSR) mit schneller Halbwellenausfall-Erkennung vermeidet diesen Nachteil (Titelbild). Es erkennt die beschriebenen Defekte der Netzspannung schon vor ihrer schädlichen Wirkung, trennt den Trafo sofort vom Netz und schaltet nach etwa 300 Millisekunden wieder sanft und ohne jeglichen Einschaltstromstoß mit patentiertem Verfahren ein (Bild 5). Die TSR lassen sich von Trafogrößen ab 500 VA wirtschaftlich einsetzen. Ein TSR kann auch mehrere Trafos schalten und schützen. Das TSR ist auch in Form einer Platine leicht in Geräte einzubauen.

Nach dem Ausfall von fünf Netzhalbwellen entsteht bei wieder einsetzendem Netzstrom keine Stromspitze. Bei Trafos ohne große Magnetisierungsreserve, wie zum Beispiel bei Ringkerntrafos (Bild 6), ist der Unterschied zwischen Einschaltstrom und dem Stromstoß bei Netz wiederkehr nach kurzen Unterbrechungen nur gering, da die Ruheremanenz nach langer Zeit bei diesen Trafos fast die gleiche ist wie nach kurzzeitigem Ausschalten von wenigen Netzhalbwellen.

Bei Trafos mit Magnetisierungsreserve in Form von geschachtelten und erst recht bei geschweißten Trafos ist der Unterschied zwischen der Ruheremanenz und der Remanenz nach Kurzunterbrechungen deutlich größer als bei optimierten oder Ringkerntrafos (Bild 7). Je geringer die Ruheremanenz vor dem

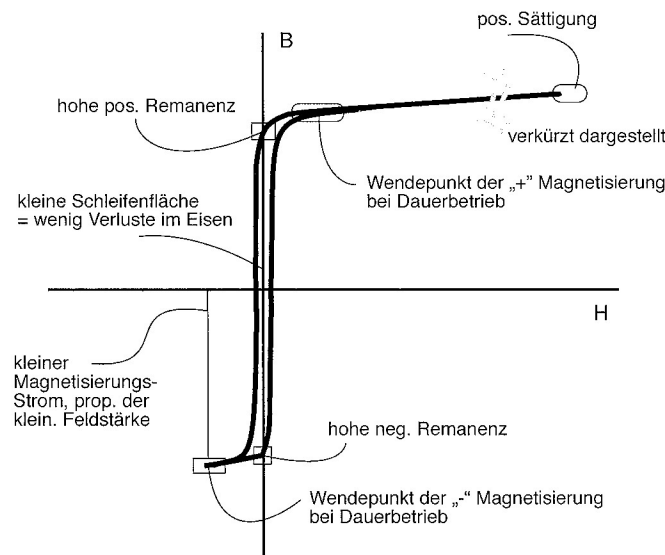
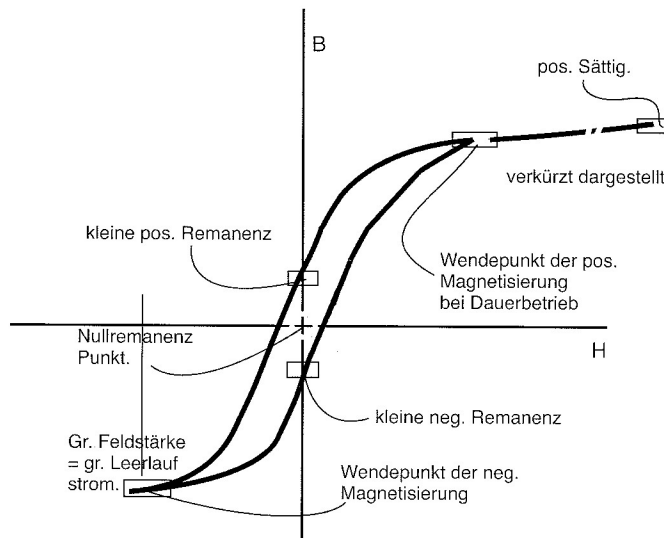


