

c ur

4.5 Der thermische Motorschutz

4.51 Allgemeine Gesichtspunkte für die Auslegung

Die Erfüllung der Forderungen, soweit sie unter den in den allgemeinen Betrachtungen des Abschnitts 4.1 bereits geschilderten Umständen überhaupt möglich ist, kann nur ein auf thermischem Prinzip arbeitendes Schutzorgan bringen, das sich gleichzeitig und unter den gleichen Umständen mit dem Motor erwärmt, weil es vom gleichen oder einem proportionalen Strom durchflossen wird, dessen Wirkung in der gleichen Zeit zur Geltung kommt. Die anfangs gestellte Forderung, daß das

Schutzorgan ein möglichst treues Abbild des Motors sein soll, kann theoretisch nur durch ein temperaturabhängiges Meßglied erfüllt werden. Bei völliger thermischer Kongruenz wäre der Motor auch bei Betrieb mit wechselnder Belastung immer geschützt. Praktisch ist das jedoch mit den einfachen, aus der Massenfabrikation stammenden Geräten nur bedingt möglich, aber doch in weitaus höherem Maß erzielbar als mit jedem anderen Schutzelement.

Deshalb sind die Bedingungen, die das Vorschriftenwerk Deutscher Elektrotechniker (VDE) an thermische Auslöser und Relais stellt, wesentlich strenger dem Motorschutz angepaßt als bei den für den Leitungs- und Netzschutz gedachten Einrichtungen, wie Sicherungen, Kleinautomaten und magnetischen Geräten.

In den Leitsätzen für Motorschutzschalter mit thermisch verzögerter Überstromauslösung (VDE 0665) wird verlangt, daß, bezogen auf 20° C Raumtemperatur und betriebswarmen Motor, die thermische Auslöseeinrichtung bei einer Überlastung von 5%, also bei 1,05fachem Motornennstrom I_{nM} , innerhalb von 2 h nicht zur Auslösung führen darf, daß diese aber bei einer 20%igen Überlastung, also bei 1,2fachem I_n , in der gleichen Zeit mit Sicherheit erfolgen muß (s. auch VDE 0660, Tafel 10, § 34, Tafel 9 im Anhang). Bei 50%iger Überlast, also bei 1,5fachem Motornennstrom, muß der Motor nach VDE 0530 § 43 in längstens 2 min vom Netz getrennt werden. $1,05 I_{nM} = I_{g_u}$ bezeichnet man als unteren, $1,2 I_{nM} = I_{g_o}$ als oberen Grenzstrom der Auslöseeinrichtung. Der untere Wert ist mit Rücksicht darauf gewählt, daß der Motor auch bei um 5% zu niedriger Netzspannung mit gleicher Leistung und gleichem $\cos \varphi$ betrieben werden muß (VDE 0530 § 65); der obere stellt einen Erfahrungswert dar, der mit Rücksicht auf den Schutz gegen kleine betriebsmäßige Überströme gerade noch erträglich erscheint. Meist wird mit Rücksicht auf die unvermeidbaren Herstellungstoleranzen ein Grenzstrommittelwert von $I_g = (1,1 \text{ bis } 1,15) I_{nM}$ gewählt. Alle diese Festlegungen gelten für Dauerbetrieb; bei aussetzendem oder kurzzeitigem Betrieb müssen andere, den Verhältnissen entsprechende Werte ermittelt und der Bemessung zugrunde gelegt werden (s. Abschnitt 7.3 und 7.4).

Der Einstellstrom I_e ist innerhalb eines mehr oder weniger großen Bereichs mittels eines Zeigers auf der Stromskala der Schutzeinrichtung wählbar. Durch die Zeigerstellung wird entweder die Spannung einer Feder (Schmelzlotrelais) oder der Abstand geändert, den ein Bimetallstreifen bei seiner Krümmung zu überbrücken hat (s. Abschnitt 4.1 und 4.2). Ein großer Einstellbereich ist, wie in Abschnitt 4.1 eingehend dargestellt, zur gegenseitigen Anpassung der Nennströme von Motor I_{nM} und Schutz-einrichtung I_{n_s} und für die Berücksichtigung der Anlauf- und Betriebsverhältnisse nötig.

Der Auslöse- oder Ansprechstrom I_a – das ist nach der Definition in 4.1 der Stromwert, bei dem die Anregung oder Einleitung des Auslösevorgangs erfolgt, wird daher nicht auf den Auslösenennstrom I_{n_s} bezogen, sondern auf den Einstellstrom I_e ; denn dieser bildet ja die Basis für den jeweils vorliegenden Betriebsfall.

$$I_a = (1,05 \text{ bis } 1,2) I_e \approx 1,15 I_e. \quad (35)$$

4.511 Strom-Zeit-Kennlinie und Zeitkonstante

Die Auslösezeit t_a ist bei einer thermischen Schutzeinrichtung nicht wähl- und einstellbar. Sie ergibt sich als abhängige Größe für das Verhältnis \ddot{u} von Überstrom I_u zu Einstellstrom I_e mit

$$t_a = f\left(\frac{I_u}{I_e}\right) = f(\ddot{u}) \quad (36)$$

zwangsläufig aus der Strom-Zeit-Kennlinie, deren allgemeine Form für den thermischen Motorschutz durch Bild 36 wiedergegeben werden soll. Ihre Abszisse wird durch die

Werte $\ddot{u} = \frac{I_{\ddot{u}}}{I_e}$, ihre Ordinate durch die Werte der Auslösezeit t_a gebildet. Sie setzt

daher mit dem Grenzstrom $I_g = 1,15 I_e$ für praktisch unendlich lange Auslösezeit t_a an und verläuft für immer kleiner werdende t -Werte bei wachsendem \ddot{u} mit praktisch quadratischer Abhängigkeit zur Zeit, wie er sich für eine thermische Auslöseeinrichtung aus den Formeln (28) und (31) von selbst ergibt. Die Wahl des Überstromverhältnisses \ddot{u} anstatt des Überstroms $I_{\ddot{u}}$ macht die Strom-Zeit-Kennlinie von den absoluten Stromwerten unabhängig, gibt ihr also einen allgemeingültigen Charakter. Wie bereits erwähnt, kann man beim Motorbetrieb im Überstromgebiet ($I > I_{nM}$) folgende Zonen unterscheiden:

a) das Gebiet der *kleinen, betriebsmäßigen Überlastungen* durch zu hohe mechanische Beanspruchung, zu niedrige Netzspannung bei gleicher Last usw. Es reicht vom Einstellstrom I_e [praktisch von (1,05 bis 1,2) I_e] bis zum $\sqrt{3}$ -fachen Wert von $I_{nM} = 1,73 I_{nM}$, dem Strom, den der Motor bei Zweiphasenlauf im Mittel aufnimmt;

b) das Gebiet der *kurzen, betriebsmäßigen Überlastungen von höherem Wert*, z. B. Anlaufströme, Stromstöße usw., bei denen eine Abschaltung nicht erfolgen darf, solange sie dem Motor keinen Schaden bringen. Es reicht vom 1,73fachen bis zum 6- bis 8-fachen I_{nM} , denn so hoch können im äußersten Fall die Anlaufströme direktgeschalteter Käfigankermotoren werden;

c) das Kurzschlußgebiet vom 6- bis 8fachen I_{nM} bis zu den Werten für den Kurzschlußstrom, die sich aus den Stromkreisdaten ergeben können (s. Abschnitt 3.1). Die Auslösung muß in kürzester Zeit erfolgen, um die Zerstörung von Motor und Leitungen, unter Umständen auch sekundäre Schäden, wie Brände usw., auszuschließen. Von Bedeutung ist für das Motorschutzgerät die Höhe des Stoßkurzschluß-Wechselstroms (symmetrischen Kurzschlußstroms), weil dieser durch die thermischen Glieder bzw. die Heizwicklungen fließt und bei kleinem t_a von den Kontakten des Schutzschalters unterbrochen werden muß. Daneben kommt noch die Stoßstromamplitude I_s zur Wirkung, die auf die Schalter und Schutzgeräteteile starke dynamische Kräfte ausübt (s. Abschnitt 3.1 und 5).

In der Strom-Zeit-Charakteristik Bild 36 sind die drei Zonen eingezeichnet. Sie enthält neben der „kalten“ (1) auch noch die „warme“ (2) Auslöserkurve, die dann gilt, wenn das thermische Glied durch lange Zeit mit dem Strom I_e vorgeheizt ist. In diesem Zustand ergeben sich verständlicherweise bei gleichen Überströmen kürzere Auslösezeiten; die warme Kurve verläuft daher gegenüber der \ddot{u} -Achse steiler.

Es soll hier gleich darauf hingewiesen werden, daß die Auslösekennlinie einer thermischen Schutzrichtung nicht als mathematisch exakte Funktion zwischen Strom und Zeit aufgefaßt und gewertet werden darf, sondern einen mehr qualitativen Charakter hat. Schon durch die VDE-mäßig bedingten beiden Werte für die Grenzströme ($I_g = 1,05$ und $1,20$) ergibt sich ein gewisses Streuband, das sich namentlich im Gebiet der kleineren Überlastungen sehr stark auswirkt. Dazu kommen noch die technologisch durch Materialungleichheiten und die produktionstechnisch bedingten Abweichungen, die namentlich bei der steil verlaufenden Kurve im Überstromgebiet ganz erhebliche Unterschiede in den Abschaltzeiten bei gleichem erregenden Stromwert hervorrufen können. Ganz besonders trifft das für die warme Auslösekurve zu, weil diese in ihrem ganzen Verlauf steiler ist als die kalte. Aus dem gleichen Grund spielt

gerade bei ihr die Wahl des Grenzstromwerts ($1,05 I_e$ oder $1,2 I_e$) eine so maßgebliche Rolle, daß warme Kurven bei praktischen, namentlich rechnerischen Ermittlungen mit einiger Vorsicht zu verwenden sind. Bild 37 gibt ein Bild der Streuverhältnisse, und zwar bedingt durch die zwei Werte des Grenzstroms I_g und durch technische

