Einführung Sicherungen

Warum eine Sicherung?

Es gibt viele Möglichkeiten Überstrom in Fällen von Fehlfunktionen in Geräten, bis zum Kurzschluss aufzufangen: Bei Applikationen mit geringen Ausgangsleistungen entfällt eine Sicherung völlig, oder kann durch Leiterbahnen mit Engstellen nachgebildet werden, oder man setzt rückstellbare Sicherungen, wie PPTC, Bimetallschalter etc. ein.

Die Vorteile einer Schmelzsicherung sind jedoch:
- definierte Strom-Zeit-Charakteristik,
- spezifizierte Eigenschaften,
- gekapselte Trennstelle (Vermeidung der Zerstörung von benachbarten Bauelementen),
- galvanische Trennung des Stromkreises,
- genormte Anschlüsse und Abmessungen,
- Austauschbarkeit.

Dabei lassen sich Sicherungen durchaus mit weiteren Bauteilen zur Überstrombegrenzung kombinieren: Im Fall einer Serienschaltung mit einem PTC dient die Sicherung als reiner Kurzschlussschutz, oder begrenzt in Verbindung mit einem Varistor Überspannungen, bzw. Überlastungen bei extremer Alterung des MOV‘s. Ebenso kann das Schaltverhalten bei Temperatursicherungen durch eine Schmelzsicherung verbessert werden (erweiterter Bereich des max. Fehlerstromes).

Sinn und Zweck von Approbationen

Bei Approbationen spricht man von Zertifikaten, die die Konformität von Sicherungs-eigenschaften hinsichtlich einer Norm belegen. Für den Sicherungsbereich gängige Normen sind die UL 248-14 für den amerikanischen und die IEC 60127 für den europäischen Raum. Durch nationale Prüfstellen erteilte Approbationen bestätigen, dass die geprüften Sicherungen den jeweiligen Anforderungen der zugrunde liegenden Norm entsprechen. Das Prüfzeichen des Prüfinstituts ist auf dem Bauteil und / oder auf der Verpackung anzugeben. Nationale Prüfstellen sind u.a. VDE, SEMKO, BSI, IMQ. Eine Sonderform stellt die UL dar, die einerseits Normen herausgibt, als Dienstleister aber auch Prüfungen durchführt. Je nach Einsatzgebiet erleichtert eine approbierte Sicherung die Produktzulassung, bzw. Abnahme durch relevante Prüfstellen.
Grundlegende Unterschiede zwischen UL und IEC findet man in der Nennstromdefinition. Der Nennstrom einer Sicherung muss gleich oder größer als der Dauerbetriebsstrom sein:

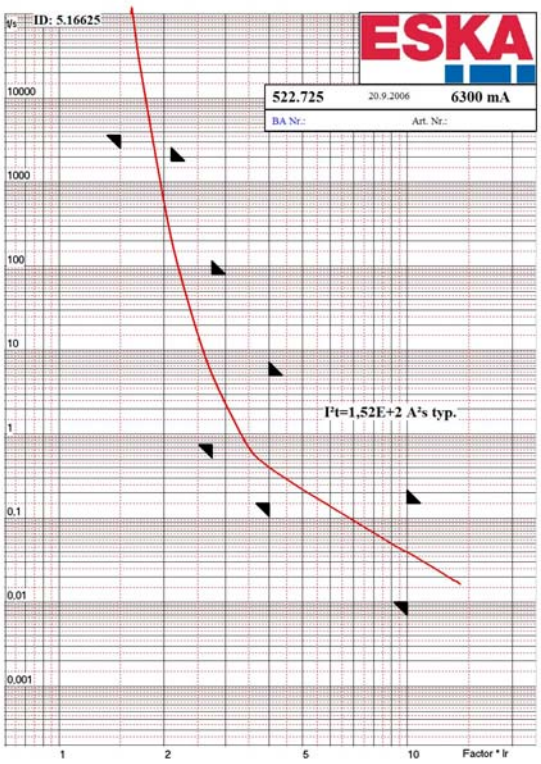
Norm	Spannung	**Zulässiger Dauerstrom**
UL / CSA	250V AC	**< 0,75 x I_{rat}**
UL / CSA	125 VAC	**< 0,70 x I_{rat}**
IEC	250V AC	**< 1,00 x I_N**
IEC (UMF)	32 ... 250VAC / DC	**< 0,80 x I_N**

