

## Einschaltstrombegrenzende Widerstände zum Laden von DC-Link Kondensatoren – Vorteile von drahtgewickelten Festwiderständen im Vergleich zu temperaturabhängigen Widerständen

In getakteten Stromversorgungen, Frequenzumrichtern und Antrieben wird die Netzspannung zunächst gefiltert und dann mittels eines Brückengleichrichters in Gleichspannung umgewandelt. Danach glättet und stabilisiert ein Zwischenkreiskondensator (Elektrolyt- oder Folie) die Gleichspannung, bevor sie zur eigentlichen Wandlerstufe gelangt. Dieser Zwischenkreiskondensator ist beim Einschalten entladen, es kommt daher im Einschaltmoment zu einem hohen Einschaltstrom. Die Höhe des Einschaltstroms muss so begrenzt werden, dass eine Zerstörung des Brückengleichrichters und der Wandlerstufe vermieden sowie ein Auslösen der Sicherung verhindert wird. Darüber hinaus sollte nach dem Einschalten ein stets schonendes, gleichmäßiges und vollständiges Laden des Zwischenkreiskondensators gewährleistet sein.

Zur Begrenzung des Einschaltstroms gibt es verschiedene Konzepte, häufig werden entweder temperaturabhängige Widerstände (NTC's und PTC's) oder Festwiderstände verwendet. Die Firma Ty-Ohm aus Taiwan bietet eine umfangreiche Palette von drahtgewickelten Festwiderständen zur Einschaltstrombegrenzung an. Im Folgenden werden die Vorteile dieser Lösung im Vergleich zu einer Einschaltstrombegrenzung mit temperaturabhängigen Widerständen beschrieben.

### Einschaltstrombegrenzung in Stromversorgungen bis ca. 150W

Zur Begrenzung der Einschaltströme in Stromversorgungen mit einer Leistungsklasse bis ca. 150W werden häufig NTC's (Heißleiter) in Reihe zur Last verwendet. Im Einschaltmoment begrenzt der noch kalte NTC den Einschaltstrom durch seinen für 25°C spezifizierten relativ hohen Nennwiderstand. Im Betrieb erwärmt sich der NTC durch den Stromfluss sowie seiner spezifischen Verlustleistung und durch die Umgebungstemperatur. Diese Erwärmung bewirkt eine deutliche Verringerung des Widerstandwertes des NTC's sowie seiner Verlustleistung.

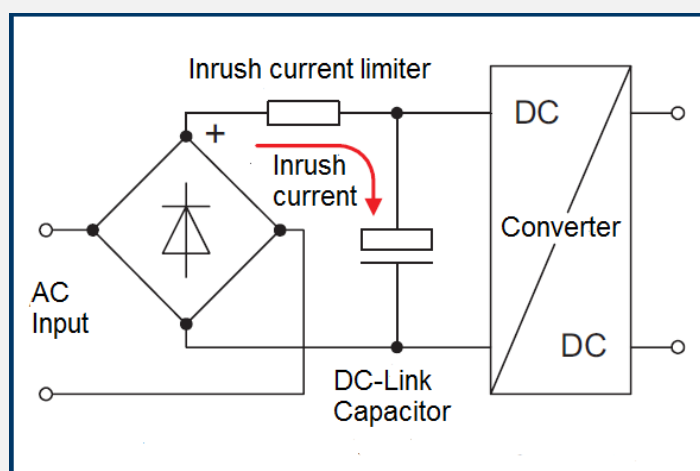


Abb.1 – Einschaltstrombegrenzung mit einem Widerstand (z.B. NTC oder drahtgewickelter Festwiderstand) in Reihe zur Last.