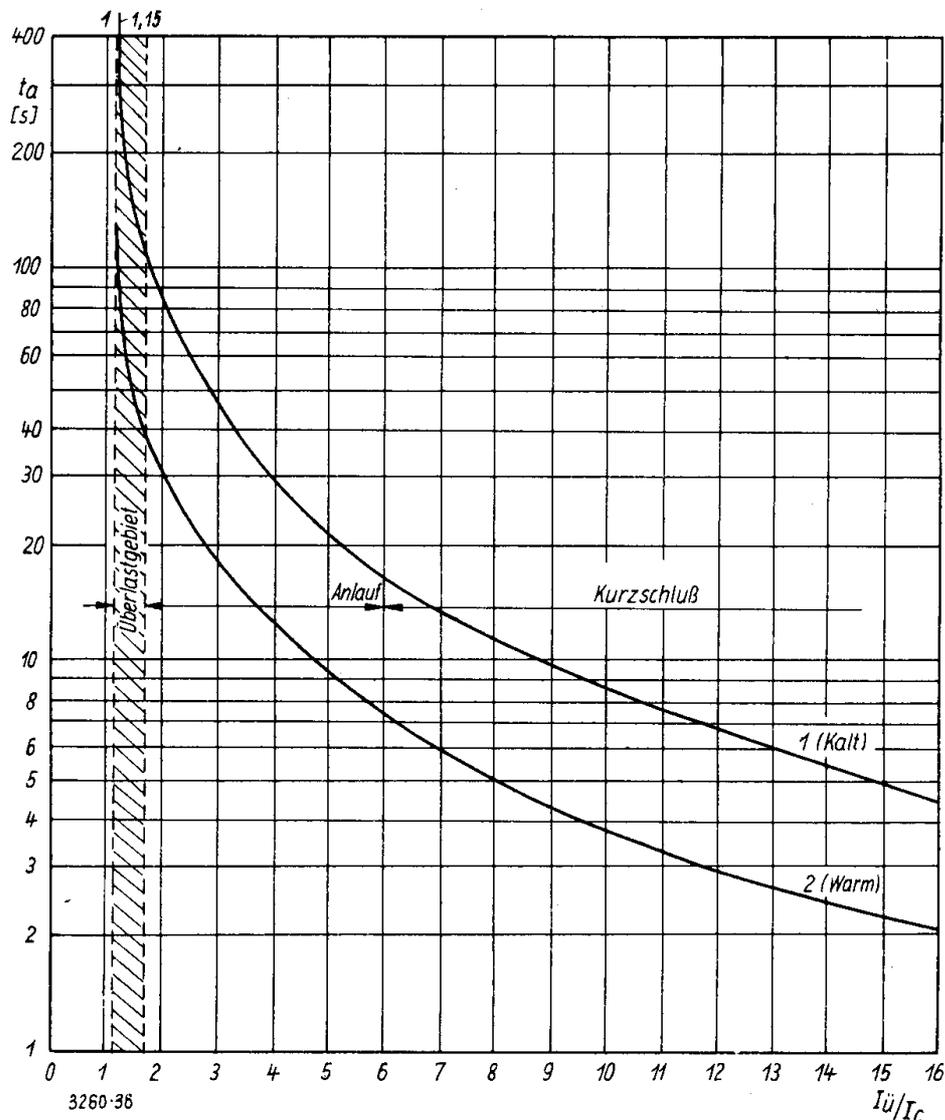


Bild 36. Auslösekennlinie (Strom-Zeit-Charakteristik) eines thermischen Relais für kalten und betriebswarmen Zustand, mit den drei Auslösebereichen (kleine Überlast, Anlauf, Kurzschluß)

Streuung der kalten und warmen Werte. Man sieht, daß in der Nähe des oberen Grenzstroms, wo die warme Kurve sehr steil verläuft, die Auslösezeiten um 50% und mehr streuen können. Mit dem flacheren Verlauf der Kurve sinken die Streufehlerwerte allerdings schnell ab und sollen im Gebiet der kleinen Überströme, die ja hier besonders interessieren, nicht mehr als 10% betragen. Die listenmäßigen Angaben über solche Auslösekennlinien sind oftmals Mittelwerte aus mehr oder weniger großen Bereichen, haben daher für die praktische Anwendung meist nur bedingten Wert und

müssen, wenn nötig, durch Versuche kontrolliert werden. Auslösezeit und -verhalten wird noch wesentlich von dem Umstand bestimmt, ob das thermische Element unmittelbar vom Strom oder einem mehr oder weniger proportionalen Stromwert durchflossen wird (direkte Beheizung) oder ob es durch eine Zusatzheizeinrichtung die Wärme nur mittelbar erhält (indirekte Beheizung). Bei *direkt beheizten* Elementen fließt der zu überwachende Primärstrom unmittelbar durch den Bimetallstreifen oder das Schmelz-

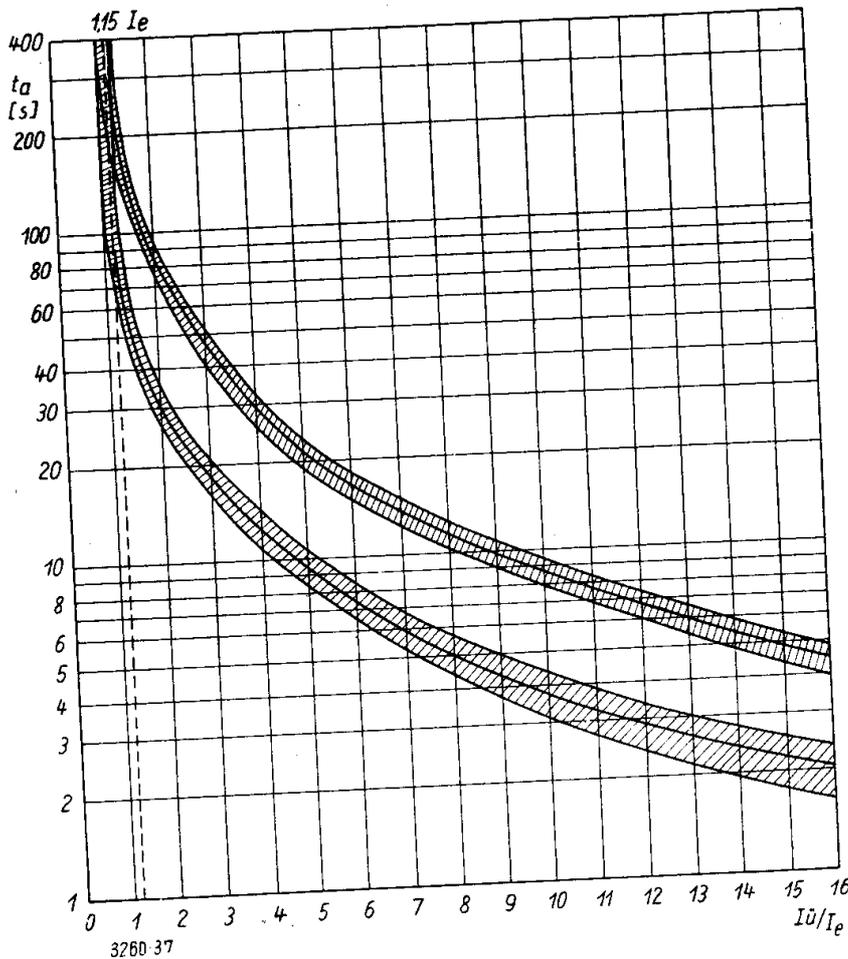


Bild 37. Streuverhältnisse beim thermischen Auslöser

lot, wirkt also ohne Vermittlung zwischengeschalteter Stoffe, sei es Luft oder Isoliermaterial, auf das Auslöseorgan ein. Es kann also weder eine Verzögerung noch eine Verfälschung der Stromwirkung eintreten.

Bei *indirekt beheizten* Elementen ist um das eigentliche Schutzorgan meist eine Heizspirale gewickelt, die vom Meßstrom direkt durchflossen wird und ihre Wärme durch Kontakt oder über ein mehr oder weniger dickes Zwischenmedium (Luft, Isoliermaterial), also durch Konvektion und Leitung auf die Schutzorgane (Bimetallstreifen, Lotkörper), überträgt. Das geschieht nicht ohne Wärmeverluste an die Umgebung, die das Resultat verfälschen. Ferner stellt sich stets in den unvermeidlichen Zwischenschichten ein Temperaturgefälle ein, so daß sowohl die im Heizkörper erzeugte Wärmemenge als auch die Temperatur des Heizkörpers höher sind als die für die Anregung der

Schutzeinrichtung tatsächlich zur Wirkung kommende. Ferner ergibt sich bei diesem indirekt beheizten Element stets eine Wärmestauung in der Heizwicklung, so daß die in der Heizwicklung erzeugte und gespeicherte Wärme auch noch wirkt, nachdem die Ursache, also der Überstrom, schon auf den betriebsmäßigen Nennstrom zurückgegangen ist oder überhaupt zu fließen aufgehört hat. Die Tatsache, daß die Schutzeinrichtung dann doch noch mit einer zeitlichen Verzögerung ohne Grund, also fälschlich, anspricht, bezeichnet man als *Nachauslösung*. Sie ist allen indirekt beheizten Elementen eigentümlich und tritt am deutlichsten nach Anlaufvorgängen in Erscheinung, so daß der ordnungsgemäß hochgefahrte Motor nach erfolgtem Anlauf und Abklingen des Anlaufstroms praktisch durch Nachheizung wieder abgeschaltet wird [26], [67]. Die Lieferwerke geben mitunter Kurven an, aus denen zu ersehen ist, wie lange ein Motor mit dem Anlaufstrom belastet werden kann, ohne daß eine Auslösung durch Nachheizung zu befürchten ist. Da dabei aber wieder ein Unterschied zwischen Anlauf vom kalten oder warmen Zustand aus besteht, gibt der praktische Versuch den besten Aufschluß (Bild 36) [67].

Neben diesem indirekt beheizten Element gibt es noch solche, bei denen die Erwärmung des Heizelements (Lotes) durch induktive (transformatorische) Einwirkung geschieht. Sie haben wohl eine Zeitverzögerung und einen Wärmeverlust zur Folge, aber keine Nachheizung.