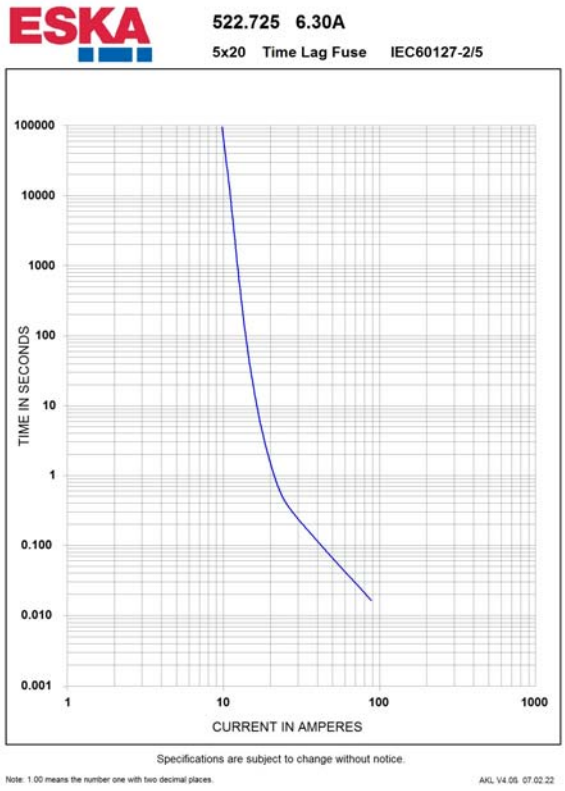
Eigenschaften von Sicherungen

Der wichtigste Punkt einer Sicherungsspezifikation ist die Strom-Zeit-Kennlinie. Sie kennzeichnet das Schaltverhalten von Sicherungen im Überlastbereich, der sich üblicherweise von 1 x I_N oder 1,5 x I_N (je nach Type und Bauart) bis ca. 3 x I_N erstreckt. Darüber hinaus beginnt der sogenannte Kurzschlussbereich, wo speziell bei 10 x I_N auch das sogenannte Schmelzintegral einer Sicherung ermittelt wird (Einheit in A^2s). Anhand dieses Wertes erfolgt auch die Unterscheidung, ob man von einer trägen oder flinken Sicherung spricht.
Die Kennlinie wird je nach zugrunde liegender Norm unterschiedlich genau definiert: bei **UL-Typen** findet man u.U. nur einen einzigen Punkt, wo die Sicherung innerhalb einer bestimmten Zeit schalten muss. Ergänzend findet man dazu eine ‚Haltebedingung', wo der Spannungsfall über der Sicherung unter Last (i.d.R. ein konstanter Strom) sich in definierten Zeitabschnitten nur um einen gewissen Betrag erhöhen darf. Diese Situation ist gleichzusetzen mit einer Art Stabilisierung: die Sicherung erwärmt sich bis zu einem gewissen Grad und erhöht dadurch thermisch bedingt ihren sogenannten Spannungsfall. Sollte keine Stabilisation eintreten, ist abzusehen, dass die Sicherung irgendwann schalten wird, die UL-Anforderung wäre nicht erfüllt.
Im Gegensatz dazu beschreibt die **IEC-Norm** klare Strom-Zeitvorgaben über den gesamten Überstrom- und Kurzschlussbereich innerhalb derer die Sicherungskennlinie (eine graphische Verbindung der geometrischen Mittelwerte einzelner Schaltzeiten je Prüfstrom) liegen muss. Man spricht bei diesen Punkten auch von Halte- bzw. Schaltgates, die als schwarze Dreiecke die Zeitgrenzen bei den Prüfstromfaktoren aufzeigen.
Speziell bei dem Haltegate muss eine IEC konforme Sicherung zusätzlich eine Dauerprüfung bestehen, die sich über 125h erstreckt. Die dabei ermittelten Kennwerte müssen außerdem belegen, dass über diese Zeit keine gravierende Alterung begann.

Einführung Sicherungen

Eine Kennlinie nach IEC-Spezifikation hat folgendes Aussehen:





Die Graphen differieren in der unterschiedlich skalierten Stromachse, im linken Fall normiert auf Vielfache des Nennstromes, in der rechten Darstellung mit logarithmischer Einteilung der Stromachse (dient zum Vergleich von unterschiedlichen Stromstufen in einer Grafik).

