Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 67 (1976)

Heft: 8

Artikel: Thermische Abbilder zum Schutz von Niederspannungsmotoren

Autor: Unterweger, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915154

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Thermische Abbilder zum Schutz von Niederspannungsmotoren

Von H. Unterweger [1])

621.313.13.027.2:621.316.925.4

Eine kurze Gegenüberstellung der Eigenschaften von temperaturmessenden und mit einem thermischen Abbild arbeitenden Schutzeinrichtunge zeigt, dass Abbild-Relais wesentliche Vorteile bieten können. Während ein Vier-Körper-Abbild das thermische Verhalten von Kurzschlussläufer Asynchronmotoren von der Sicht des Wicklungsschutzes aus in allen Betriebsarten gut nachzubilden vermag, bieten Schutzrelais mit einer Ein-Körper-Abbild guten Schutz für den Normalanwendungsfall bei Überlastungen aus dem stationären thermischen Zustand. Gute Schutzeigen schaften bei gleichzeitig guter Ausnutzbarkeit der Überlastungskapazität des Motors bietet ein Zwei-Körper-Abbild. Eine Umschaltung de Wärmeableitwiderstandes entsprechend den unterschiedlichen Kühlverhältnissen des eigenbelüfteten Motors bei Lauf und Stillstand gewährleiste auch den Schutz im Aussetzbetrieb.

Une brève comparaison entre les propriétés de dispositifs de protection mesurant la température et ceux fonctionnant avec un modèle ther mique montre que les relais à modèle peuvent présenter d'importants avantages. Du point de vue de la protection des enroulements un modèl à quatre corps reproduit bien le comportement thermique des moteurs asynchrones à cage pour tous les modes de service; les relais de protectio avec un modèle à un seul corps offrent une bonne protection dans le cas du service normal lors de surcharges en partant de l'état thermiqu stationnaire. De bonnes propriétés de protection, de même qu'une bonne utilisation de la capacité de surcharge du moteur, sont offertes par u modèle à deux corps. Une commutation de la résistance représentant la dissipation de chaleur, conformément aux conditions de refroidissemen du moteur autoventilé différentes en marche et à l'arrêt, assure également la protection en service intermittent.

1. Einleitung

Thermischer Schutz von Motoren bedeutet rechtzeitiges Abschalten vor Erreichen unzulässig hoher Temperaturen der einzelnen Konstruktionsteile in beliebigen Betriebsarten. Die zulässigen Grenztemperaturen sind für die verschiedenen Konstruktionselemente in der Regel unterschiedlich. Bei Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren – und auf sie als die am weitesten verbreiteten Motoren beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen im besonderen – liegen sie für die Isolation der Ständerwicklung je nach Isolationsklasse [1; 2] [2]) zwischen 100 und 200 °C, für den Läufer ohne Wicklungsisolation deutlich höher. Die übrigen Maschinenteile sind in der Regel nicht kritisch in bezug auf betriebsmässige Übertemperaturen.

Die Grenztemperaturen der Isoliermaterialien sind nicht durch einen unverzögert zum Ausfall führenden Fehlermechanismus gegeben, sondern durch das Alterungsverhalten. Gemäss der von *Arrhenius* gefundenen Gesetzmässigkeit (exponentielle Abhängigkeit der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur) beschleunigt sich die Alterungsgeschwindigkeit der Isolation bei einer Temperaturerhöhung um ein materialspezifisches Intervall (z. B. 8...10 K) auf das Doppelte [3; 4]. Da der Alterungsvorgang ein integrierender Prozess ist, sind kurzzeitige Überschreitungen der Dauertemperaturgrenzen zulässig und ohne wesentlichen Einfluss auf die Gesamtlebensdauer.

In Fig. 1 sind die Verhältnisse dargestellt. Die Kurzzeitüberlastbarkeit der Isolation ist für steile Erwärmungsvorgänge von Bedeutung, wie sie bei blockiertem Rotor oder beim Anlauf vorliegen. Die Erweichungsgrenze der üblicherweise zur Anwendung kommenden Lackisolationen ist in jedem Fall zu meiden, da deren Überschreiten praktisch zum Sofortausfall der Isolation führt [5].