Die nicht direkt vom Primärstrom, sondern vom Sekundärstrom eines Wandlers durchflossenen Heizelemente verhalten sich je nach der Anordnung wie direkt oder indirekt beheizte; es kommt allerdings noch dazu, daß die Proportionalität zwischen Primär- und Sekundärstrom bei der im hohen Überstrom- und Kurzschlußgebiet eintretenden Sättigung des Wandler Eisens nicht mehr in vollem Maße besteht, so daß der auf das Heizelement einwirkende Sekundärstrom kein treues Bild der Überlastung gibt. Diese Eigenschaft wird auch manchmal zum Schutz der Auslöseelemente ausgenutzt, weil sie im Kurzschlußgebiet den wirksamen Strom auf einen unschädlichen Wert begrenzt (s. Abschnitt 6.2). Man spricht dann vom Schutz durch Sättigungswandler und legt diese absichtlich mit höherer Streuung aus.

Alle indirekt beheizten Wärmelemente haben keine ausgeprägten Zeitkonstanten mehr, denn diese werden von der Stromstärke abhängig. Der Erwärmungsvorgang folgt nicht mehr dem einfachen Gesetz; die Erwärmungskennlinie hat einen anderen Verlauf.

Cohn [34] spricht daher in solchen Fällen von einem „Zeitfaktor“ und setzt diesen der Zeitkonstante eines gedachten einfachen, homogenen Wärmelements gleich, das den gleichen Grenzstrom wie das inhomogene hat und nach der gleichen Zeit auslöst.

Für den thermischen Schutz gelten, da sich Erwärmung und Abkühlung unter den gleichen physikalischen Verhältnissen vollziehen, wenn er für den Motorschutz brauchbar sein soll, die gleichen Formeln, wie sie in Abschnitt 2 für den Motor entwickelt wurden, also auch die Formel (5) und (7) (für τ in diesem Fall ϑ gesetzt):

für den Erwärmungsvorgang:

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_A}} \right) \quad t = T_A \ln \frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta_{\max} - \vartheta};$$

für die Abkühlung:

$$\vartheta = \vartheta_{\max} e^{-\frac{t}{T_A}} \quad t = T_A \ln \frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta}. \quad (37)$$

Darin bedeutet:

ϑ die Übertemperatur im allgemeinen, also die Differenz zwischen der tatsächlichen Temperatur des Schutzgeräts und der Raumtemperatur ϑ_0 , in °C;

ϑ_{\max} Grenzübertemperatur, die sich nach Eintritt des Wärmegleichgewichts einstellt, in °C;

t Zeit in s (bzw. t_a Zeit bis zum Ansprechen der Schutzeinrichtung);

T_A Zeitkonstante des Schutzelements = $\frac{G c_s}{O c_a}$, nach Formel (4), Abschnitt 2.

Sie ist, wie noch näher ausgeführt werden soll, eine dem Schutzelement (Schmelzlot oder Bimetallstreifen bzw. Bimetallpaket) eingeprägte Zahl mit der Dimension einer Zeit, bleibt für alle Belastungsfälle praktisch gleich, denn c_a und c_s sind körperliche

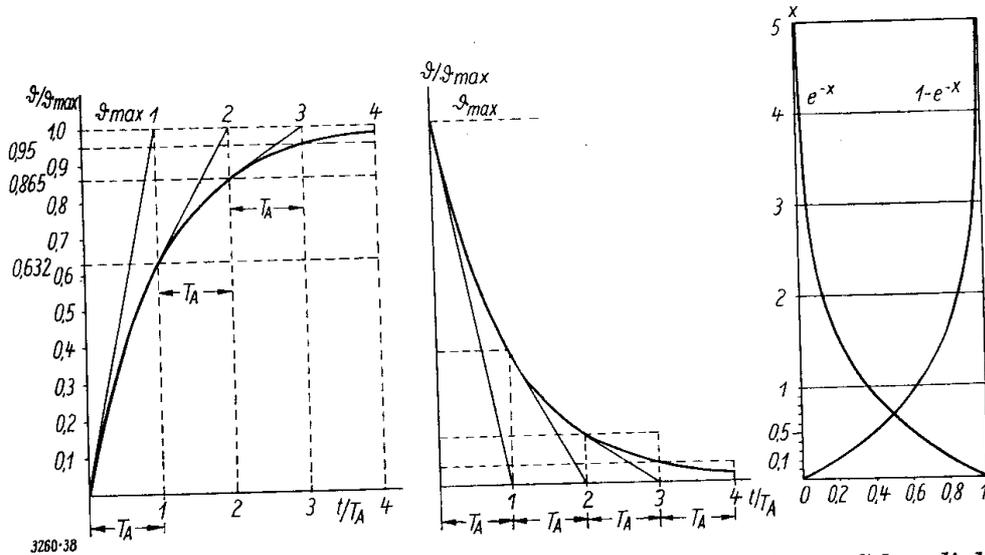


Bild 38. Erwärmungs- und Abkühlungskennlinie eines thermischen Schutzgliedes
(Nebenbild: Darstellung der Funktion e^{-x} und $1-e^{-x}$)

Konstanten des Schutzgliedes und werden außer c_s , das eine geringe Abhängigkeit von der Temperatur besitzt, weder von der fließenden Stromstärke noch vom Zustand oder von der Umgebung beeinflusst. T_A wird durch die Subtangente der Erwärmungs- und Abkühlungslinien dargestellt (s. Bild 38) und ist gleich der Zeit, in der der Körper (in diesem Fall der Wärmeauslöser oder das thermische Relais bei konstanter Wärmezufuhr) seine zulässige Höchsttemperatur bei Speicherung der gesamten erzeugten Wärmemenge ohne jede Abgabe an die Umgebung erreichen würde. Nach T [s] kommt das Heizelement bei normalem Erwärmungsablauf auf 63% ϑ_{\max} , nach $3 T$ auf 95% ϑ_{\max} , also praktisch auf Endtemperatur.

4.512 Gesichtspunkte für die Wahl des Einstellstroms und der Zeitkonstante

Als wichtigste Frage für die Lösung des Schutzproblems gilt daher, wie groß der Einstellstrom I_e und die Zeitkonstante T_A der Schutzeinrichtung sein sollen oder müssen, um den optimalsten Motorschutz zu erreichen.

Der Einstellstrom soll bei Dauerbetrieb dem Nennstrom des Motors entsprechen, bei Kurzzeit- und Aussetzbetrieb kann er je nach dem Betriebsfall höher sein (s. Abschnitt 7.4).

Dann erfolgt das Ansprechen der Schutzeinrichtung bzw. die Auslösung des Motorschutzschalters und die Trennung des Motors vom Netz je nach auftretender Stromstärke mit einer Auslösezeit, die dieser durch die Strom-Zeit-Kennlinie zugeordnet ist.

Die richtige Wahl der Zeitkonstante für die Schutzeinrichtung ist schwieriger zu lösen. Daß das thermische Glied ein treues Abbild des Motors darstellt, ist, wie schon festgestellt wurde, ein nicht erreichbares Ideal und, wie die Praxis zeigt, auch nicht einmal nötig. Die marktgängigen Motorschutzschalter müssen Motoren der verschiedensten Herkunft, Strom- und Schutzart versorgen können. Das einzige Kriterium für ihre Arbeitsweise ist der Nennstrom; daher sind sie für alle Motoren mit demselben Nennstrom gleich. Da man nicht für jeden Motor einen eigenen Auslöser berechnen und bauen kann, muß man die Grenzbedingung für die Auswahl festlegen.

Diese ist erfüllt, wenn die Zeitkonstante T_A des Schutzgeräts bei Erwärmung und Abkühlung in allen Betriebsfällen kleiner ist als die des Motors, sich dabei aber diesen so weit anpaßt, daß eine gute Ausnützung des Motors bei besten Betriebsverhältnissen gegeben ist. Ganz im allgemeinen ist eine kleinere Zeitkonstante der Auslöseeinrichtung auch schon deshalb ratsam, weil der Motor kein homogener Körper ist und sich daher in seinen einzelnen Teilen verschieden stark erwärmt (Wicklung, Eisen, inaktiver Körper). Bei Anlaufvorgängen, namentlich im Rotor, kommt es zu Wärmestauungen, die der Auslöser nicht erfaßt, weil er auf den Statorstrom reagiert und von den Vorgängen im Rotor nicht verhältnismäßig beeinflusst wird. Zum Schluß seien als Argumente noch der zusätzliche Leitungsschutz (s. Abschnitt 4.7) und die Möglichkeit einer frühen Zuschaltung nach erfolgter Auslösung (Abschnitt 4.514) erwähnt.

Bild 39 soll das Resultat der eben angestellten Untersuchung zur Beantwortung der Fragen nach der Höhe von Einstellstrom und Zeitkonstante der Schutzeinrichtung verdeutlichen. Der Motor M mit der Zeitkonstante T_M und der zulässigen Grenzerwärmung τ_{\max} wird vor einem Wärmestromauslöser mit der Zeitkonstante $T_A < T_M$ geschützt, der auf den Nennstrom des Motors I_{nM} eingestellt ist ($I_e = I_{nM}$). Bei Überschreitung der höchstzulässigen Motorerwärmung τ_{\max} spricht der Auslöser an und trennt den Motor vom Netz. Es erfolgt die Abkühlung des Motors nach seiner eingepprägten Abkühlungskurve 1 bis 2 in der Zeit t_r auf die Temperatur τ_u . In der gleichen Zeit ist die Temperatur des Wärmeauslösers, seiner kleineren Zeitkonstanten, und der durch sie bedingten steileren Abkühlungskurve 1' bis 2' auf die Temperatur $\vartheta_u < \tau_u$ abgesunken, τ_u hätte sie in der kürzeren Zeit t'_r erreicht. Wird der Motor im Zeitpunkt 2 wieder zugeschaltet, so erwärmt er sich nach der Kurve 2 bis 3 und erreicht seine höchstzulässige Übertemperatur τ_{\max} nach der Zeit t_b . Der Auslöser mit seiner kleinen Zeitkonstante T_A erwärmt sich schneller und hat schon nach der Zeit $t'_b < t_b$ in Punkt 3'' die Temperatur ϑ_x . Er würde den Motor also nach der Zeit t'_b wieder abschalten, ohne daß ein Grund dazu vorhanden wäre, denn die Temperatur der Maschine beträgt in diesem Zeitpunkt erst $\tau_{\max} - \tau_f$, sie ist also wärmemäßig noch nicht voll ausgenützt. Legt man die Grenztemperatur des Auslösers ein wenig höher, z.B. nach $\vartheta_{\max} > \tau_{\max}$, was sich ja meist schon durch das VDE-mäßig festgelegte Verhältnis $I_g = (1,05 \text{ bis } 1,2) I_e$ von selbst ergibt, so erfolgt die Auslösung zum richtigen Zeitpunkt. Dabei ist die Koordinierung der Werte τ_{\max} und ϑ_{\max} nicht so zu verstehen, daß sie in °C die gleiche Größe haben müssen. Man wählt im Gegenteil ϑ_{\max} in °C so hoch als möglich, schon um den Einfluß der Raumtemperatur zu kompensieren. Es ist verständlich, daß dieser um so geringer wird, je höher die Bezugstemperatur ist. Dazu kommt noch, daß dem Konstrukteur die Wahl von ϑ_{\max} freistehen muß, um günstige Verhältnisse und kleine Abmessungen zu erzielen. Daraus

folgt, daß die Wahl des Einstellstroms in der Höhe des Nennstroms richtig ist und daß die Zeitkonstante T_A der Schutzeinrichtung stets etwas kleiner, niemals jedoch größer als die des Motors T_M sein darf. Das gilt für Dauerbetrieb mit Vollast. Bei Kurzzeit- und Aussetzbetrieb ergeben sich fallweise andere Gesichtspunkte für I_e und T_A (s. Abschnitt 7.4). Bei direkt beheizten thermischen Gliedern kann die Zeitkonstante T_A schon aus konstruktiven Gründen niemals größer sein als die des Motors T_M . Bei indirekt beheizten, namentlich solchen mit großen Wärmewiderständen, ist das jedoch