Der zweite wichtige Punkt einer Sicherungsspezifikation ist das sogenannte Schaltvermögen, also der max. Strom, den eine Sicherung bei einer definierten Spannungsebene abschalten kann, ohne benachbarte Bauelemente, bzw. Sicherungshalter zu beeinträchtigen. Die gängigsten Klassen des Bemessungsschaltvermögens sind (UL und IEC gemeinsam betrachtet):

250V AC: 35A, 100A, 150A, 1500A (cos φ = 0,7)
125V AC: 50A, 100A, 10000A (cos φ = 0,7).

Mit Ausnahme des Normteils IEC 60127-4 (UMF Norm) gibt es keine Vorgaben für DC-Kreise. Es ist jedoch zu erwarten, dass in allen Normwerken dieser Bereich ergänzt wird, da sich das Schaltverhalten von typischen Schmelzleitersicherungen unter DC-Lasten im Vergleich zu AC deutlich unterscheidet.

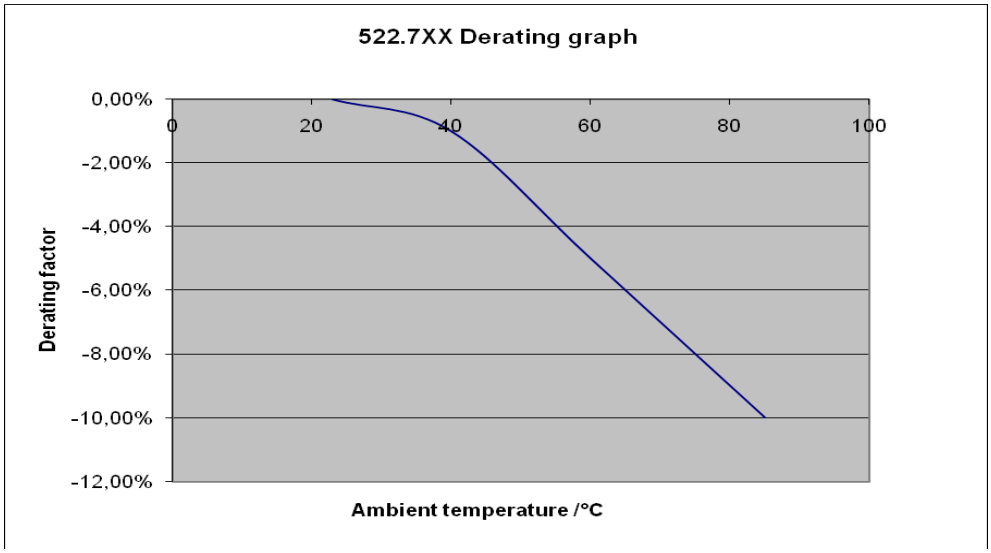
Einführung Sicherungen

Wichtige Größen, gerade bei Applikationen mit gedrängtem Aufbau und niedrigen Betriebsspannungen sind der max. Spannungsfall einer Sicherung (wird grundsätzlich bei 1 x I_N ermittelt) und die max. Verlustleistung bei 1,5 x I_N.