2. Schutzmethoden

Zum Schutz gegen die Überschreitung der zulässigen Isolationstemperaturen finden zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren Anwendung [9]:

– direkte Überwachung der Temperaturgrenzen durch in die Wicklungen eingebaute Temperaturfühler,

– Erfassung von erwärmungsverursachenden Grössen (i der Regel des Motorstroms) und daraus Rückschluss auf di Erwärmung.

Als Temperaturfühler in den Wicklungen werden heut vorwiegend Thermistoren mit positivem Temperaturkoeffizien ten (PTC) verwendet, die sich dank dem steilen Verlauf ihre Widerstandscharakteristik im Bereich der Ansprechtemperatu und ihrer geringen Massen dazu bevorzugt eignen. Da mi dieser Methode direkt die Wicklungstemperatur erfasst wird ist sicherer Schutz und volle Ausnutzung der Belastbarkei unter allen Betriebsbedingungen gewährleistet, auch bei er höhter Umgebungstemperatur und behinderter Kühlung Unter Berücksichtigung der thermischen Kurzzeit-Überlast barkeit der Isolation ist die Auslöseverzögerung moderne Fühler ausreichend kurz, um auch bei blockiertem Rotor un zulässige Beanspruchungen der Wicklungen zu vermeiden. De Schutz des Rotors durch Einbau von Temperaturfühlern is wegen der Informationsübertragung zu einem ruhenden Punk der Umgebung sehr aufwendig, so dass im Normalfall nur ei indirekter Schutz über die im Ständer eingebauten Fühler gege ben ist. Rotorkritische Antriebe erfordern Sondermassnahmen

Die Schutzapparate der zweiten Gruppe können in dre Untergruppen eingeteilt werden:

a) Relais mit einer Gedächtnisfunktion auch für thermisch Vorgänge vor Eintreten einer Überlastung (eigentliche Abbild relais);

b) Relais mit einer teilweisen Gedächtnisfunktion, d. h einem Erinnerungsvermögen nur innerhalb der Überlastungs zeit (keine Berücksichtigung von Vorerwärmungen);

c) Relais ohne Gedächtnisfunktion (reine abhängige Über strom-Zeitrelais).

Für alle Schutzrelais dieser Gruppe müssen in bezug auf da Schutzobjekt gewisse Voraussetzungen vereinbart werden, d keine direkte Temperaturmessung erfolgt. Dies sind die Fest legung einer maximal zulässigen Umgebungstemperatur an Motor und die Sicherstellung unbehinderter Kühlung. Di Schutzfunktion bezieht sich auf die zulässige Erwärmung übe der vereinbarten maximalen Umgebungstemperatur.

Während die Relais der Untergruppe a), zu der das Bi metallrelais gehört, je nach der Güte der Nachbildung de thermischen Eigenschaften des Motors einen guten bis seh guten Maschinenschutz gewährleisten, haftet den Relais de Untergruppen b) und c) vor allem der Nachteil an, dass ihr

[1]) Die diesem Aufsatz zugrunde liegenden Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. *H.G. Gerlach*, ETHZ, und Dr. *M. Hentschel* vom Institut für Elektrowärme der TU Hannover (Prof. Dr.-Ing. habil. *Th. Rummel*) durchgeführt.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Auslösecharakteristiken unabhängig vom thermischen Ausgangszustand und damit von der Vorbelastung des Motors sind. Sie sprechen erst nach Überschreiten eines Schwellenwertes oberhalb des Motornennstromes an und werden nach Unterschreiten des Schwellenwertes unverzögert zurückgestellt, während die im Motor gespeicherte Wärme nur langsam abfliesst. Die Auslösecharakteristik muss sich daher auf die betriebswarme Maschine beziehen, wodurch die Überlastbarkeit des Antriebes aus kaltem oder nicht voll betriebswarmem Zustand nicht ausgenutzt werden kann. Verlangt ein Anlaufproblem die Ausnutzung dieser Belastungsreserve, so ist der Schutz z. B. beim Anlauf aus betriebswarmem Zustand nicht gewährleistet (Fig. 2).