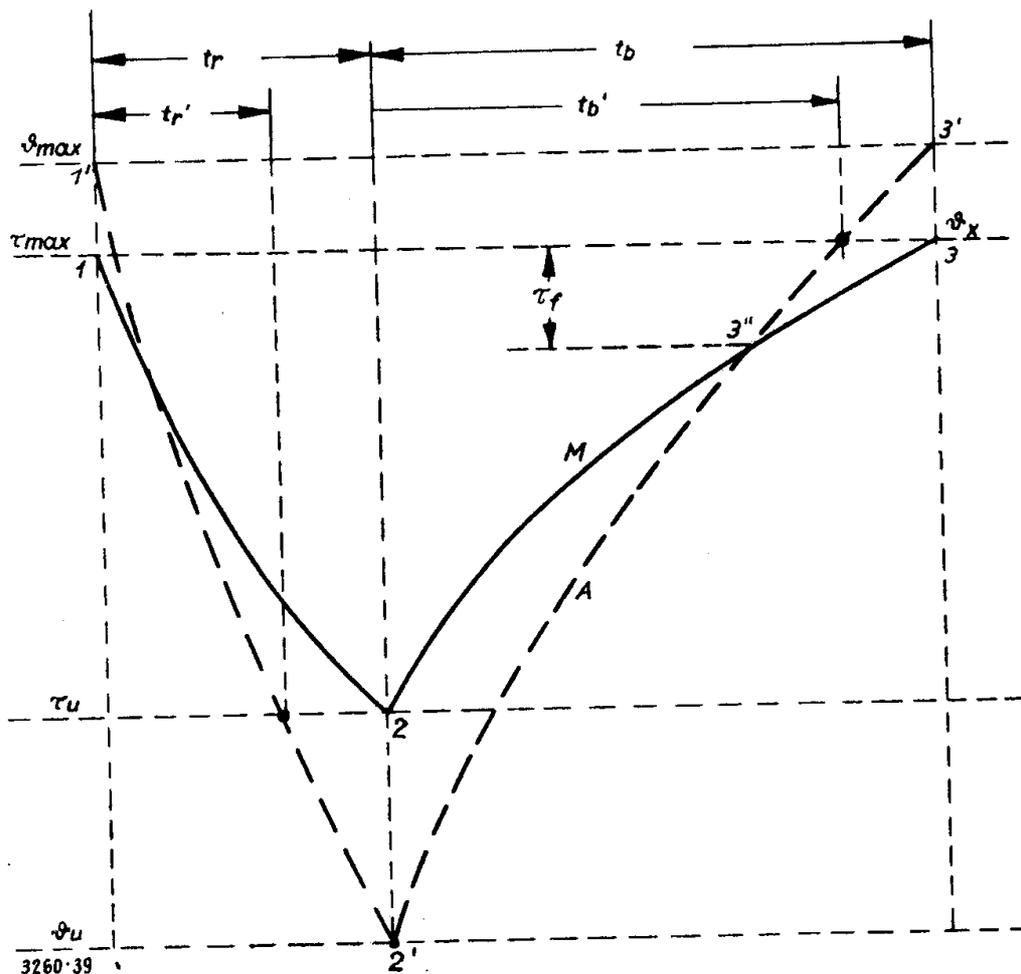


Bild 39. Vergleich der Erwärmungs- und Abkühlungskennlinie von Motor und Schutzglied und ihre gegenseitige Anpassung

durchaus möglich, desgleichen bei Schutzeinrichtungen, die an die Sekundärseite stark gesättigter Stromwandler angeschlossen sind. Sie können im Gebiet der höheren Überströme träger sein als der zu schützende Motor, weil ihre Zeitkonstante mit wachsendem Stromwert stark zunimmt. Bei der Konstruktion indirekt beheizter Schutzeinrichtungen muß dieser Umstand berücksichtigt und darauf geachtet werden, daß die Zeitkonstante im ganzen Überstromgebiet keinen zu hohen Wert hat.

Bei transformatorisch über Wandler mit hoher Sättigung gespeistem Wärmeelement ergibt sich mit steigendem Primärstrom eine immer größere Abweichung vom richtigen

Übersetzungsverhältnis, so daß der Motorstrom nicht proportional auf den Schutzkreis übertragen wird. Hier handelt es sich also nicht um die Änderung der Erwärmungskonstante der Schutzeinrichtung mit wachsendem Strom, sondern um eine Verfälschung des auf diese einwirkenden Stroms. Die Erwärmung der thermischen Glieder erfolgt langsamer und die Abkühlung schneller als beim Motor, so daß insbesondere bei Betrieb mit wechselnder Belastung der Motor überlastet werden kann, bevor die Auslöseeinrichtung zum Ansprechen kommt. Es ist deshalb darauf zu achten, daß die für den Kurzschlußschutz sehr günstige Streuwirkung des Stromwandlers nicht höher getrieben wird, als es sich mit der Schutzwirkung des Motors vereinbaren läßt (näheres s. Abschnitt 6), und daß Streuwandler nur dort angewendet werden, wo sie wirklich nötig sind.

Aus Formel (37) folgt, wenn man annimmt, daß die Grenzüber Temperatur ϑ_{\max} proportional dem Quadrat des Überstroms $I_{\bar{u}}$ ansteigt, also $\vartheta_{\max} = b \cdot I_{\bar{u}}^2$ und analog $\vartheta_g = b I_g^2$ ist, und wenn in Anlehnung an Formel (36) $\ddot{u}_A = \frac{I_{\bar{u}}}{I_g}$ gesetzt wird,

$$t = T_A \ln \frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta_{\max} - \vartheta_g} = T_A \ln \frac{b \cdot I_{\bar{u}}^2}{b (I_{\bar{u}}^2 - I_g^2)} = T_A \ln \frac{\ddot{u}_A^2}{\ddot{u}_A^2 - 1} = T_A \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{\ddot{u}_A^2}} \quad (38)$$

Für ein bestimmtes Überstromverhältnis \ddot{u}_A kann

$$\ln \frac{\ddot{u}_A^2}{\ddot{u}_A^2 - 1}$$

durch die Konstante a ersetzt werden. Die Zeit t wird dann zur Auslösezeit t_a , die Formel (37) geht über in

$$t_a = T_A \ln \frac{\ddot{u}_A^2}{\ddot{u}_A^2 - 1} = T_A a \quad (38a)$$

Es besteht also ein direktes Verhältnis zwischen den Zeitkonstanten T_A und der Auslösezeit t_a , die es ermöglicht, Grenzbedingungen für die Werte von T_A bei Annahme von t_a festzulegen und damit die gewünschte optimale Wirkung der Auslöseeinrichtung zu erzielen [34].

Das ist auch erklärlich, denn die Zeitkonstante stellt ja ein Maß für die Grundmasse des Schutzgliedes, daher auch für seine Wärmeträgheit dar, von der die Auslösezeit unmittelbar abhängt.

Aus der Beziehung (38) kann man leicht ableiten, daß für $\ddot{u}_A = \sqrt{\frac{e}{e-1}} = 1,26$ der Faktor $a = 1$ wird und daher die Zeitkonstante T_A und die Auslösezeit t_a den gleichen Wert haben. Das bedeutet, daß die Auslösung bei 1,26fachem Grenzstrom nach einer Zeit erfolgt, die gleich der Zeitkonstante ist und im Gebiet der höheren Überströme die Abschaltzeit ungefähr dem Quotienten aus der Zeitkonstante T_A und dem Quadrat des Überstromverhältnisses \ddot{u}_A entspricht, denn wenn Gleichung (37) in Form einer Reihe entwickelt wird, ergibt sich für das erste Glied dieser Reihe

$$t_a = \frac{T}{\ddot{u}_A^2} \quad (39)$$

In diesem Zusammenhang läßt sich nach *Franken* [37] auch die am Anfang des Abschnitts gestellte Frage nach dem Wert der Zeitkonstante T_A beantworten. Auf Grund einer einfachen Überlegung kann der obere Grenzwert von T_A für die in den VDE 0665 vorgeschriebenen beiden Grenzströme $I_{gu} = 1,05 I_n$ und $I_{go} = 1,2 I_n$ ermittelt werden, wenn man festhält, daß die Auslösezeit für den warmen Motor nach VDE 0530 bei einer Belastung mit dem 1,5fachen Nennstrom ($I_{1,5} = 1,5 I_n$) nicht mehr als 120 s betragen darf. Wenn man zur Vereinfachung der Rechnung annimmt, daß die Erwärmung proportional mit dem Quadrat der Stromstärke zunimmt, so erreicht der Auslöser mit $I_g = 1,2 I_n$ bei Belastung mit Nennstrom I_n

$$\left(\frac{100}{120}\right)^2 \vartheta_g = 0,69 \vartheta_g = \vartheta_n,$$

bei Belastung mit $1,5 I_n$

$$\left(\frac{150}{120}\right)^2 \vartheta_g = 1,56 \vartheta_g = \vartheta_{1,5}.$$

Damit ergibt sich

$$\ddot{u}_A^2 = \frac{\vartheta_{1,5} - \vartheta_n}{\vartheta_g - \vartheta_n} = \frac{1,56 - 0,69}{1,00 - 0,69} = 2,8 \approx 3$$

und aus Formel (39)

$$T = \ddot{u}_A^2 t_a = 3 t_a. \quad (40)$$

Der höchste Wert der Zeitkonstante T_A der Auslöseeinrichtung darf bei einer Grenzstromereinstellung von $1,2 I_n$ nicht mehr als die rund 3fache Auslösezeit bei 1,5fachem Strom das ist, mit Rücksicht auf die Bedingung in den VDE 0530 § 43, $120 \cdot 3 = 360$ s, also rund 6 min betragen. Wird der untere Grenzstrom $I_{gu} = 1,05$ der Rechnung zugrunde gelegt, so ergibt sich analog ein Wert von $T_A = 1400$ s = 23 min. Diese Werte sind theoretische obere Grenzen. Die Zeitkonstanten handelsüblicher, direkt beheizter Auslöser sind im Verhältnis 1 : 2 bis 1 : 10 niedriger. Bei indirekt beheizten, transformatorisch gespeisten oder künstlich beschwerten Meßgliedern können diese Werte erreicht werden. Eine Überschreitung jedoch ist nicht zulässig.