Bei der Verwendung eines NTC's erweisen sich In diesem Konzept folgende Umstände als kritisch:

- Bei einem spontanen Wiedereinschalten des Geräts nach einem Dauerbetrieb hat der NTC keine Zeit, um abzukühlen. Im Moment des Wiedereinschaltens befindet sich der NTC noch in einem niederohmigen Zustand und ist zur Begrenzung der erneuten Einschaltstromspitzen nahezu wirkungslos.
- Kommt es während des Betriebs zu kurzzeitigen Netzausfällen (im Bereich einiger 100ms), entlädt sich der DC-Link Kondensator. Jedoch kühlt der NTC nicht ab und kann daher die Einschaltstromspitzen nicht wirksam begrenzen, die nach dem Netzausfall beim Laden des DC-Link Kondensators entstehen.  
Dieses Szenario ist vor allem in Gegenden mit instabilen Netzverhältnissen relevant, wo es gelegentlich bis häufig zu kurzzeitigen Netzausfällen als Folge von z.B. Umschaltvorgängen im Netz kommt.
- Ein NTC besitzt keine spezifizierte Fail-Safe Eigenschaft für den Fehlerfall, der dazu führt, dass die volle Netzspannung (90Vac - 270Vac) direkt an dem NTC anliegt. Dieser Fehlerfall ist z.B. bei einem Kurzschluss des DC-Link Kondensators gegeben.
- Ebenso wenig verfügt ein NTC über eine spezifizierte Fail-Safe Eigenschaft für einen Fehlerfall, der dazu führt, dass an dem NTC weniger als die Netzspannung anliegt. Dies ist z.B. bei einem niederohmigen Ausfall des DC-Link Kondensators gegeben. In diesem Fall kommt es zu einer Spannungsteilung zwischen dem ausgefallenen Bauelement und dem NTC. Die dann an dem NTC anliegende Spannung kann eine massive Erwärmung des NTC's verursachen. Diese Erwärmung kann dazu führen, dass der durch den NTC fließende Strom über den maximal zulässigen Wert ansteigt. Ein Schaden des NTC's kann die Folge sein.
- NTC's besitzen keine Spezifikation der transienten Impulsspannungsfestigkeit (Surge).
- Ein mit 3W-spezifizierter NTC mit einem Nennwiderstand bei 25°C von z.B. 22 Ohm besitzt gemäß Hersteller-Datenblatt bei 100°C immer noch einen Widerstandswert von 2.5 Ohm. Im Normalbetrieb wird ein NTC selten heißer als 100°C-110°C. Je weniger sich ein NTC im Betrieb erwärmt (z.B. bei kalten Umgebungstemperaturen), desto höher ist seine Verlustleistung.
- Die tatsächlich auftretende Verlustleistung im Betrieb lässt sich nicht konkret vorhersagen, da verschiedene Variablen wie z.B. die Umgebungstemperatur, die Bauteile-Temperatur und die Länge des Betriebs mit einfließen.
- NTC's sind im Allgemeinen mit einer Toleranz des Nennwiderstands von -/+ 20% spezifiziert. Die mögliche Widerstands-Streuung zwischen NTC's verschiedener Produktionschargen von bis zu 40% kann zu entsprechend unterschiedlichen Einschaltstromspitzen, Ladeströme und Ladezeiten führen.
- Der Widerstandswert eines NTC's ist stark von der Umgebungstemperatur abhängig. Sehr kalte Umgebungstemperaturen (z.B. im Winter in nicht beheizten Räumen oder im Außenbereich) können zu Startproblemen und einer deutlich erhöhten Verlustleistung führen. Hohe Umgebungstemperaturen ((z.B. Umwälz-Pumpen für Warmwasser) können eine ungenügenden Begrenzung des Einschaltstroms bewirken.