Der Vergleich temperaturmessender und stromerfassender Schutzeinrichtungen fällt bei Betrachtung der Schutzeigenschaften unter Berücksichtigung des möglichen Ausnutzungsgrades klar zugunsten der erstgenannten Methode aus. Kostenbetrachtungen und ein Vergleich in bezug auf die Betriebszuverlässigkeit, den Installationsaufwand und die Reparaturfreundlichkeit der Systeme zeigen jedoch, dass stromerfassende Relais und unter ihnen besonders die Relais mit echtem thermischem Abbild wesentliche Vorteile haben können. Ein Vergleich zwischen dem Bimetallrelais und PTC-Schutzeinrichtungen diene der Erläuterung dazu:

Die Kosten für eine Kaltleiterschutzeinrichtung (Einbau der Temperaturfühler und Auslösegerät) liegen bei kleinen Motoren etwa doppelt so hoch wie für ein Bimetallrelais; bei höheren Motornennströmen (Wandlerrelais) ändert sich das Preisverhältnis zugunsten der Temperaturfühler. Während bei Bimetallrelais die Installationskosten praktisch vernachlässigbar sind, müssen bei Temperaturfühlern die Kosten für die Erstellung der Verbindungsleitungen zu den Fühlern im Motor berücksichtigt werden. Dazu kommt, dass Bimetallrelais gleichzeitig als Schutz für die Motorzuleitungen gelten. Beim Einsatz von Temperaturfühlern im Motor als alleinige Schutzeinrichtung ist der Querschnitt bis zum Motor gemäss der vorgeschalteten Leitungsschutzeinrichtung zu führen, oftmals ein wesentlicher Kostenfaktor. Im Regelfall wird denn auch zusätzlich ein Bimetallrelais beim Schütz eingesetzt, um eine entsprechende Querschnittsreduktion durchführen zu können. Als weiterer Nachteil von Temperaturfühlern erweist sich die beschränkte Reparierfähigkeit des Systems. Defekte Fühler können praktisch nur durch Neuwickeln des Motors ersetzt werden. Der Wärmekontakt zwischen der Wicklung und den Fühlerwiderständen muss sehr eng sein, um die Auslöseverzögerung geringzuhalten. Eine Überprüfung der Güte dieser thermischen Kopplung, die durch die thermischen Wechselbeanspruchungen stark strapaziert wird, ist im Betrieb wegen der Sprungcharakteristik der Fühler praktisch nicht möglich. In einem – vielfach schwer durchzuführenden – Kurzschluss-