4.513 Gleichung für die Auslösekennlinie thermischer Elemente

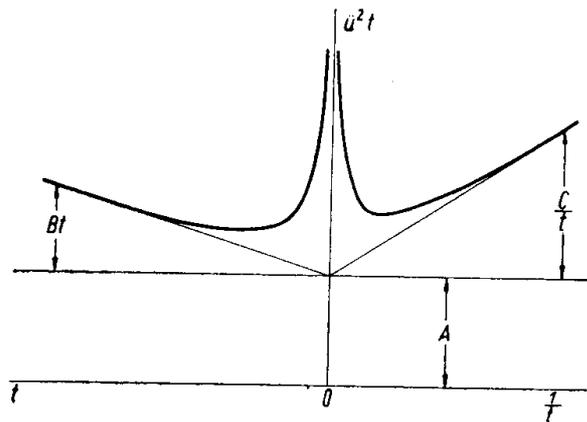
Aus Formel (38) läßt sich übrigens unter Verwendung der allgemeinen Erwärmungsformel (1) noch nach *Franken* [42] eine Gleichung für die Auslösekennlinie der Schutzeinrichtung aufstellen, die den praktischen Bedürfnissen vollauf genügt. Es ist sogar möglich, die Auslösekurve neuer Relais damit vorzuberechnen. Das Produkt $\ddot{u}_A^2 t_a$ ist ja nichts anderes als ein Maß für die Wärmemenge, die die Masse des thermischen Elements bis zur Ansprechtemperatur aufheizt. Ein Teil dieser Wärmemenge $A = Gc_s$ wird im Elementkörper gespeichert und erhöht seine Temperatur, ein zweiter, der Zeit ungefähr proportionaler Teil $Bt = Oc_a t$ wird an die Umgebung abgeführt. Für eine beliebige Zeit t ist

$$Q = \ddot{u}_A^2 \cdot t = Gc_s + Oc_a t = A + Bt. \quad (41)$$

Diese Beziehung, aus der sich die Werte von t_a für $\ddot{u}_A = 1,5$ sehr genau, für solche unter 1,5 mit guter Annäherung ausdrücken lassen, gilt allerdings nur für direkt beheizte Wärmeelemente. Indirekt beheizte benötigen wegen des zwischen Heizwicklung und thermischem Schutzelement bestehenden Wärmegefälles und der durch die

indirekte Übertragung bedingten Wärmestauung zusammen mit den unvermeidlichen Verlusten noch eine zusätzliche Wärmezufuhr, die ebenfalls von Q bestritten werden muß. Deshalb muß die rechte Seite der Gleichung (41) noch durch einen der Zeit t umgekehrt proportionalen Summanden ergänzt werden, der durch $\frac{C}{t}$ ausgedrückt wird. Die Gleichung heißt dann

$$Q = \ddot{u}_A^2 t = A + B t + \frac{C}{t}. \quad (42)$$



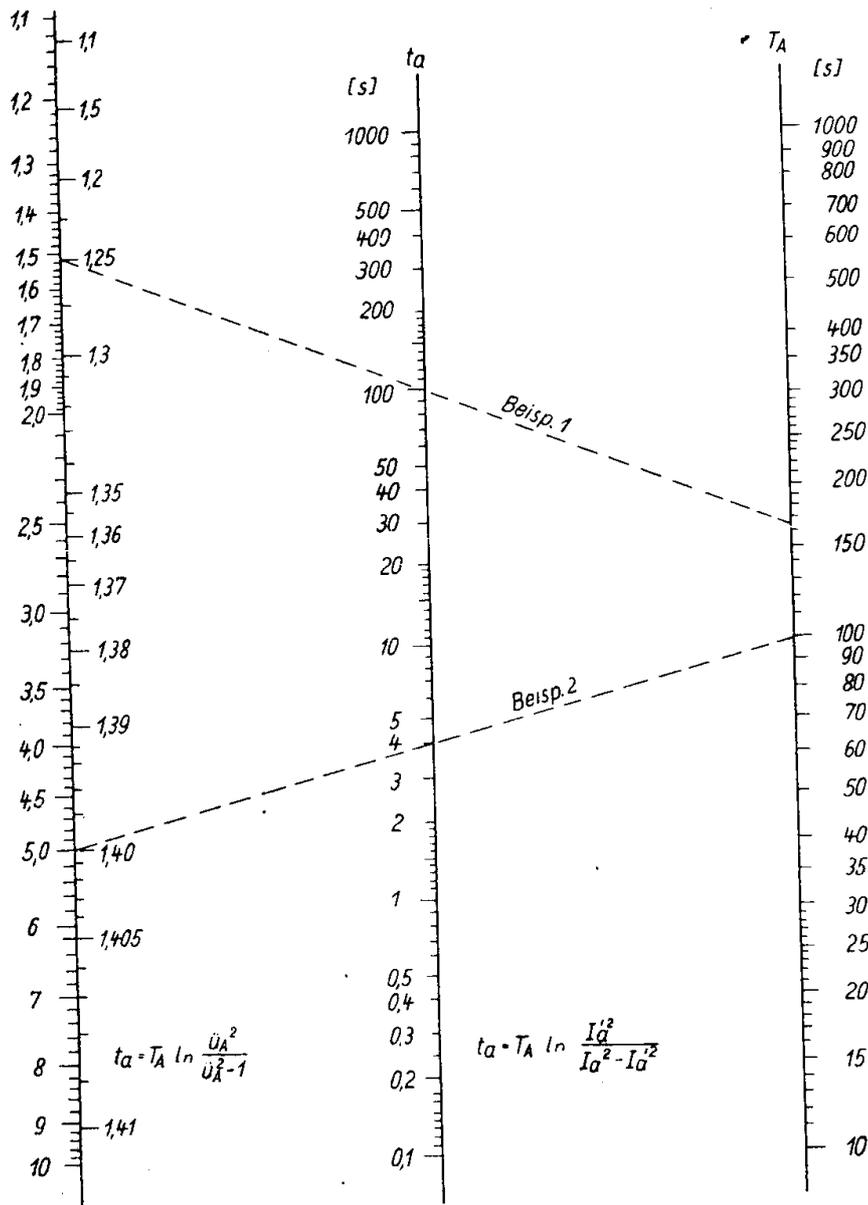
Die Konstanten A , B und C lassen sich verhältnismäßig einfach auf graphischem Wege ermitteln. Die Werte $\ddot{u}_A^2 t$ werden für verschiedene Zeiten t errechnet und in einem rechtwinkligen Koordinatensystem links von der Ordinate für t , rechts von der Ordinate für $\frac{1}{t}$ aufgetragen. Es ergibt sich das obenstehende Diagramm. Die Tangenten an den beiden Kurven schneiden sich in einem Punkt der Ordinatenachse und trennen von dieser den Wert A ab. Das ist leicht einzusehen, denn dieser muß den Fällen $t = 0$ und $\frac{1}{t} = 0$ gleichzeitig entsprechen. Die Werte von Bt und $\frac{C}{t}$ ergeben sich als Ordinaten zu den entsprechenden Zeiten aus den Kurven im linken und rechten Sektor.

Zur Orientierung sei noch erwähnt, daß der Wert von A ungefähr in der Höhe der Zeitkonstante T_A liegt, B bewegt sich in der Größenordnung von 0,5 bis 1, C ist für direkt beheizte Elemente gleich 0, für indirekt beheizte Elemente kann es Werte von 200 bis 2000 annehmen.

Auf die interessanten Zusammenhänge und die mit ihrer Hilfe erzielten Schlußfolgerungen, die selbst den Entwurf neuer Schutzeinrichtungen ermöglichen, also mehr den Konstrukteur und Erzeuger als den Verbraucher interessieren, kann in einer Abhandlung über praktischen Motorschutz nicht näher eingegangen werden. Es sei deshalb auf den Originalaufsatz [41] verwiesen. Gesagt soll nur noch werden, daß die Beziehungen nach Formel (38) nicht für das eigentliche Kurzschlußgebiet, also über den acht- bis zehnfachen Grenzstrom hinaus, gelten, wenn es sich um indirekt oder transformatorisch beheizte Elemente handelt. Da aber dieses Gebiet, wie noch ausführlich dargelegt werden soll, an sich nicht durch den thermischen Auslöser, sondern durch magnetische Zusatzglieder (s. Abschnitt 5) oder vorgeschaltete Sicherungen (s. Abschnitt 4.3, 4, 5, 8) bestritten wird, ist diese Tatsache von geringerer Bedeutung.