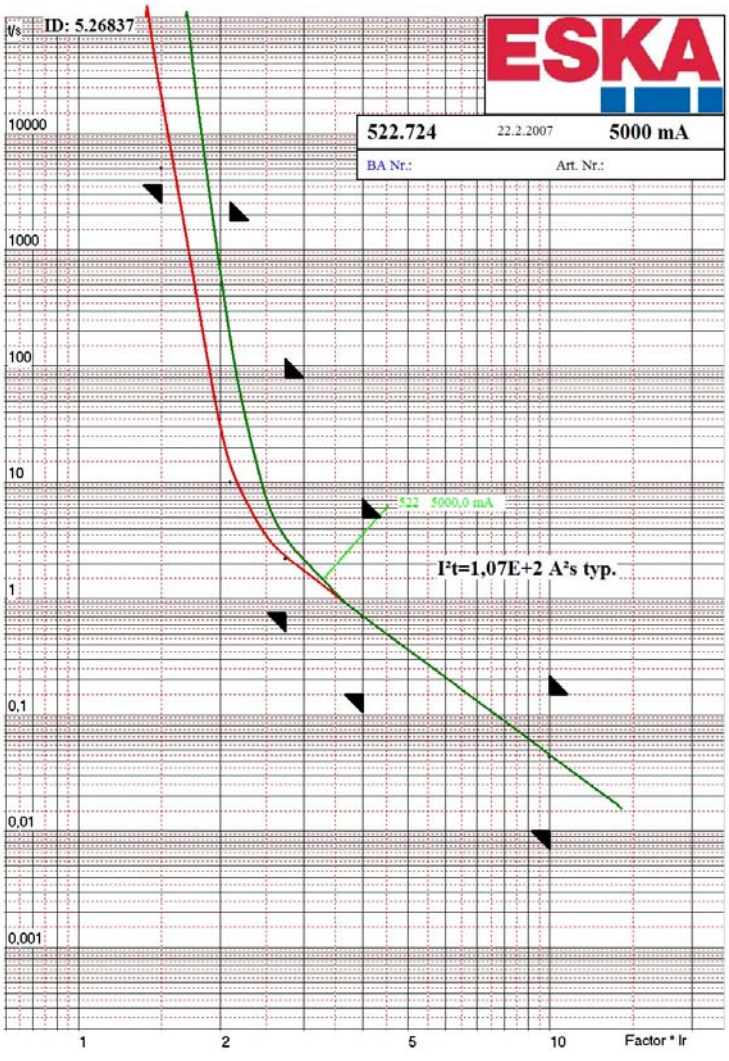
Abgerundet werden Sicherungsspezifikation durch ergänzende Angaben zu Umweltbedingungen, wie: möglich Umgebungstemperatur bei normalen Betriebsbedingungen der Schaltung, max. Vibrationsbelastung, Feuchte-Klasse.

Einbaubedingungen, z.B. Lötparameter (Grenzwerte für Lötbarkeit und Lötwärmebeständigkeit) sind natürlich zu beachten, sofern es sich um bedrahtete Sicherungen, bzw. Chipvarianten handelt.

Ein Punkt, der gerne übersehen wird ist das sogenannte Nennstromderating, beschrieben durch den Faktor K_T. Es wird i.d.R. nicht speziell für einen Sicherungstyp angegeben, sondern gilt für Sicherungsklassen gleicher Bauart. Bei diesem Derating handelt es sich um eine Nennstromverschiebung bei variierender Umgebungstemperatur, d.h. eine Nennstromreduktion bei erhöhten Temperaturen und umgekehrt. Es ist dabei zu beachten, dass sich diese Nennstromverschiebung lediglich auf den Überstrombereich bis ca. 3 x I_N erstreckt, die Strom-Zeit-Kennlinie ändert sich nicht über diesen Punkt hinaus. Eine erhöhte Umgebungstemperatur in der Nähe der Sicherung hat somit keinen Einfluss auf deren Schmelzintegral. Eine typische Deratingkurve der Sicherungsreihe 522.7XX:



Der Nennstrom einer 522.725 mit 6,3A würde sich bei einer Umgebungstemperatur von 85C° auf ca. 5,6A reduzieren! Oder am Beispiel der 522.724 5A ändert sich die Strom-Zeit-kennlinie wie folgt:



Die grüne Kurve kennzeichnet den ursprünglichen Verlauf, die rote Kennlinie spiegelt die Verhältnisse unter einer Umgebungstemperatur von 85°C wider.

Bei Sondertypen macht es Sinn, zusätzlich zu den Basisgrößen den Kaltwiderstand (ermittelt bei 1/10 I_N) je Stromstufe anzugeben, damit der Spannungsabfall bei impulsartigen Lastbedingungen errechnet werden kann.

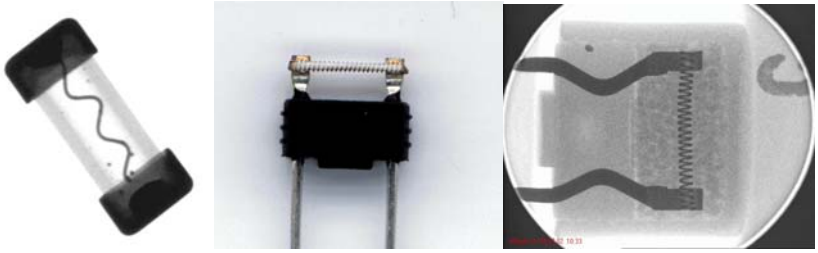
Die Kernspezifikation einer Sicherung beinhaltet somit:

- Strom-Zeit-Kennlinie,
- Angabe(n) zum Schaltvermögen und damit auch die Bemessungsspannung,
- Spannungsfall,
- Verlustleistung,
- Schmelzintegral und sofern vorhanden
- Approbationen.