Dagegen bietet Verwendung eines drahtgewickelten Festwiderstands von Ty-Ohm in diesem Konzept folgende Vorteile:

- Ein drahtgewickelter Festwiderstand besitzt einen konstanten Ohm-Wert. Eine zuverlässige Einschaltstrombegrenzung ist somit stets gewährleistet, selbst bei einem spontanen Wiedereinschalten einer noch nicht ausreichend abgekühlten Stromversorgung oder bei sehr kurzzeitigen Netzausfällen.
- Der Nennwiderstand eines drahtgewickelten Widerstand hat eine Toleranz von  $\pm 5\%$  ist nahezu temperaturunabhängig. Es lässt sich somit für sämtliche Betriebsbedingungen die Einschaltstromstoß-Höhe, der Ladestrom und die Ladezeit genau vorhersagen.
- Bei der Betrachtung der worst-case Bedingungen (niedrigst möglicher Nennwiderstand im Auslieferungszustand sowie eine hohe Umgebungs- oder Bauteile- Temperaturen) werden bei der Verwendung eines NTC's die Bauteile in Reihe zur Last durch deutlich höhere Einschaltstromspitzen belastet als bei einem vergleichbaren drahtgewickelten Festwiderstand. Durch die Verwendung von drahtgewickelten Festwiderständen kann daher eine erhöhte Schaltungsrobustheit erzielt werden.
- Im Gegensatz zu einem Keramik-basierten NTC verfügt ein drahtgewickelter Festwiderstand über eine spezifizierte hohe transiente Impulsspannungsfestigkeit (Surge) und ist somit das robustere Bauteil.
- Ein korrekt dimensionierter drahtgewickelter Festwiderstand verliert selbst nach sehr vielen Schaltzyklen ( $> 500.000$  Ein-/Aus- Zyklen) nur ca. 2-3% seines ursprünglichen Widerstandswerts.
- Für den Fehlerfall einer direkt an dem Festwiderstand anliegenden Netzspannung (90Vac- 270Vac) besitzt der Widerstand eine genau spezifizierte Fail-Safe Eigenschaft. Er löst innerhalb von nur wenigen Sekunden ohne der Entstehung eines Lichtbogens, eines Knalls, einer Flamme oder einer Explosion aus. Die Schaltung wird dadurch sicher und dauerhaft vom Netz getrennt.
- Um dem Fehlerfall einer an dem drahtgewickelten Festwiderstand anliegenden niedrigeren Spannung als der Netzspannung (z.B. bei einem niederohmigen Ausfall des DC-Link Kondensators) Rechnung zu tragen, kann in dem Widerstand eine thermische Sicherung integriert werden. Beim Überschreiten einer spezifizierten Auslöse-Temperatur trennt die thermische Sicherung die Schaltung sicher vom Netz. Der Festwiderstand besitzt somit auch für diesen Fehlerfall eine spezifizierte Fail-Safe Eigenschaft.
- Es sind Gleichrichterioden mit einer sehr hohen Einschaltstromstoß-Festigkeit am Markt verfügbar, z.B. 100A. Daher reicht häufig ein niedriger Ohm-Wert aus, um die Einschaltströme auf eine maximal zulässige Höhe zu begrenzen. Im Gegensatz zu einem NTC ermöglicht die Verwendung eines entsprechend niederohmigen drahtgewickelten Festwiderstands ein stets schonendes und gleichmäßiges Laden des DC-Link Kondensators unter sämtlichen Betriebsbedingungen, eine höhere Schaltungsrobustheit sowie ein spezifiziertes Fail-Safe Verhalten im Fehlerfall.

Werden NTC's oder Festwiderstände in Reihe zur Last geschaltet, verringert dies den Gerätwirkungsgrad. Daher ist es für Geräte sämtlicher Leistungsklassen die Energieeffizienteste Lösung, den Einschaltstrombegrenzenden Widerstand nach dem Laden des DC-Link Kondensators mit einem Schaltelement (z.B. Relais, Triac, IGBT) zu überbrücken.