Die Strom-Zeit-Kennlinien fertiger Geräte werden im Prüffeld experimentell bestimmt. Ihr Verlauf kann konstruiert werden, wenn einige Punkte $I = f(t_a)$ bekannt sind. Nötig ist vor allem die Kenntnis der Zeitkonstante T_A und des Grenzstroms I_g der Strom-Zeit-Kennlinie. Sie können auf verhältnismäßig einfache Weise ermittelt werden. Ist ein Stromwert der Kurve I_a und seine zugehörige Auslösezeit t_a bekannt, ferner der Strom I'_a mit der doppelt so langen Auslösezeit $t'_a = 2 t_a$, so ergibt sich bei Anwendung der Formel (37) die Beziehung:

$I: I_g = \ddot{u}_A$ (für Beisp. 1)
 $I_a: I'_a$ (für Beisp. 2)



Beispiel 1: Bekannt: $\ddot{u}_A = 1,5, t_a = 100$ s; Gesucht: T_A . Verbindung $\ddot{u}_A = 1,5$ mit $t_a = 100$; schneidet $T_A = 165$ s.
 Beispiel 2: Bekannt: $I_a = 140$ A, $I_a' = 100$ A, $t_a = 4$ s; Gesucht: $I_g, T_A, I_a'/I_a' = 1,4$; daher $\ddot{u}_A = 5, I_g = 28$ A.
 Verbindung $I_a/I_a' = 1,4$ mit $t_a = 4$; schneidet $T_A = 100$ s.

$$t_a = T_A \ln \frac{I_a'^2}{I_a^2 - I_a'^2} \quad \text{und} \quad T_A = \frac{t_a}{\ln \frac{I_a'^2}{I_a^2 - I_a'^2}}. \quad (43)$$

Aus diesen Gleichungen läßt sich T_A berechnen. Den Grenzstrom erhält man nach der Formel

$$I_g = \frac{I_a}{\ddot{u}_A} \quad t_a = T_A \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{\ddot{u}_A^2}} \quad \frac{t_a}{T_A} = \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{\ddot{u}_A^2}} = \ln x. \quad (43a)$$

Ist z. B. $I_a = 140 \text{ A}$, $t_a = 4 \text{ s}$, $I_a' = 100 \text{ A}$, ergibt sich

$$T_A = \frac{4}{\ln \frac{10000}{9600}} = \frac{4}{\ln 1,042} = \frac{4}{2,3 \log 1,042} = \frac{4}{0,041} = 97,3 \approx 100 \text{ s}.$$

In (43a) eingesetzt ist

$$\ln x = 0,04, \quad \log x = 0,0174, \quad x = 1,041 = \frac{1}{1 - \frac{1}{\ddot{u}_A^2}}, \quad \ddot{u}_A \approx 5.$$

Daraus

$$I_g = \frac{I_a}{5} = \frac{140}{5} = 28 \text{ A}.$$

Die Beziehungen zwischen den charakteristischen Größen sind in dem vorstehenden Nomogramm wiedergegeben. Es ist samt dem Beispiel der grundlegenden Abhandlung von *Cohn* [34] entnommen.

4.514 Wartezeit (Rückstellzeit) thermischer Auslöser

Eine nur für das thermische Auslösegerät charakteristische Eigenschaft besteht darin, daß es nicht unmittelbar nach dem Ansprechen wieder einschaltbereit ist. Es benötigt eine gewisse Zeit t_w , die Warte- oder Rückstellzeit, um so weit abzukühlen, daß es eine neue Zuschaltung thermisch ertragen kann.

Da auch der durch Überlastung oder durch einen fehlgegangenen Anlaufversuch zu warm gewordene Motor selbst eine gewisse Betriebspause für den Abkühlungsprozeß benötigt, ist die Rückstellzeit des Auslöseorgans keineswegs ein Fehler, sondern erfüllt die wichtige Aufgabe, den Motor vor unzulässiger Erwärmung zu bewahren. Störend wirkt jedoch die Tatsache, daß die angetriebene Maschine so lange stillstehen muß, bis die Wartezeit abgelaufen ist. Der Betriebsleiter, der jede Pause zu vermeiden sucht, namentlich aber der Arbeiter, dem sie Kürzung in seinem Leistungslohn bringt, haben begründetes Interesse, sie so kurz als möglich zu machen oder ganz zu vermeiden.

Das Schutzgerät hat schon seiner geringen Maße wegen eine steilere Abkühlungslinie, so daß es sich schneller abkühlt als der Motor. Soll dieser Umstand im Sinne einer kurzen Rückstellzeit ausgenützt werden, so muß der Motor eine gewisse thermische Reserve haben, so daß beim Ansprechen des Schutzgeräts seine zulässige Maximaltemperatur noch nicht ganz erreicht ist.

In Bild 40 ist der Fall dargestellt, daß ein Motor mit der Erwärmungskurve M , geschützt durch einen thermischen Auslöser, mit der Erwärmungskurve A im Punkt 1 seine zulässige Endübertemperatur τ_{max} erreicht. Der richtig ausgewählte und auf $I_e = I_{nM}$ eingestellte Auslöser hat seiner steileren Erwärmungskurve wegen schon viel früher seine Grenztemperatur ϑ_g angenommen und befindet sich wie der Motor im Temperaturgleichgewicht (Beharrungszustand). Erfolgt in diesem Zeitpunkt eine willkürliche Abschaltung, so kann ohne Verzug wieder zugeschaltet werden, weil sowohl Motor als auch Auslöser keine höhere Temperatur annehmen können als τ_{max} und ϑ_g . Tritt aber im Punkt 1 plötzlich ein Überstrom $I_{\ddot{u}}$ auf, so steigt die Temperatur des Motors nach der Kurve 1 — 2 auf $\tau_{\ddot{u}}$, die des Auslösers nach Kurve 1' — 2' auf $\vartheta_{\ddot{u}}$.

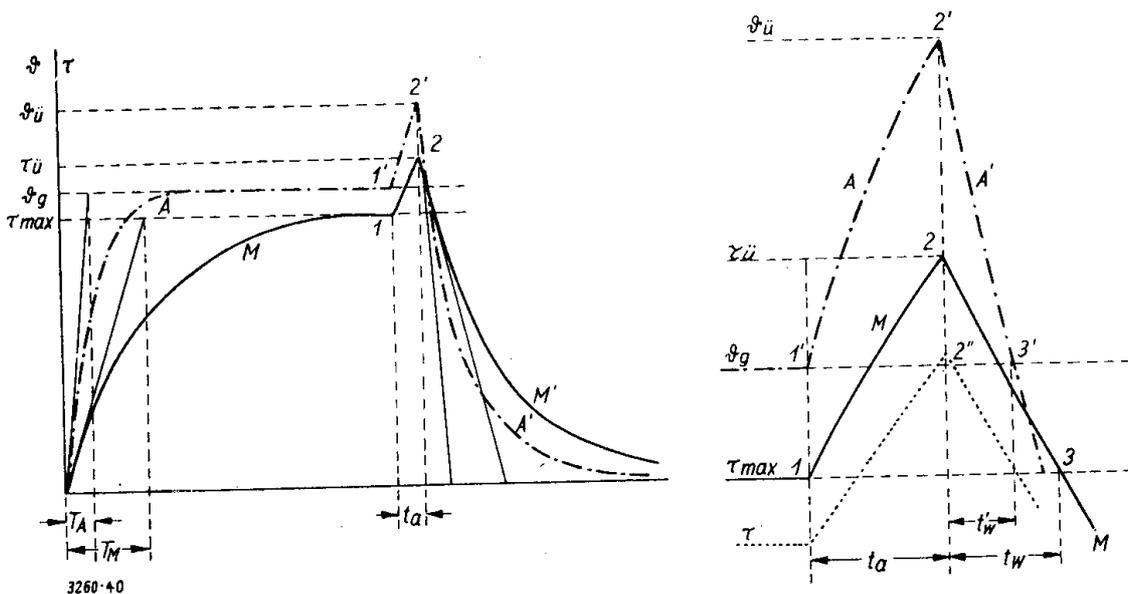


Bild 40. Ableitung der Wartezeit eines Schutzgliedes aus der Abkühlungskennlinie

Dort erfolgt nach der warmen Strom-Zeit-Kennlinie des Auslösers nach der für $I_{\ddot{u}}/I_g$ geltenden Zeit t_a die Trennung des Motors vom Netz. Eine Wiedereinschaltung bei weiterbestehendem Überstrom darf offenbar erst erfolgen, wenn der Motor auf seine höchstzulässige Erwärmung τ_{max} wieder abgekühlt ist, wozu er die Zeit t_w benötigt (Punkt 3).

Der Auslöser hat mit seiner sehr viel steileren Abkühlungskurve A' aber schon im Punkt 3' seine Grenztemperatur ϑ_g wieder erreicht und läßt sich daher nach der Wartezeit t'_w ohne Anstand wieder zuschalten. Soll auch für den Motor die kürzere Wartezeit t'_w gelten, so darf er im Dauerbetrieb nicht bis zur Grenztemperatur τ_{max} , sondern nur bis τ erwärmt, d. h. nicht ganz ausgelastet werden.

Verschwindet die Ursache der Störung, also der Überstrom mit der Abschaltung des Motors vom Netz und tritt beim Wiedereinschalten nicht neu auf, so ist die kürzere Rückstellzeit des Auslösers ohne Belang, weil der Motor trotz des neuen Betriebs sehr bald auf τ_{max} abgekühlt ist. Auch der beim neuen Anlauf entstehende Stromstoß bringt den auf ϑ_g abgekühlten Auslöser kaum zum Ansprechen. Ist das doch der Fall, muß t'_w verlängert, d. h. es muß mit dem Zuschalten noch gewartet werden. Besteht

der Überstrom weiter fort, so wiederholt sich der Vorgang bis zur neuerlichen Trennung des Stromkreises durch den Motorschutzschalter.

Die Wartezeiten t_w und t'_w lassen sich durch die Abkühlungsformel (7a) ausdrücken:

für den Motor ist

$$t_w = T_M \ln \frac{\tau_{\bar{u}}}{\tau_{\max}}, \quad (44a)$$

für den Auslöser

$$t'_w = T_A \ln \frac{\vartheta_{\bar{u}}}{\vartheta_g}. \quad (44b)$$

Gleichung (44a) gibt die Möglichkeit, für t_w die Wartezeit des Motors größenordnungsmäßig zu berechnen, wenn für T_M ein mittlerer Wert von 60 min angenommen und wenn festgehalten wird, daß die höchstzulässige thermische Beanspruchung des Motors nach VDE 0530 § 43 $I_{\bar{u}} = 1,5 I_n$, bei $t_a = 2 \text{ min} = 120 \text{ s}$, bei $\tau_{\max} = 60^\circ$ beträgt. Daraus ergibt sich für t_w nach (44a) ein mittlerer Wert von 4 min [38], t'_w ist schon wegen des viel kleineren Wertes von T_A ($T_M : T_A = 60$) wesentlich niedriger und kann bis auf wenige Sekunden absinken.