Ergänzend noch die Stempelung auf den Sicherungen (Kappen oder Gehäuse):
Neben der Bemessungsspannung (z.B. 250) und dem Nennstrom in A oder mA findet man Zeichen für die Charakteristik (T, M, F etc.) der Schaltvermögenklasse (L, E, H) und den wesentlichsten Approbationen. Somit ist eine Sicherungstype eindeutig beschrieben und kann durch eine baugleiche mit gleichwertiger Spezifikation ersetzt werden, sofern es sich um einen austauschbaren Typ handelt.

Konstruktionsmerkmale, Sicherungscharakteristik

Die Sicherungscharakterisitk ist im Abschnitt ‚Eigenschaften' schon angeklungen: gemessen und qualitativ zugeordnet wird sie über das Schmelzintegral. Die IEC-Norm stellt hierzu genau spezifizierte Klassen bereit, denen die Schaltzeiten bei 10 x I_N zugeordnet werden. Bei UL-Typen liegt es im Ermessenspielraum des Herstellers eine Type als flink oder träge zu klassifizieren, jedoch unterscheiden sich die Schmelzintegrale der unterschiedlichen Charakteristika deutlich. Physikalisch bedingt ändert sich aber auch der Kennlinienverlauf im Überstrombereich, d.h. eine flinke Sicherung besitzt hier eine wesentlich größere ‚Steilheit' als eine träge Type.



Prioritär wird die Sicherungscharakterisitik innerhalb einer Bauform durch den Schmelzleiter bestimmt, d.h. durch das Kerndrahtmaterial, evtl. darauf aufgebrachte galvanische Schichten und die Art und Weise, wie der Schmelzleiter im Sicherungsgehäuse angebracht wird: entweder als glatt gezogener Draht, gewickelt auf einem Trägermaterial oder profiliert mit einer Wellenform. Der Nennstrom wird maßgeblich durch den Durchmesser des Schmelzleiters bestimmt.

Chipsicherungen besitzen konstruktionsbedingt einen anderen Aufbau, hier wird der Nennstrom bei trägen Typen durch Pasten und die Anordnung der Schmelzleiterwege zur Ausnutzung einer thermischen Kopplung eingestellt. Flinke Typen arbeiten mit dünnen Widerstandsschichten, bzw. metallisierten Oberflächen, die einer vorgegebenen Struktur folgen. Einen großen Einfluss auf die Charakteristik bei Chiptypen hat das Trägersubstrat hinsichtlich des Wärmeleitkoeffizienten.

Das Bemessungsschaltvermögen wird bei gekapselten Sicherungsbauformen (Glas- Keramikrohr, Plastikgehäuse) durch Füllmedien gesteuert, bzw. durch ergänzende konstruktive Maßnahmen, wie zusätzliche Kapselung des Schmelzleiters, Ausgasöffnungen etc. Die Bauformlänge hat einen entscheidenden Einfluss auf die Nennspannung unter der das Bemessungsschaltvermögen erreicht wird. Somit findet man für Spannungsebenen ab 250V bis 600V für Telecomanwendungen meist längliche zylindrische Gebilde, um eine ausreichende Trennstrecke für den Lichtbogen im Schaltmoment zu ermöglichen.

Standardisierte Sicherungsbauformen dienen in den meisten Fällen dem Vollbereichsschutz, d.h. die zuverlässige Sicherungsfunktion ist in allen Betriebsfällen innerhalb der Spezifikation sichergestellt. Ausnahmen bilden hier Teilbereichssicherungen, die i.w. nur als Kurzschlussschutz eingesetzt werden. Dazu zählen u.a. auch Chipsicherungen in den Bauformen 0805 bis 0402, gerade wenn sie hohe Nennströme besitzen. Im Überstrombereich kann bei diesen Typen durch die enorme Hitzeentwicklung ein selbständiges Entlöten auf der

Platine auftreten, das ein erhöhtes Gefahrpotenzial bis zur Brandentwicklung nach sich ziehen kann.

