

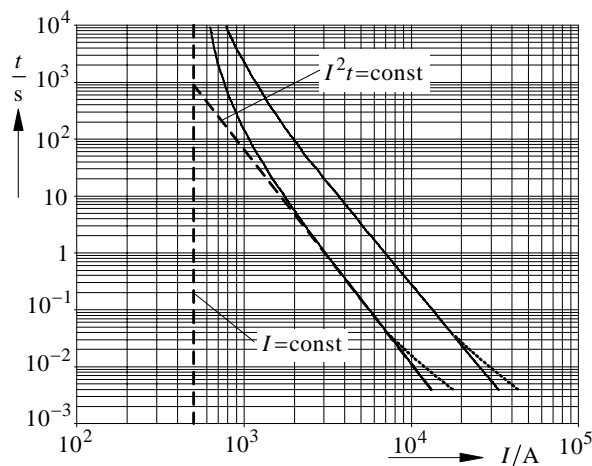
## 11.5 Kurzschlußströme nach stromabhängigen Schutzeinrichtungen

### 11.5.1 Prinzipien des stromabhängigen Schutzes

Der Überstrom- und Kurzschlußschutz hat die Aufgabe, elektrische Betriebsmittel vor unzulässig hohen Strombeanspruchungen zu schützen und die Schäden bei Kurzschlüssen zu begrenzen. Kurzzeitige Überschreitungen des normalen Betriebsstromes müssen jedoch möglich sein, um einen sicheren Netzbetrieb in Lastspitzen zu erlauben. Insbesondere sollen Einschaltvorgänge und der Anlauf rotierender elektrischer Maschinen unbeeinträchtigt ablaufen. In elektrischen Verteilungsnetzen ist die Auslösecharakteristik des Überstromschutzes daher in der Regel stromabhängig, d.h., die Auslösezeit sinkt nach einer vorgegebenen Kennlinie mit dem Ansteigen des Stromes.

**11.5.1.1 Schmelzsicherungen.** Schmelzsicherungen gehören zu den klassischen Schutz-einrichtungen mit stromabhängiger Auslösecharakteristik. Sie stellen im Prinzip eine Engstelle im Stromkreis dar, die infolge des erhöhten Widerstandes stärker erwärmt wird als die Leiter der anderen elektrischen Betriebsmittel.

**Bild 11.40:**  
Kennlinie einer trägen  
500-A-NH-Sicherung



Die Engstelle schmilzt beim Erreichen der Schmelztemperatur durch und leitet so die Ausschaltung des Stromkreises ein. Bild 11.40 zeigt die Kennlinien einer trägen Niederspannungs-Hochleistungssicherung mit einem Nennstrom von 500 A.

Die Sicherungskennlinie liegt wie am Beispiel der linken Kurve in Bild 11.40 dargestellt bei logarithmischer Skalierung beider Achsen asymptotisch zwischen zwei Geraden. Die senkrechte Gerade kennzeichnet den stationären Betrieb bei konstantem Strom und konstanter Temperatur.

$$I = I_n = \text{const} \Rightarrow \ln I = \ln I_n = \text{const} \quad (11.5.1)$$

Die zweite Gerade beschreibt die adiabatische Erwärmung des Schmelzleiters bei kurzen Schmelzzeiten.

$$I^2 t = \text{const} = \int_0^{t_s} i(t)^2 dt = \int_s \Rightarrow \ln t = \text{const} - 2 \ln I = \ln \int_s - 2 \ln I \quad (11.5.2)$$