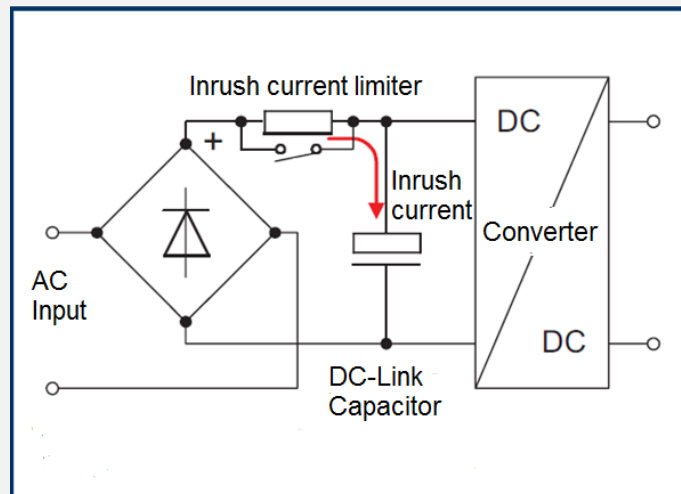


Abb.2 – Der Einschaltstrombegrenzende Widerstand (z.B. NTC, PTC oder drahtgewickelter Festwiderstand) wird nach dem Laden des Kondensators mittels einer Bypass-Schaltung überbrückt.

In diesem Konzept finden auch PTC's als Einschaltstrombegrenzendes Bauelement Anwendung. Ein PTC (Kaltleiter) ist ein temperaturabhängiger Widerstand, der mit zunehmender Temperatur seinen Widerstandswert erhöht.

In einer Bypass-Schaltung bietet ein drahtgewickelter Festwiderstand im Vergleich mit einem PTC folgende Vorteile:

- Aufgrund des Energie-Transfers beim Laden des DC-Link Kondensators erwärmt sich ein PTC und erhöht seinen bei 25°C spezifizierten Widerstandswert. Darüber hinaus unterliegt sein Widerstands-/Temperatur- Verhältnis einer Spannungsabhängigkeit. Daher ist es schwierig, den Ladestrom und die Ladezeit für die tatsächlich herrschenden Betriebsbedingungen vorherzubestimmen. Im Extremfall besteht ein Risiko, dass die DC-Link Kondensatoren nicht vollständig geladen werden.
- Die Toleranz des Nenn-Widerstandswerts eines PTC's beträgt typischerweise -/+25%. Hingegen beträgt die Toleranz eines drahtgewickelten Festwiderstands nur -/+5%, die Streuung seines Widerstandswerts bei verschiedenen Produktionschargen ist entsprechend geringer und sein Widerstandswert ist nahezu temperaturunabhängig. Bei der Verwendung eines drahtgewickelten Festwiderstands lässt sich somit für sämtliche Betriebsbedingungen die Einschaltstromstoß-Höhe, der Ladestrom und die Ladezeit exakt vorherbestimmen und eng eingrenzen. Ein vollständiges Laden des DC-Link Kondensators ist immer gewährleistet.
- Der deutlich enger tolerierte Nennwiderstandsbereich eines drahtgewickelten Festwiderstands trägt zu einer niedrigeren Einschaltstrom-Belastung der Bauelemente in Reihe zur Last bei. Dies erhöht die Schaltungsrobustheit und ist vor allem bei Applikationen mit sehr vielen Ein- und Ausschalt- Vorgängen von Bedeutung.