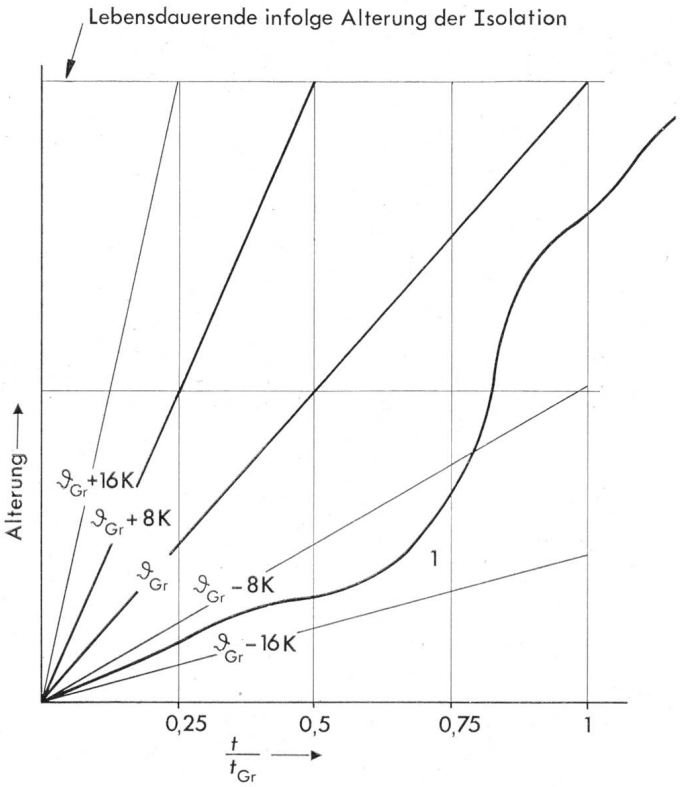


Fig. 1 Typischer Einfluss der Temperatur auf die Alterung von Isoliermaterialien

a_1 Praktischer Betrieb mit wechselnder Isolationstemperatur
t Zeit
t_{Gr} Lebensdauer der Isolation bei Grenztemperatur
ϑ_{Gr} Grenztemperatur der Isolation

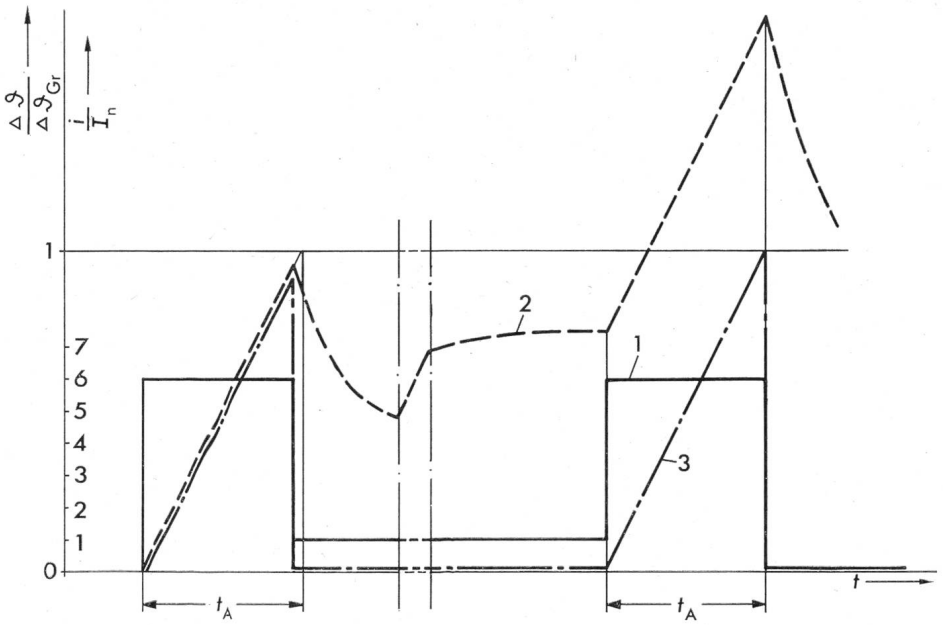


Fig. 2
Motorschutz mit einem Schutzrelais ohne Gedächtnis

1 Motorstrom
2 Wicklungserwärmung
3 vom Schutzrelais nachgebildete Erwärmung
$\Delta\vartheta/\Delta\vartheta_{Gr}$ Erwärmung bezogen auf die Grenzerwärmung gemäss Isolationsklasse
i/I_n Motorstrom bezogen auf den Nennstrom
t Zeit
t_A Auslösezeit des Schutzrelais bei $i/I_n = 6$