Bei kurzen Schmelzzeiten, die aber größer als eine Periodendauer sind, ist für den Strom  $I$  der thermisch äquivalente Kurzschlußstrom nach Gleichung (11.3.28) zu verwenden. Die Konstante  $\int_s$  ist das sogenannte Schmelzintegral, ein Parameter der Sicherung, der durch ihren Aufbau festgelegt ist. Das Schmelzintegral repräsentiert die Wärmemenge, die erforderlich ist, um die Sicherung bei vernachlässigbarer Wärmeabgabe nach außen zum Schmelzen zu bringen. Bei hohen Strömen unterscheiden sich die Schmelz- und die Ausschaltkennlinie deutlich voneinander, da dann die Brenndauer des Ausschaltlichtbogens mit der Schmelzzeit vergleichbar ist, diese sogar überschreiten kann. Auch das sogenannte Ausschaltintegral über die gesamte Ausschaltzeit (Kurzschlußdauer) ist ein Parameter der Sicherung, der durch ihre Konstruktion festgelegt ist.

$$\int_0^{t_a} i(t)^2 dt = \int_a > \int_s \quad (11.5.3)$$

Die Ausschaltkennlinie ist für große Ströme in Bild 11.40 gestrichelt angegeben.

Das Funktionsprinzip der Sicherung wird durch das Erwärmungsverhalten des Schmelzleiters in seiner Umgebung bestimmt. Die Schmelzzeit hängt daher von der Umgebungstemperatur und der vorherigen Belastung ab. Aus diesem Grunde kann die Auslösecharakteristik nicht durch eine einzige Kennlinie beschrieben werden. Es existiert vielmehr ein Auslösestreubereich, in den neben den oben erwähnten Einflüssen auch Fertigungstoleranzen eingehen. Die beiden Kennlinien in Bild 11.40 stellen die obere und die untere Grenze dieses Auslösestreubereiches dar.

Wenn der Schmelzleiter nur aus einem einzigen Metall (Kupfer oder Silber) besteht, dann verläuft die Sicherungskennlinie sehr steil, d.h. die Schmelzzeit nimmt mit steigendem Strom sehr schnell ab. In diesem Fall spricht man von flinken Sicherungen, die zum Schutz thermisch sehr empfindlicher Betriebsmittel (z.B. Leistungshalbleiter) eingesetzt werden. In vielen Fällen ist dieses flinke Verhalten unerwünscht, weil es den Betrieb im Überlastbereich oder die optimale Anpassung zwischen Sicherung und zu schützendem Betriebsmittel oder Teilnetz erschwert. Deswegen kommen häufig träge Sicherungen zum Einsatz. Ihr Schmelzleiter, ein Schmelzleiterband, hat einen besonderen konstruktiven Aufbau mit mehreren kurzen Engstellen, von denen die erhöhten Verluste im Überlastbereich durch Wärmeleitung in Längsrichtung abgeführt werden, während sie bei hohen Strömen sehr schnell zum Durchschmelzen führen. Die Sicherung ist dadurch im Überlastbereich bei kleinen Überströmen träge, während sie bei hohen Kurzschlußströmen ausreichend flink bleibt. Eine solche Sicherung besitzt also

mindestens zwei thermische Zeitkonstanten, die sich deutlich unterscheiden. Das träge Verhalten bei kleinen Strömen wird verstärkt, wenn der Schmelzleiter aus einer Kombination zweier Materialien besteht, dem Schmelzleiterband und dem sogenannten Wirkstoff, einem Lotauftrag auf das Band. Vor dem Schmelzen setzt bei ihnen ein Legierungsvorgang zwischen Band und Wirkstoff ein, der die Schmelzzeit verlängert.

**11.5.1.2 Bimetallauslöser.** Bimetallauslöser werden nach den Sicherungen als zweite klassische Methode zur Erzielung einer stromabhängigen Auslösecharakteristik herangezogen. Bei ihnen wird die unterschiedliche temperaturabhängige Längenausdehnung zweier verschiedener Metalle ausgenutzt, um bei einer stromabhängigen Temperaturerhöhung nach Überschreiten einer Grenzauslenkung eine Schalthandlung einzuleiten. In der Elektrotechnik werden häufig Legierungen aus Eisen und Nickel mit unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt. Eine Legierung mit 42 % Ni und 58 % Fe hat zum Beispiel einen Temperaturkoeffizienten der Längenausdehnung von  $4 \cdot 10^{-6}$  1/K, während eine Legierung mit 20 % Ni, 6 % Mn und 74 % Fe einen Temperaturkoeffizienten von  $15,5 \cdot 10^{-6}$  1/K aufweist.