- Ein korrekt dimensionierter drahtgewickelter Festwiderstand besitzt eine hohe Schaltfestigkeit und verliert selbst nach sehr vielen Schaltzyklen (> 500.000 Ein-/Aus-Zyklen) nur ca. 2-3% seines ursprünglichen Widerstandswerts.
- Mit einem korrekt dimensionierten drahtgewickelten Festwiderstand ist es möglich, ein erneutes Einschalten des Geräts schneller als mit PTC's zu wiederholen und dennoch stets voll aufgeladene Kondensatoren zu gewährleisten.
- In Applikationen, die bereits im Einschaltmoment eine hohe Umgebungstemperatur besitzen können (z.B. Umwälz-Pumpen für Warmwasser), kann die Verwendung von PTC's zu niedrigeren Ladeströmen und zu längeren Ladezeiten führen.
- Im Gegensatz zu einem Keramik-basierten PTC verfügt ein drahtgewickelter Festwiderstand über eine spezifizierte hohe transiente Impulsspannungsfestigkeit.
- Im Fehlerfall (z.B. wenn der Kondensator in Kurzschluss geht oder das Schaltelement ausfällt) wird ein PTC stark hochohmig. Diese Funktion wird als Selbstschutz bezeichnet. Nach dem Abkühlen wird der PTC wieder niederohmig und kann weiter verwendet werden, die Ursache für den Fehlerfall in der Schaltung besteht jedoch weiterhin.
- Ein drahtgewickelter Festwiderstand löst entsprechend seinem definierten Auslöse-Verhalten sicher aus und wird dadurch stark hochohmig. Dies entspricht dem Selbstschutz-Verhalten eines PTC's. Ein einmal ausgelöster drahtgewickelter Festwiderstand trennt die elektronische Schaltung dauerhaft vom Netz. In der Folge ist es möglich, die Fehlerursache zu analysieren.

### **Ty-Ohm's umfangreiche Produktpalette an drahtgewickelten Festwiderständen:**

Für die Verwendung als Einschaltstrombegrenzende Ladewiderstände bietet Ty-Ohm eine umfangreiche Produktpalette an drahtgewickelten Festwiderständen in unterschiedlichen Bauformen an:

Axial, Radial, SMD sowie im mit Zement gefüllten Keramikgehäuse. Sämtliche Versionen sind optional mit einem integrierten Übertemperaturschutz verfügbar.

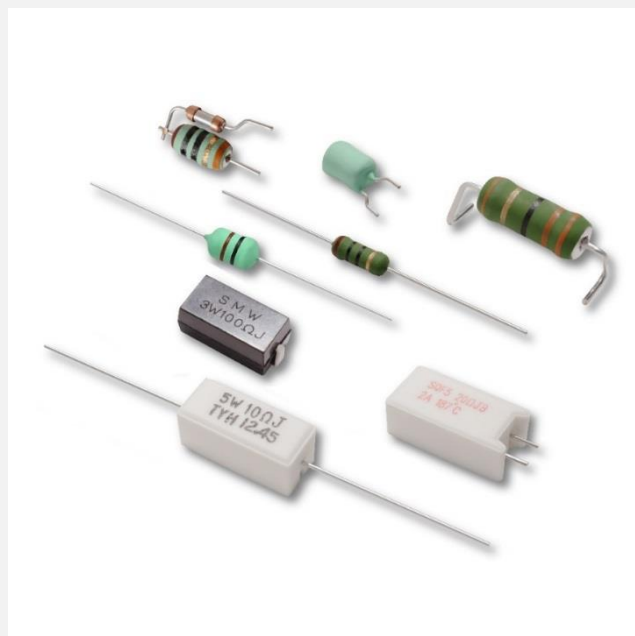


Abb.3 - Beispiele des Lieferprogramms der drahtgewickelten Widerstände von Ty-Ohm.

Die Widerstandswerte der Produktfamilie reichen von  $0.01\Omega$  bis  $3.3k\Omega$ , die Nennleistung reicht von 1W bis 12W.

Die Typen mit sehr niedrigen Ohm-Werten sind hervorragend zur Strommessung geeignet.