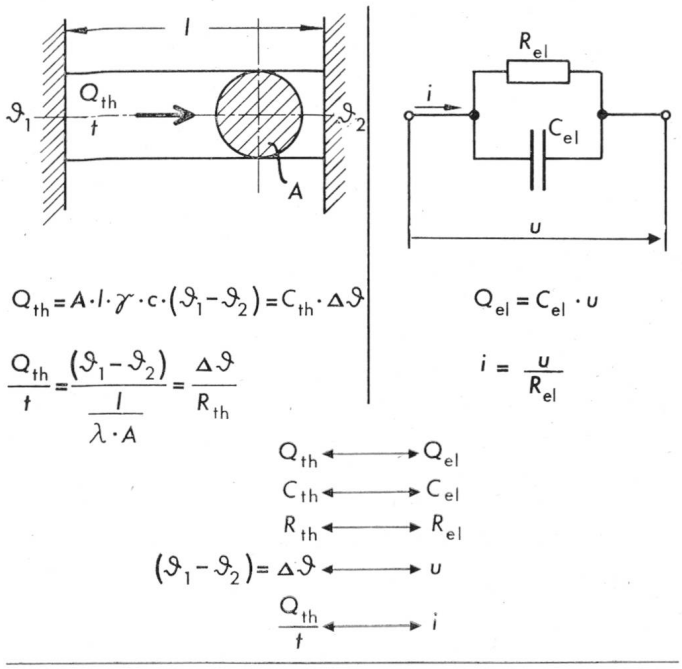


Fig. 3 Elektrische Analogiedarstellung für thermische Probleme

A	Querschnitt	$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
l	Länge	C_{th}	Wärmekapazität
γ	spezifisches Gewicht	R_{th}	Wärmewiderstand
c	spezifische Wärme	Q_{el}	elektrische Ladungsmenge
λ	spezifische Wärmeleitfähigkeit	C_{el}	Kapazität (elektrisch)
		R_{el}	Widerstand (elektrisch)
Q_{th}	Wärmemenge	u	Spannung
ϑ_1, ϑ_2	Temperatur	i	Strom

versuch würde jeweils nur der am frühesten ansprechende Fühler die Auslösung verursachen. Die Überbrückung defekter Fühler führt zur Gefährdung der Maschine bei Störungen, die nicht zu gleichmässigen Erwärmung aller Wicklungen führen, wie z. B. bei Phasenausfall.

Da infolge des sehr einfachen und im wesentlichen konstruktionsbedingten thermischen Abbildes von Bimetallrelais deren Schutzeigenschaften unvollkommen sind, ergibt sich für teure Antriebe und in schutztechnisch schwierigen Betriebsarten die Forderung nach Relais mit besser angepasstem Abbild. Deren Realisierung ist mit den Mitteln der modernen Elektronik verhältnismässig einfach. Nachfolgend sollen die Eigenschaften verschiedener Abbilder und deren Eignung zum Schutz von Motoren in den unterschiedlichen Betriebsarten untersucht werden.

3. Das thermische Verhalten von Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich speziell auf Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren, sind im wesentlichen aber für elektrische Motoren allgemein gültig. Um die Schutzeigenschaften von thermischen Abbildern beurteilen und abschätzen zu können, ist eine genaue Kenntnis des tatsächlichen thermischen Verhaltens des Schutzobjektes erforderlich, d. h. die Kenntnis des Ersatznetzwerkes für den Motor in thermischer Hinsicht einschliesslich der Verlustquellen.

Die nachfolgenden Betrachtungen bedienen sich der üblichen elektrischen Analogiedarstellung. Fig. 3 zeigt eine Gegenüberstellung der entsprechenden thermischen und elektrischen Grössen. Ein Ersatzschema für Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren, das das thermische Verhalten des Motors in allen Betriebsarten sehr gut nachbildet, wird in [6] angegeben (Fig. 4). Es handelt sich um ein Vier-Körper-Abbild mit drei Verlusteinströmungen. Da das Abbild zur Nachbildung der Erwärmung der Ständerwicklung entwickelt wurde, ist im Rotor keine Unterteilung in Käfig und Eisen vorgenommen. Es ist zu beachten, dass praktisch alle thermischen Widerstände mehr oder weniger lüftungsabhängig sind, d. h. unterschiedliche Werte für den laufenden bzw. stehenden Motor aufweisen. Im besonderen gilt dies für den Ableitwiderstand vom Ständereisen über die Kühlrippen zum Kühlmedium Luft und für den thermischen Widerstand des Luftspalts.