Bimetallauslöser befinden sich bei Niederspannungsgeräten kleinerer Leistung oft direkt im Hauptstromkreis, für höhere Spannungen und größere Leistungen dagegen im Sekundärstromkreis von Stromwandlern, wobei Sättigungswandler eine absolut kurzschlußfeste Auslegung gestatten. Sie werden entweder direkt vom zu überwachenden Strom oder einem Teil davon durchflossen oder aber indirekt von einer Heizwicklung aufgeheizt. Daneben kommen außerdem Kombinationen zwischen den genannten Grundprinzipien zur Anwendung. Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Auslösecharakteristik kann mit Hilfe von zwei gegeneinander arbeitenden Bimetallen, von denen nur eines mit dem zu überwachenden Strom beaufschlagt wird, kompensiert werden.

Die Auslösecharakteristik soll am Beispiel des direkt vom Strom durchflossenen Bimetalls besprochen werden. Sie kann aus der Erwärmungsgleichung eines stromdurchflossenen Leiters nach Abschnitt 6.3.2 abgeleitet werden, wobei der ohmsche Widerstand als von der Temperatur unabhängig angenommen wird. Wir erhalten so

$$\vartheta = \vartheta_{\infty} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \Rightarrow t = -\tau \ln \left( 1 - \frac{\vartheta_g}{\vartheta_{\infty}} \right) = -\tau \ln \left( 1 - \frac{I_g^2}{I^2} \right) \quad (11.5.4)$$

Der Index  $g$  in Gleichung (11.5.4) kennzeichnet die Grenzansprechtemperatur bzw. den dazugehörigen Grenzansprechstrom, bei denen das Bimetall nach theoretisch unendlich langer Zeit gerade anspricht. Der zulässige Dauerstrom des zu schützenden elektrischen Betriebsmittels muß etwas niedriger sein als der Grenzansprechstrom, damit im Normalbetrieb mit Sicherheit keine Auslösung stattfindet. Der Einstellstrom des Bimetalls wird daher etwas kleiner als sein Grenzansprechstrom gewählt.

$$I_g = g I_e \quad \text{mit} \quad g \geq 1 \quad (11.5.5)$$

Wenn nun ein Strom vom  $n$ -fachen Betrag des Einstellstromes auftritt, so gilt mit (11.5.4) und (11.5.5)

$$I = n I_e \Rightarrow t = -\tau \ln \left( 1 - \frac{g^2}{n^2} \right) \quad (11.5.6)$$

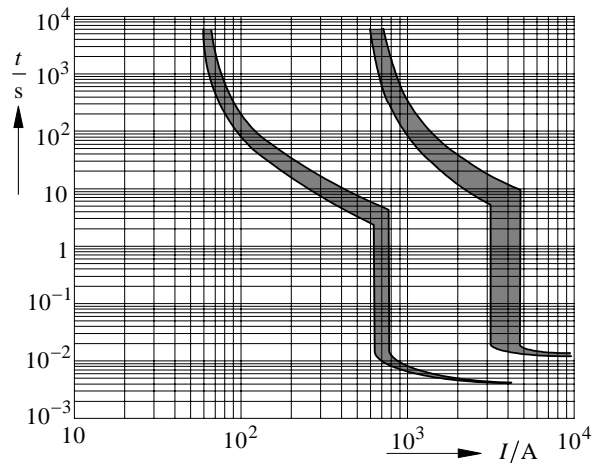
Gleichung (11.5.6) gilt ausgehend vom kalten Betriebszustand, d.h. bei vor dem Auftreten des Überstromes unbelastetem Betriebsmittel. Im anderen Extremfall könnte das Betriebsmittel schon lange vor dem Auftreten des Überstromes mit Vollast betrieben worden sein. Das Bimetall hat dann bereits die Übertemperatur  $\vartheta_e$  angenommen und es ist eine geringere zusätzliche Erwärmung als vom kalten Betriebszustand aus nötig, um  $\vartheta_g$  zu erreichen.