Für seine drahtgewickelten Festwiderstände unterscheidet Ty-Ohm ein Auslöseverhalten gemäß folgender Klassifizierung:

- Auslöseverhalten Standard Fusing: Bei einer an den Widerstand angelegten Leistung, welche die Nennleistung des Widerstands um das 5- bis 20- fache übersteigt (abhängig von dem jeweiligen Bauteil), löst der Widerstand innerhalb einer Minute aus.
- Auslöseverhalten Fail-Safe Fusing I: Liegt im Fehlerfall die Netzspannung (90Vac – 270Vac) direkt am Widerstand an, löst der Widerstand innerhalb einer spezifizierten kurzen Zeitspanne aus und trennt die elektrische Schaltung sicher vom Netz. Ein lauter Knall, eine Flammen- und Lichtbogen- Bildung oder eine Explosion des Bauteils sind ausgeschlossen.
- Auslöseverhalten Fail-Safe Fusing II: Wie Auslöseverhalten I. Zusätzlich ist durch die Integration eines thermischen Übertemperaturschutzes in den Widerstandskörper sichergestellt, dass im Fehlerfall die Temperatur des Widerstands nicht die spezifizierte Auslösetemperatur des thermischen Schutzes übersteigt.

### **Das Fail-Safe Auslöseverhalten der drahtgewickelten Festwiderstände von Ty-Ohm**

Um zum Abschluss der Neuentwicklung einer elektrischen Schaltung ihre Betriebssicherheit zu verifizieren, wird häufig das individuelle Ausfallverhalten eines jeden verwendeten Bauteils simuliert und dieser Einfluss auf die Schaltung überprüft. Dies bedeutet, dass jedes verwendete Bauteil den Fehlerfällen Kurzschluss, hochohmiger Ausfall sowie Ausfall mit wenigen Ohm gegen Masse ausgesetzt wird.

#### **Auslöseverhalten Fail-Safe Fusing I:**

Ein Kurzschluss eines Bauteils in Reihe zum Widerstand verursacht ein sauberes Auslösen des drahtgewickelten Festwiderstands gemäß dem spezifizierten Auslöseverhalten Fail-Safe I. Ein thermischer Übertemperaturschutz ist nicht nötig.

#### **Auslöseverhalten Fail-Safe Fusing II:**

Die Praxis erweist sich die Möglichkeit als relevant, dass elektronische Bauelemente nicht mit einem Kurzschluss oder hochohmig ausfallen, sondern dass sie im Ausfall eine niederohmige Verbindung gegen Masse herstellen. Ursachen für solch undefinierten Bauelemente-Ausfälle sind z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, Alterung oder transiente Überspannungen. Von diesem Ausfall-Szenario können sämtliche Bauelemente in Reihe zur Last betroffen sein:

- Kondensator, Brückengleichrichter, Pi-Filter, Spannungswandler, Schalttransistor, Regler IC, etc..

Sollte eines dieser Bauelemente in Reihe zur Last im Ausfall eine niederohmige Verbindung gegen Masse herstellen, so ist dies in folgenden Fällen kritisch:

- Der Einschaltstrombegrenzende drahtgewickelte Widerstand liegt ebenfalls in Reihe zur Last.
- In Bypass-Schaltungen fällt das Schaltelement hochohmig aus und das Gerät schaltet nicht ab.

In beiden Fällen führt ein niederohmiger Ausfall eines Bauelements in Reihe zum Widerstand dazu, dass sich die Netzspannung zwischen dem Widerstand und dem ausgefallenen Bauelement teilt. Die dann am Widerstand anliegende Spannung ist zu gering um den Widerstand gemäß dem Auslöseverhalten Fail-Safe I auszulösen. Der Widerstandsdraht erwärmt sich in der Folge zunehmend und stabilisiert sich bei einer Temperatur von mehreren hundert °C. Diese Temperatur liegt unterhalb der Schmelztemperatur des Widerstandsdrahts. Diese konstant sehr hohe Temperatur kann ein gravierendes Sicherheitsproblem für angrenzende Bauelemente, für die Leiterplatte sowie für das Gerätegehäuse darstellen.