Durch diese Betrachtung soll nicht der Wert der Rückstellzeit als solcher für alle praktischen Betriebsfälle festgelegt, sondern nur nachgewiesen werden, daß es sich dabei um eine physikalische Tatsache handelt, die nicht außer acht gelassen werden kann, auch wenn sie vom Betriebsstandpunkt aus unerwünscht ist. Man darf nicht vergessen, daß es Aufgabe des Schutzgeräts ist, den Motor vor Schaden zu bewahren, und daß die Auslösung eines zweckentsprechend ausgewählten und richtig eingestellten Motorschutzschalters mindestens eine sehr ernst zu nehmende Warnung und Aufforderung bedeutet, nach der Ursache zu forschen. Die Wiedereinschaltung zu erzwingen oder gar eine Auslösung durch irgendwelche unerlaubten Eingriffe zu verhindern, heißt den Zweck des Schutzes völlig verkennen. Geschieht die Abschaltung zu häufig, so ist die störende Ursache zu beseitigen und, wenn nötig, der Schalter oder seine Schutzeinrichtung den Betriebsverhältnissen so anzupassen, daß er nur anspricht, wenn wirklich eine Gefahr für den Motor besteht. Ist der Motor nicht zu knapp bemessen und der Motorschutz richtig gewählt und eingestellt, so wird eine Abschaltung selten und die Wartezeit erträglich sein.

4.515 Kurzschlußfestigkeit

Die Hauptaufgabe jeder thermischen Auslöseeinrichtung ist der Schutz des Motors vor der schädlichen Auswirkung kleinerer, dauernder Überströme bei weitgehendster Ausnützung seiner zulässigen kurzzeitigen Überlastungsmöglichkeit, z. B. beim Anlauf oder bei stoßartig auftretenden Beanspruchungen. Sie muß daher mit Rücksicht auf diese Aufgabe bemessen und gebaut werden. Ihre Widerstandsfähigkeit gegen höhere Überströme von längerer Dauer, oder hohe kurzzeitige Strombeanspruchungen, kann nur als Nebenbedingung berücksichtigt werden. Wenn sich der Konstrukteur auch bemühen wird, die thermischen Schutzglieder trotz ihrer notwendigen Empfindlichkeit möglichst überstromsicher zu machen, so hat das seine natürlichen Grenzen. Durch die Induktivität von Magnetspulen, von Schmelzlotrelais oder die Vorschaltung stark streuender Stromwandler (s. Abschnitt 6.2) kann eine gewisse Begrenzung des Kurz-

schlußstroms erzielt werden, die aber nicht so weit getrieben werden darf, daß sie auf Kosten der Meßgenauigkeit der thermischen Glieder geht.

Es ist deshalb wohl in den meisten Fällen nötig, den Kurzschlußschutz anderen zusätzlichen Einrichtungen zu überlassen, die beim Erreichen bzw. Überschreiten der zulässigen Stromstärke den Motorstromkreis ohne Verzug unterbrechen. Als sogenannter „Kurzschlußschutz“ kommen entweder Schmelzsicherungen flinker oder kurzträger Charakteristik in Frage, deren Strom-Zeit-Abhängigkeit im Gebiet der höheren Überströme (6- bis 8facher I_n) keine Bedeutung mehr hat, oder magnetische Auslöser mit unabhängiger Strom-Zeit-Kennlinie, die als Schnellschutz wirken. Beide unter-

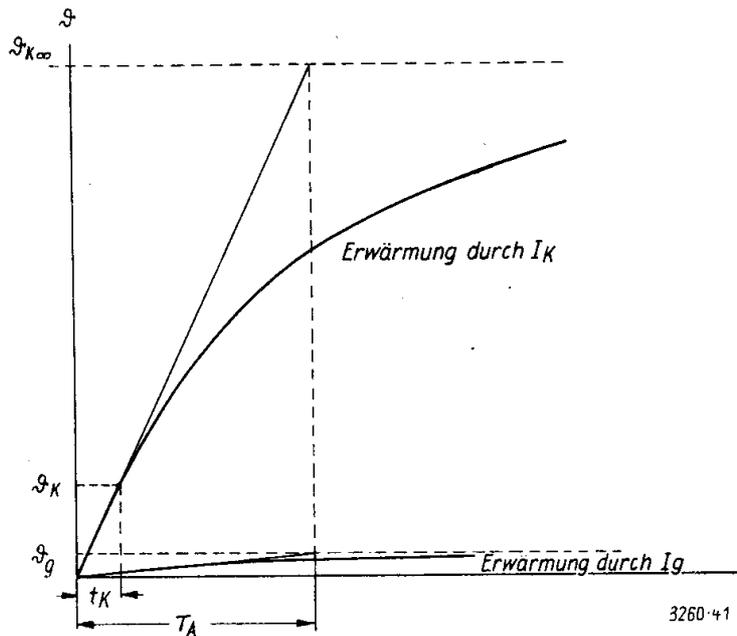


Bild 41. Erwärmungskennlinie des thermischen Gliedes im Kurzschlußfall

brechen den Strom innerhalb weniger hundertstel Sekunden, oftmals noch im Verlauf einer Halbperiode (s. Abschnitt 4.35 und 4.4) und schützen damit nicht allein das thermische Auslöseglied und den Motor selbst, sondern auch den automatischen Stromkreisschalter, der einer längeren hohen Überbelastung auch nicht gewachsen ist (s. Abschnitt 6). Jedenfalls müssen thermische Überstromauslöser so fest sein, daß sie den Kurzschlußstrom des Kreises bis zu dem Augenblick ohne Schaden ertragen, in dem Schnellauslöser oder Sicherungen den Stromkreis unterbrechen.

Die Erwärmung von Motor und Auslöser im Kurzschlußfall vollzieht sich nach den gleichen Gesetzen wie bei Dauerstrombelastung; es gilt deshalb auch die Erwärmungsgleichung Formel (37). Der Unterschied besteht jedoch darin, daß bei der kurzzeitigen Belastung mit hohem Strom I_k während der notwendig sehr kurzen Zeit t_k beim Motor eine nennenswerte Abgabe der in der Wicklung entstehenden Wärme an den Eisenkörper oder gar an die Umgebung nicht erfolgt und auch beim Wärmeauslöser lediglich Speicherung und Aufheizung eintritt, ohne daß es zu dem Temperatúrausgleich des Beharrungszustandes kommt. Der Erwärmungsvorgang spielt sich, wie Bild 41 zeigt, im untersten noch geradlinigen Teil der Kennlinie ab.

Nimmt man den Kurzschlußstrom I_k als konstant an, dann ist nach Cohn [34] analog zur Formel (37)

$$\vartheta_k = \vartheta_{k\infty} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T_A}} \right), \quad (45)$$

wobei ϑ_k die Erwärmung des thermischen Gliedes durch den Kurzschlußstrom I_k in der Zeit t_k darstellt. t_k setzt sich bei Schmelzsicherungen aus der Schmelzzeit und der Lichtbogenzeit (s. Abschnitt 4.3) und bei magnetischen Geräten aus Eigenzeit und Lichtbogenzeit (s. Abschnitt 4.4) zusammen und ist in allen Fällen verschwindend klein gegenüber der Zeitkonstante T_A , die gemäß Abschnitt 4.512 nach Minuten zählt. $\vartheta_{k\infty}$, die das thermische Glied erreichen würde, wenn der Kurzschlußstrom I_k dauernd, also bis zur Erreichung des stabilen Endzustandes (s. Abschnitt 2.1), fließen würde, ist sehr hoch gegenüber der zulässigen Maximalübertemperatur des Motors τ_{\max} oder der Grenzübertemperatur ϑ_g des Auslösers. In ihrem Bereich ist die spezifische Wärmekapazität c_s keine Konstante mehr, so daß auch T_A nicht mehr als solche aufgefaßt werden darf. Abgesehen davon, könnte bei so hohen Temperaturen der Einfluß der Strahlung nicht mehr unberücksichtigt bleiben. Die Formel (45) kann daher nur für einen Bereich gelten, in dem die für sie früher festgelegten Annahmen noch zutreffen. Aus Bild 41 ergibt sich dann die Beziehung

$$\frac{\vartheta_k}{\vartheta_{k\infty}} = \frac{t_k}{T_A},$$

die man für $t_k \ll T_A$ auch durch Reihenentwicklung der Formel (45) als erstes Glied der Reihe erhält. Andererseits ist

$$\frac{\vartheta_g}{\vartheta_{k\infty}} = \frac{I_g^2}{I_k^2} \quad \text{und} \quad \frac{\vartheta_k}{\vartheta_g} = \frac{t_k}{T_A} \left(\frac{I_k}{I_g} \right)^2 = \frac{t_k}{T_A} \cdot k^2, \quad (46)$$

wenn das Kurzschlußstromverhältnis $\frac{I_k}{I_g} = k$ gesetzt wird.