$$t = -\tau \ln \left( 1 - \frac{\vartheta_g - \vartheta_e}{\vartheta_\infty - \vartheta_e} \right) = -\tau \ln \left( 1 - \frac{I_g^2 - I_e^2}{I^2 - I_e^2} \right) = -\tau \ln \frac{n^2 - g^2}{n^2 - 1} \quad (11.5.7)$$

Gleichungen (11.5.6) und (11.5.7) stellen die obere und die untere Grenze des von der Vorbelastung abhängigen Auslösestrombereiches des Bimetalls dar. Die Zeitkonstante des Bimetalls kann mit beiden Gleichungen aus Messungen leicht ermittelt werden.

**11.5.1.3 Elektronische Auslöser.** Stromabhängige Auslösekennlinien werden heute oft mit Hilfe von analogen elektronischen Schaltungen oder auch digital realisiert.

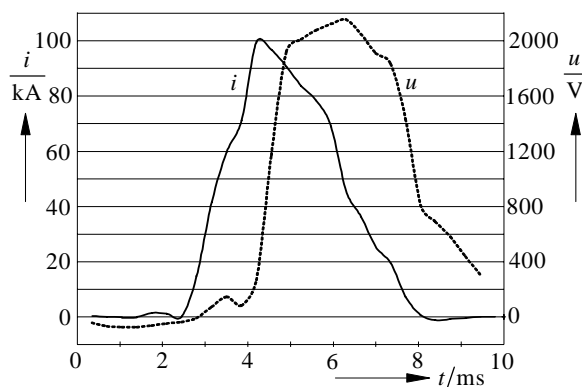
**Bild 11.41:**  
Auslösekennlinien von  
elektronischen Auslösern



Sie gestatten gegenüber den oben beschriebenen, auf physikalischen Gesetzen beruhenden Verfahren eine freizügigere Kennliniengestaltung und damit eine bessere Anpassung an die Erfordernisse des Schutzes und das Erwärmungsverhalten der Schutzobjekte. Bild 11.41 zeigt die Kennlinien zweier Auslöser, die selektiv aufeinander abgestimmt sind, so daß sich ihre Kennlinien nirgendwo schneiden. Im Bereich kleiner Überströme ist eine mit Sicherungen bzw. Bimetallen vergleichbare Stromabhängigkeit gegeben. Bei großen Überströmen wird in einer vom Strom unabhängigen, kurzen Zeit ausgelöst. Eine solche Charakteristik kann ebenso in der Kombination von Bimetallen mit elektromagnetischen Kurzschlußschnellauslösern, die nach Überschreiten eines Ansprechstromes mit sehr geringer Eigenzeit ansprechen, erreicht werden. Die Auslösecharakteristik kann durch weitere Stufen mit stromunabhängiger Auslösezeit ergänzt werden.