Selektionskriterien für eine geeignete Sicherung

Die folgenden Schritte sollen die Auswahl einer geeigneten Sicherung erleichtern. Fundamentale Größen sind die Nennspannung und das Schaltvermögen, d.h. die Dauerbetriebsspannung darf die Nennspannung nicht überschreiten, bzw. muss der Wert eines möglichen Kurzschlussstromes grundsätzlich unterhalb des Stromwertes aus dem Bemessungsschaltvermögen liegen. Kurze Spannungsspitzen, die sporadisch auftreten und die Nennspannung überschreiten (im µs-Bereich!) sind zulässig. Bei allen AC-Anwendungen ist zu beachten, dass es sich bei den zu vergleichenden Größen um Effektivwerte handelt! Im Umkehrschluss bedeutet das aber nicht, dass eine Sicherung mit U_N=250V AC für DC-Anwendungen bis 350V geeignet ist. Hierzu sind gesonderte DC-Spezifikationen erforderlich. Sollten diese fehlen gilt die Faustformel dass $U_{DC} = U_N/2$ nicht überschritten werden darf. Der max. Strom den eine Sicherungstype unter diesen Spannungen trennen kann, ist vom Hersteller zu erfragen.

Auf der anderen Seite benötigt eine Sicherung ausreichend Spannung, um die Schaltzeiten aus dem typischen Kennlinienverlauf einzuhalten, so dass eine Spannungslimitierung durch die Quelle kein Absinken des Fehlerstromes hervorruft und somit die Schmelzzeiten verlängert, oder dass u.U. kein Ansprechen der Sicherung erfolgt. Hier gilt die folgende Formel als Orientierungswert:

$U_{min}=U_f*I_f/I_N*X$

Mit X = 3 für träge Sicherungen, bzw. X=2 für flinke Typen.
U_{min}: Mindestbedarf der Spannung zu einwandfreien Schalten der Sicherung,
U_f: Nennspannung der Sicherung,
I_f: Fehlerstrom in der Applikation
I_N: Nennstrom der Sicherung.

Eine Sicherung ist ein stromgesteuertes Bauteil. Der Strom erzeugt im Schmelzleiter einen Spannungsfall und die damit generierte Verlustleistung sorgt für eine Erwärmung des Schmelzleiters bis zum Durchschmelzen des Drahtes. Insofern ist die Betrachtung des Dauerbetriebsstroms der Applikation zum Nennstrom der Sicherung äußerst wichtig.

Der Strom kann sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen:
a) reiner DC-Anteil,
b) AC-Strom mit bekanntem Effektivwert,
c) AC-Strom mit DC-Offset,
d) AC-Strom mit harmonischem Anteil (Obertonspektrum),
e) AC oder DC Strom mit pulsartigem repetierendem Anteil, phasensynchron oder freilaufend im ersten Fall,
f) pulsartiger Einschaltstromstoß mit großem Puls-Pausenverhältnis tp/tcycle, oder Stromstoß durch spannungsbegrenzende Bauteile.

Für eine grobe Abschätzung bei Wechselströmen reicht es, die Hüllkurve des Signals, bzw. die Spitzenwerte zu nehmen. Das gilt für sinusförmige und dreieckförmige periodische Verläufe des Stromes. Die Beschreibung des Effektivwertes aus einer gegebenen Signalform I(τ) mit:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\int_0^t I^2(\tau)\ \mathrm{d}\tau}{t}}$$

Mit $I(t) = I_0\sin(\omega t)+I_1\sin(2\omega t)+I_2\sin(3\omega t)+\ldots+I_n\sin((n+1)\omega t)$

I_1 bis I_n beschreibt dabei mögliche harmonische Frequenzanteile. Lässt sich der Verlauf des Signals nicht beschreiben, helfen zeitdiskrete Messpunkte X_n nach folgender Formel:

$$I_{eff} \approx \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n}[x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \cdots + x_n^2]}$$

Wobei die Zeitabstände innerhalb einer Signalperiode konstant sein müssen mit:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{1}{\frac{T}{\Delta t}} = \frac{1}{n}$$

Der einfachste Weg ist jedoch, den Strom in den oben aufgeführten Fällen a) bis e) zu messen. Liegt der ermittelte Dauerbetriebsstrom vor, ist bei erhöhten Umgebungstemperaturen der bauteilspezifische Deratingfaktor zu beachten, um die Nennstromstufe der Sicherungstype an diese Situation anzupassen. Ergänzend folgt die normabhängige Nennstromstufenkorrektur.