Bild 6. Hysteresekurve bei Ringkerntrafos ohne Luftspalt mit hoher Remanenz

Bild 7. Hysteresekurve bei Trafos mit Luftspalt und geringerer Remanenz



gleichpoligen Einschalten, desto geringer ist der Einschaltstromstoß. Bei Trafos mit Magnetisierungsreserve und mit Luftspalt ist die Remanenz nach den kurzen Netzunterbrechungen höher als nach längerer Pause. Deshalb nützt bei kurzen Netzunterbrechungen ein Luftspalt nicht viel zum Begrenzen des Einschaltstromstoßes.

**Vorteile der Ringkerntrafos**

Ein Ringkerntrafo hat im Gegensatz zum immer luftspaltbehafteten, »eckigen« Trafo eine hohe Ruheremanenz,

weil kein Restluftspalt im Eisen existiert. Durch Netzfehler, welche wie 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. Gerade für tragbare Stromversorgungen bieten Ringkerntrafos jedoch auf Grund ihres geringeren Gewichtes gegenüber Pakettrafos deutliche Vorteile.

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 Fremdspannung von 5 bis 32 V bedient werden kann.

Weshalb mit Netzwechselfspannung 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. Mit der vorgestellten Applikation für die Trafoschaltrelais lassen sich alle störenden Nachteile von Netztrafos beseitigen. Die Absicherung des Trafos kann mit Nennstrom und sogar flink geschehen. Der Netztrafo kann besonders verlustarm und hart ausgelegt werden und ist auch verwendbar für Einbauverhältnisse mit schlechter Kühlung. Der Wirkungsgrad solcher 50-Hz-Kleintrafos liegt dann je nach Größe mit 90 bis 98 Prozent auf jeden Fall immer noch deutlich höher als bei Schaltnetzteilen.

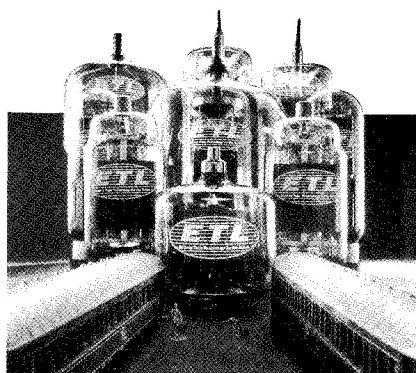
**Autor**

Dipl.-Ing. Michael Konstanzer ist Inhaber des Emeko-Ingenieurbüros in Freiburg.

**Röhren im digitalen Zeitalter**

Sie stammen aus der schier unendlich fernen Zeit des Präsiliziums, als noch nicht die Halbleiter die Welt der Elektronik regierten. Auch wenn sie heute nicht mehr das Zepter in Händen halten, so sind sie doch zuverlässig, sicher und auch unter Extrem-Bedingungen immer einsatzbereit. Die Musikwelt hört gern auf sie: Röhren sind einfach durch nichts zu ersetzen.

Der Münchner Bauteileproduzent und -vertreiber Infracron hortet deshalb in einem Riesenslager Röhren aller Typen und Leistungsstufen. Röhren aus den verschiedensten Herstellerländern warten hier darauf, den immens großen



Unverzichtbar sind Röhren nach wie vor in der Avionik, im maritimen Bereich wie auch in der Rundfunk- und TV-Technik

Hunger des Ersatzteil- und Wiederbeschaffungsmarktes zu stillen.

Infracron liefert auch das notwendige Zubehör wie etwa Röhrensockel. Ein Abflauen der Nachfrage erwartet das Unternehmen momentan nicht. Im Musikbereich gibt es seit einiger Zeit einen modernen Trend zur alten Technik, »Back to the roots«: Musiker der neueren Generation schwören wieder auf Vorverstärker und Endstufen mit Röhrentechnik; ihr Klangbild sei durch nichts zu ersetzen. Die Röhrentechnologie muß deshalb auch im 21. Jahrhundert nicht um ihren Fortbestand besorgt sein.