Für die Realisierung in einem handelsüblichen Schutzgerät ist das Abbild nach Fig. 4 sehr kompliziert. Da sich die konstruktiven Bemühungen der Motorhersteller im wesentlichen auf die Einhaltung der zulässigen Grenztemperaturen im Dauerbetrieb und bei Motoranlauf konzentrieren, sind die Werte der einzelnen Parameter des Vier-Körper-Abbildes bestenfalls für einzelne spezielle Untersuchungsobjekte bekannt. Für die Realisierung in einem Schutzapparat drängen sich daher Vereinfachungen auf, diese führen naturgemäss zu einer Einschränkung des Gültigkeitsbereiches des Abbildes. Allgemein gilt für abweichendes Verhalten von Motor und Abbild, dass der Motor gefährdet ist, sobald die simulierte Erwärmung unter der tatsächlichen liegt. Liegt sie darüber, kann die Belastbarkeit des Motors nicht voll ausgenutzt werden.

3.1 Der stationäre Betriebszustand

Die Enderwärmung der Wicklungsisolation in Abhängigkeit von der Belastung (Stromaufnahme) zeigt bis zum Bereich mässiger Überlastung angenähert die Form einer verschobenen

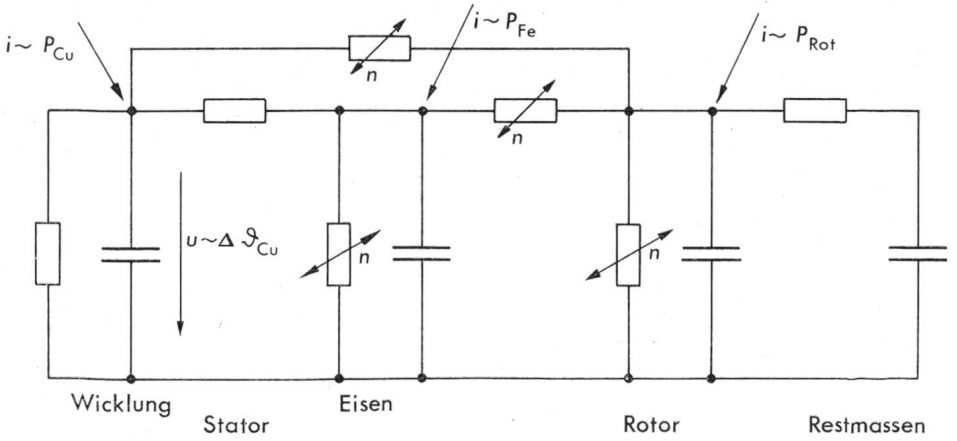


Fig. 4
Vier-Körper-Abbild für Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren [6]

i	Strom (Verlusteinströmung)
u	Spannung
P_{Cu}	Ständer-Kupferverluste
P_{Fe}	Ständer-Eisenverluste
P_{Rot}	Rotorverluste
n	Drehzahl
$\Delta\vartheta_{Cu}$	Erwärmung der Ständerwicklung