## 11.5.2 Strombegrenzung und Durchlaßstrom

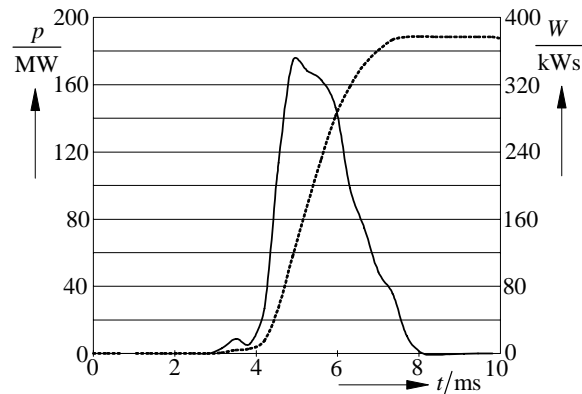
**11.5.2.1 Ausschaltvorgang in einer Sicherung.** Nach dem Durchschmelzen des Schmelzleiters entsteht in der Sicherung ein Lichtbogen. Bei mehreren in Reihe liegenden Engstellen entwickeln sich in entsprechender Weise mehrere Teillichtbögen. Der Lichtbogen, der von der Quarzsandfüllung des Sicherungskörpers eng umschlossen ist, wird sehr gut gekühlt. Infolgedessen entwickelt er nach Abschnitt 11.4 eine hohe Spannung. Diese überschreitet die Betriebsspannung des Netzes, begrenzt dadurch die Höhe des Stromes und führt ihn vor seinem natürlichen Nulldurchgang zu Null.



**Bild 11.42:**  
Ausschaltvorgang einer  
3500-A-Diodensicherung

Der maximale Strom, der während des Ausschaltvorganges auftritt, ist niedriger als der Stoßkurzschlußstrom nach Abschnitt 11.3.2.2. Er wird als Durchlaßstrom bezeichnet und ist wie der Stoßkurzschlußstrom ein Maß für die mechanische Kurzschlußstrombeanspruchung der Schutzobjekte.

**Bild 11.43:**  
Leistung und Energie in  
der Diodensicherung bei  
der Ausschaltung



Im Bild 11.42 ist der Ausschaltvorgang einer 3500-A-Diodensicherung aufgezeichnet. Bei einem Strommomentanwert von etwa 100 kA schmilzt die Sicherung durch. Nahezu unverzüglich tritt eine Lichtbogenspannung auf, die bei einer Nennspannung von 1,3 kV (Amplitude 1,84 kV) einen Maximalwert von nahezu 2,2 kV erreicht. Sie begrenzt den Strom auf einen Durchlaßstrom von 100 kA, wobei die gesamte Stromflußdauer nur etwa 5,5 ms beträgt. Der unbeeinflusste Strom würde im vorliegenden Fall 300 kA überschreiten. Im Bild 11.43 sind die Leistung und der Energieumsatz während des Ausschaltvorganges in der Sicherung dargestellt. Die Leistung erreicht die beachtliche Spitze von 174 MW. Während des Ausschaltvorganges wird eine Energie von 377 kW·s in der Sicherung in Wärme umgewandelt. Die maximal umsetzbare Energiemenge bestimmt das Ausschaltvermögen der Sicherung. Im vorliegenden Beispiel hat es sich bei Ausschaltversuchen gezeigt, daß die Sicherung versagt, wenn die Energie 400 kW·s überschreitet.

Eine strombegrenzende Ausschaltung mit Sicherungen ist prinzipbedingt nur in Niederspannungsnetzen und in Mittelspannungsnetzen bei kleinen Nennströmen durchführbar. In Niederspannungsnetzen kommen daneben auch strombegrenzende Leistungsschalter zum Einsatz. In ihnen werden Kurzschlußkräfte zwischen stromdurchflossenen Leiterstücken ausgenutzt, um beim Überschreiten eines minimalen Ansprechstromes eine praktisch unverzügerte Kontaktöffnung zu erreichen. Die anschließende Strombegrenzung geschieht ebenso wie bei Sicherungen durch den schnellen Aufbau einer hohen Bogenspannung in der Schaltkammer.

**11.5.2.2 Ermittlung des Durchlaßstromes von Sicherungen.** Die Schmelzzeit der Sicherung wird aus der Gleichung

$$\int_0^{\omega t_s} i_k(\omega t)^2 d\omega t = I_s^2 \quad (11.5.8)$$