Am Beispiel

$I_{Betrieb}$=1,6A, T_{Umg}=85°C und dem Deratingfaktor K_{T65}=0,88 (Beispiel!) ist eine **IEC-Sicherungstype** mit:

$I_{Betrieb}$*1/K_T = 1,82A gewählt: 2A

die richtige Wahl. Bei **UL-Sicherungstypen** wäre aufgrund der zur IEC unterschiedlichen Nennstromdefinition z.B. der Faktor 1/0,7 zu ergänzen:

$I_{Betrieb}$*1/K_T *1/0,75 = 2,42A gewählt: 2,5A

Es ist immer der nächsthöhere Nennstrom der Sicherungstype auszusuchen. Ebenso sind im nächsten Schritt die Fehlersituationen zu verifizieren, d.h. ob die Schaltzeit der gewählten Sicherung bei Überstrom ausreichend gering ist.
Bei Einschaltimpulsen (speziell bei Schaltnetzteilen ohne Anlaufstrombegrenzung) muss geprüft werden, ob der I^2t –Wert der gewählten Sicherung ausreichend ist. Zusätzlich sind die erwarteten Einschaltpulse (n) pro Lebenszyklus des Gerätes zu berücksichtigen. Ausgehend von einem exponentiell abklingenden Pulsverlauf lässt sich der I^2t-Wert in diesem Zeitbereich mit der Formel:

$I^2t_{Puls}=I_\tau^2$ /2 mit den Bedingungen: gesamte abklingende Pulslänge = 5τ, I(τ)=0,37 * Ipeak

abschätzen. Als Richtlinie für eine korrekte Wahl des Sicherungsschmelzintegrals gilt der Zusammenhang:

$I^2t_{Sich} \geq 2*I^2t_{Puls}$ * log(n) mit n≥10.

Abschließend noch der Hinweis:
Sollte eine Geräteapprobation vereinfacht werden, wobei das Zielmarktgebiet feststeht, ist auf die Sicherungsapprobation zu achten.

Sonderformen, applikationsspezifische Lösungen

Es gibt viele zusätzliche Anforderungen, die hier detailliert nicht behandelt werden können, deswegen nur Empfehlungen, welche Sicherungstype sich für den Anwendungszweck eignen könnte (der Lötprozess, wie SM-Montage mit IR/Wave oder für bedrahtete Bauteile mit Wave wird nicht weiter berücksichtigt, schränkt aber die Auswahl potenzieller Sicherungstypen ein). Typische applikationsspezifische Sicherungstypen für Hochspannung, Automotive, Einsatz von Kennmeldern etc. sind hier nicht aufgeführt:

- Hohe Impulsfestigkeit bei 250V Nennspannungsebene (Absicherung von Schaltnetzteilen mit parallelem MOV im Eingang, Prüfung mit 8/20µs Welle ab 2kV an 2Ω):
  521.5XX ab 2,5A, UL522.2XX ab 1,25A, 522.4XX ab 1A

- Schaltungen mit hohem Wirkungsgrad mit Wandlern, die im kHz-Bereich arbeiten:
  522.7XX, 522.3XX, 522.0XX

- Applikationen mit erhöhtem Dauerbetriebsstrom (Kühlanlagen, Heizungen, Gebläse):
  521.0XX, 632.1XX, 632.5XX, 632.0XX, 632.2XX, 1038.6XX, 1038.3XX

- Geringer Innenwiderstand der Schaltung im Kurzschlussfall:
  521.0XX ab 1,6A, 522.7XX

- Hohe Packungsdichte bei moderaten Kurzschlussströmen (consumer-Bereich):
  885.0XX, 887.0XX, 883.0XX

- Geringe Signalverzerrungen bei Datenübertragung etc.:
  SMD-Chip

- Halbleiterschutz (Dioden, Thyristoren etc.):
  520.1XX, 520.5XX, 520.0XX, 1038.1XX

- Industrielle Steuerungen SPS:
  ES-MSXX, 888.4XX, 220.0XX, 222.0XX

- Kurzschlussschutz für Batterien / Akkus:
  823.6XX, 888.3XX, 888.2XX

Einführung Sicherungen

- Telecomanwendungen nach ITU-K20/21, Telcordia, UL1950:
  522.5XX ab 1,25A, 530.6XX, ES-SMP ab 1,25A

- Sicherungen für Lampenvorschaltgeräte:
  515.3XX ab 1,25A

- Universelle UMF Approbation (gleichzeitige UL und IEC-Zulassung)
  900.0XX, 910.0XX