Aus Formel (45) und (46) ergibt sich

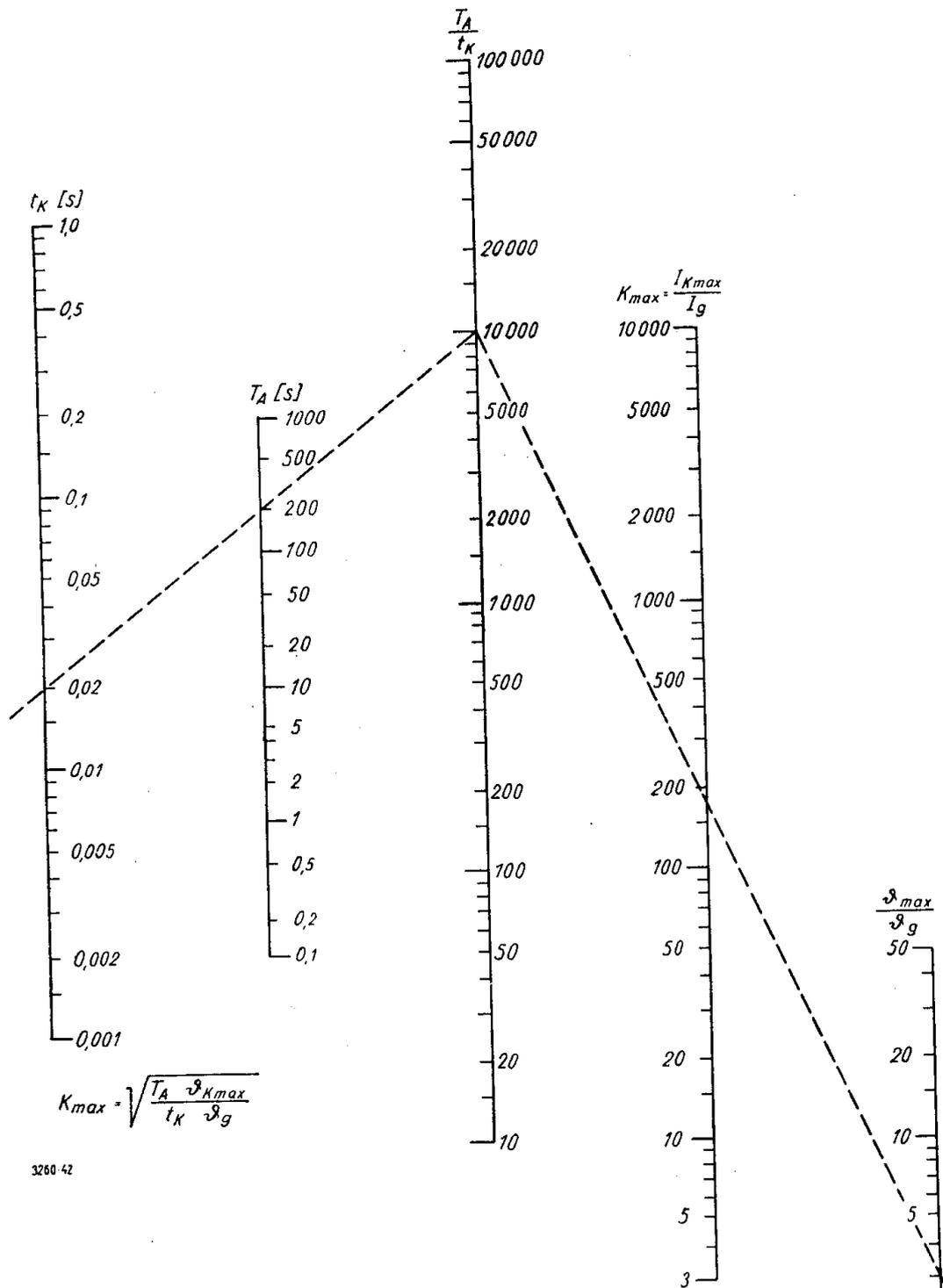
$$k = \sqrt{\frac{T_A \vartheta_k}{t_k \vartheta_g}} \quad (47)$$

und

$$k_{\max} = \frac{I_{k\max}}{I_g} = \sqrt{\frac{T_A}{t_k} \cdot \frac{\vartheta_{k\max}}{\vartheta_g}}. \quad (47a)$$

Aus Gleichung (47) läßt sich die Erwärmung eines thermischen Gliedes bei gegebenem Grenzstrom I_g , bekannter Zeitkonstante T_A und Grenzerwärmung ϑ_g berechnen, aus Gleichung (47a) der höchstzulässige Kurzschlußstrom $I_{k\max}$. Unter seiner Einwirkung wird das Element des Wärmeauslösers in der Zeit t_k um $\vartheta_{k\max}^\circ\text{C}$ aufgeheizt und erreicht dabei die mit Rücksicht auf Bestand und Betriebssicherheit gerade noch erträgliche Grenztemperatur. k_{\max} ist daher der Ausdruck für seine Kurzschlußfestigkeit (s. Tafel 13 im Anhang).

Das Nomogramm (Bild 42) verdeutlicht die Zusammenhänge und läßt die Lösung von Aufgaben ohne umständliche Zahlenrechnung zu. Erfolgt der Kurzschluß, wenn



3260 42

Bild 42. Fluchtlinientafel über den Zusammenhang von t_k , T_A und k_{max} zur Ermittlung der nötigen Kurzschlußfestigkeit eines Wärmeauslösers

Beispiel: In einem Schalter mit $t_k = 0,02$ s sind Wärmeauslöser von $T_A = 200$ s, $\vartheta_{kmax} = 300^\circ C$, $\vartheta_g = 100^\circ C$, eingebaut. Wie groß ist k_{max} ?
 Verbindungslinie $t_k = 0,02$ mit $T_A = 200$ schneidet auf Zapfenlinie T_A/t_k den Wert 10000 ab.
 Verbindungslinie dieses Punktes mit $\vartheta_{kmax}/\vartheta_g = 3$ ergibt $k_{max} = 170$

das Wärmeelement durch den Normalstrom schon seine Grenztemperatur erreicht hat, so gilt

$$k'_{\max} = \sqrt{\frac{T_A}{t_k} \left(\frac{\vartheta_{k_{\max}}}{\vartheta_g} - 1 \right)}.$$

Ist z. B. das Verhältnis $\vartheta_{k_{\max}} : \vartheta_g = 3 : 1$, so ist $k'_{\max} = 0,82 k_{\max}$.

Aus Gleichung (47 a) folgt ferner, daß ein Motorschutzgerät um so kurzschlußfester ist, je größer die Zeitkonstante T_A des Wärmeelements über seiner höchstzulässigen

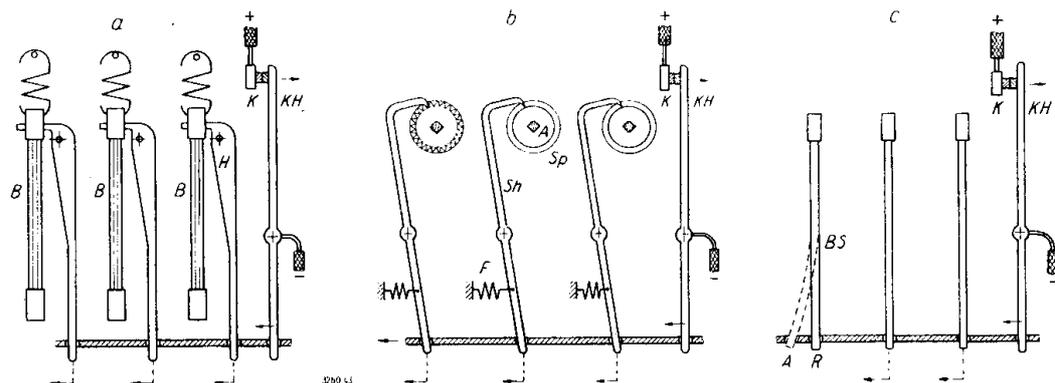


Bild 43. Prinzip und Wirkungsweise der gebräuchlichen Wärmeauslöser

a) Dehnungsbandrelais

Bei Erwärmung streckt sich das Band B , das untere Ende des Hebels H bewegt sich in der Pfeilrichtung, zieht den Kontakthebel KH mit und öffnet den Steuerkontakt K

b) Schmelzlotrelais

Bei Erwärmung wird das Lot, in dem die Achse A des Sperrrades Sp eingeschmolzen ist, weich, der Sperrhebel Sp wird nicht mehr festgehalten und bewegt sich unter dem Zug der Feder F in der Pfeilrichtung. Er zieht den Kontakthebel KH mit und öffnet den Steuerkontakt K

c) Bimetallrelais

Bei Erwärmung biegen sich die Bimetallstreifen BS durch, ihre Enden kommen von der Ruhelage R in die Ansprechanlage A . Der Kontakthebel KH wird mitgezogen und öffnet den Steuerkontakt K

Temperatur $\vartheta_{k_{\max}}$ liegt und je niedriger die Erwärmung beim Grenzstrom I_g ist. Nach ihnen müssen sich die Werte von I_k und t_k richten, damit ein sicherer Betrieb möglich ist.

Direkt beheizte Elemente haben meist eine wesentlich höhere Kurzschlußfestigkeit als indirekt beheizte. Sie kann auch dadurch sehr gehoben werden, daß das Heizelement nicht vom Motorstrom direkt durchflossen, sondern an den Sekundärkreis eines stark streuenden Stromwandlers gelegt wird (s. Abschnitt 6.2).

4.516 Gebräuchliche Formen der thermischen Schutzelemente

Prinzip und technische Ausführung der heute noch in Gebrauch stehenden thermischen Motorschutzeinrichtungen sind verschieden. Bei den *Dehnungsbandelementen* wird die entweder direkt oder indirekt durch die Stromwärme hervorgerufene Längenänderung von Metallbändern benutzt, um einen Auslösevorgang einzuleiten. Bei den

Schmelzlotkapseln dient die Stromwärme dazu, eine mechanische Kupplung dadurch zu lösen, daß sie das Bindemittel verflüssigt. Beim *Bimetallauslöser* wird die verschiedene Längenausdehnung zweier fest miteinander verbundener Metallstreifen dazu benützt, um unter der direkten oder indirekten Wirkung des Stroms eine Krümmung und damit die Möglichkeit einer Kraftwirkung hervorzurufen.

Die Dehnungsbandgeräte sind heute nur noch vereinzelt im Gebrauch und den meisten jüngeren Fachleuten unbekannt. Die Schmelzlotrelais haben sich gut bewährt und werden als thermische Elemente noch bei Motorschutzschaltern namhafter Herstellerwerke verwendet. Der Bimetallauslöser hat wegen seiner Vorzüge augenblicklich eine dominierende Stellung und wird sie nach der Erfahrung der letzten dreißig Jahre wohl auch behalten, sollte nicht eine prinzipiell völlig neue Lösung gefunden werden, die sich dem Motorschutz und der Verwendungsmöglichkeit in kleinen, billigen Geräten noch besser anpaßt. Bild 43 stellt das Prinzip und die Wirkungsweise der drei Auslöselemente schematisch sehr gut dar. Sie ist dem sehr beachtenswerten Aufsatz von *Franken*, dem besten Kenner der Motorschutzgeräte und Förderer ihrer Entwicklung [41], entnommen.