Dieses Szenario lässt sich durch die Integration eines thermischen Übertemperaturschutzes in den drahtgewickelten Widerstand ausschließen. Sobald sich im Fehlerfall der Widerstandsdraht auf die spezifizierte Auslösetemperatur des thermischen Übertemperaturschutzes erwärmt, löst diese aus und trennt die Schaltung sicher vom Netz. Der Nennstrom und die Auslösetemperatur des thermischen Übertemperaturschutzes kann zwischen 1A – 10A und von 130°C bis 260°C oder nach Kundenanforderung gewählt werden. Für die in einem Lötprozess herrschenden hohen Temperaturen bietet Ty-Ohm Widerstände mit einem Fail-Safe Fusing II Verhalten an, die mit 270°C für 10 Sekunden spezifiziert sind.

Ty-Ohm kann den Kunden bei der richtigen Auswahl der Sicherung und bei der korrekten Platzierung des Bauteils auf der Leiterplatte unterstützen. Für den Fehlerfall einer Teilung der Netzspannung zwischen Widerstand und ausgefallenem Bauteil kann somit sichergestellt werden, dass die am Widerstand entstehende Wärme weder umliegende Bauteile, das Gerätegehäuse noch die Leiterplatte schädigt.

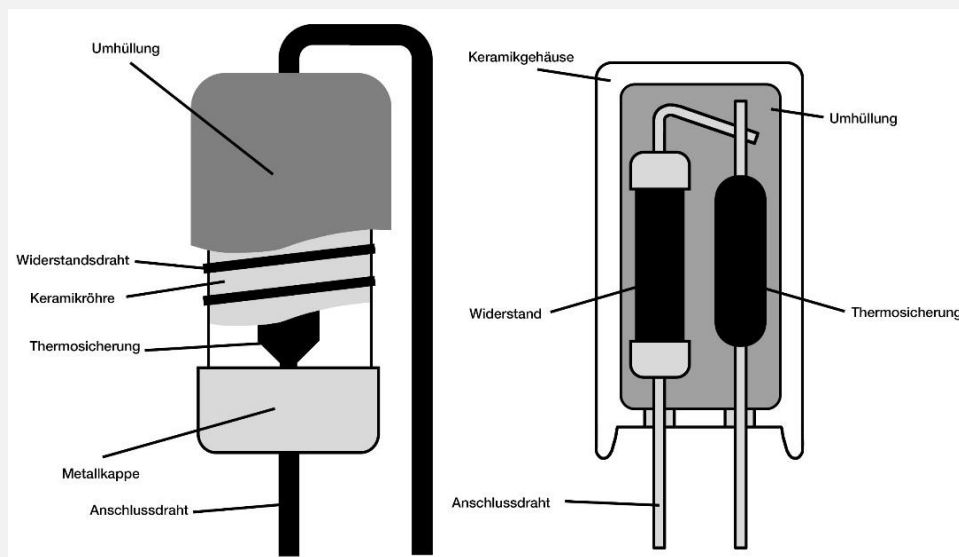


Abb. 4 - Drahtgewickelte Widerstände mit integriertem Übertemperaturschutz.

Für eine UL-Zertifizierung des Geräts kann es nötig sein, die Auswirkung eines permanent geöffneten Relais auf die elektrische Schaltung zu prüfen. Wird dabei in der Bypass-Schaltung ein drahtgewickelter Festwiderstand mit integriertem Übertemperaturschutz verwendet, müssen keine weiteren Maßnahmen zum Schutz des Geräts ergriffen werden.

Die Firma Ty-Ohm aus Taiwan bietet ein umfangreiches Lieferprogramm von drahtgewickelten Festwiderständen mit den Auslöseverhalten Standard Fusing, Fail-Safe Fusing I und Fail-Safe Fusing II an. Diese sind in axialer, radialer und SMD- Ausführung sowie als Zementwiderstände verfügbar.

Nähere Informationen zu diesem Thema sind unter [www.compotec-electronics.com](http://www.compotec-electronics.com) zu finden.

Autor: Dieter Burger / COMPOTEC