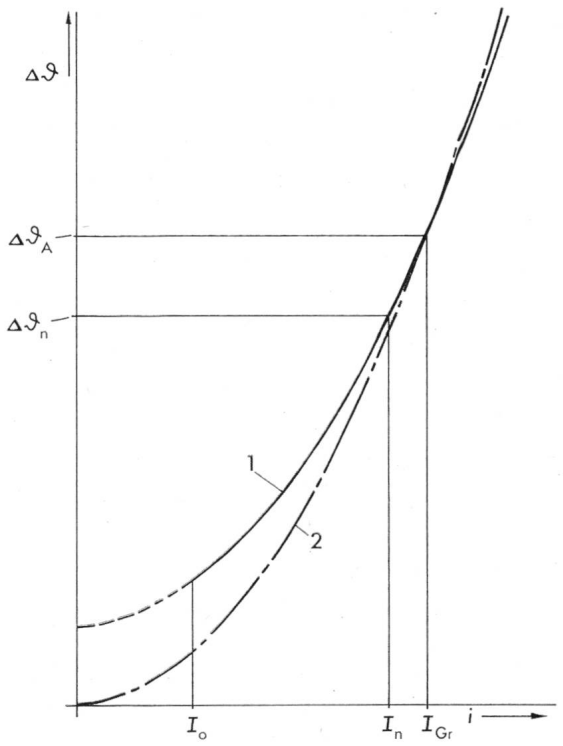


Fig. 5 Enderwärmung der Wicklungsisolation $\Delta\vartheta$ in Abhängigkeit des Motorstromes i

1 Enderwärmung der Wicklungsisolation
2 Simulierte Enderwärmung bei alleiniger Berücksichtigung der Stromwärme-Verluste
$\Delta\vartheta_n$ Wicklungserwärmung bei Nennlast
$\Delta\vartheta_A$ Wicklungserwärmung beim Grenzstrom des Schutzrelais
I_n Nennstrom
I_o Leerlaufstrom
I_{Gr} Grenzstrom des Schutzrelais

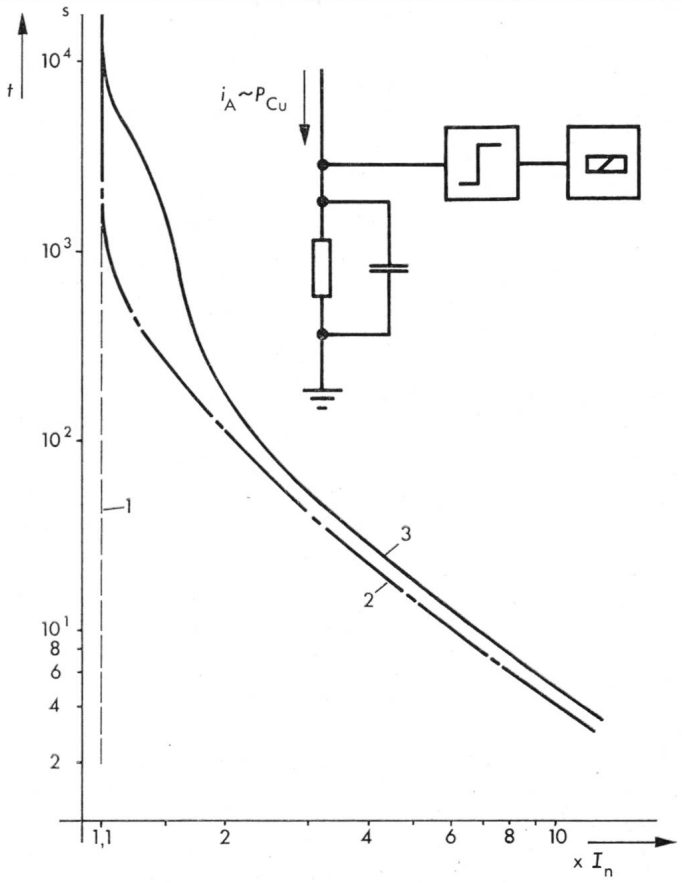


Fig. 6 Auslösekennlinien

1 Überstromauslöser
2 Relais mit Ein-Körper-Abbild (Schema)
3 Gefahrenlinie des Motors
t Zeit
I_n Nennstrom des Motors
i_A Abbildstrom
P_{Cu} Ständer-Kupferverluste

Parabel (Fig. 5). Die Nullpunktverschiebung ist auf die belastungsunabhängigen Eisen- und Reibungsverluste zurückzuführen. Der Parabelverlauf ist durch die quadratische Abhängigkeit der Stromwärmeverluste vom Motorstrom gegeben. Die Temperaturen im stationären Zustand hängen nur von den Werten der Wärmewiderstände und den Verlusteinspeisungen ab. Das Vier-Körper-Abbild (Fig. 4) ohne Kondensatoren würde die jeweilige Endtemperatur der Wicklungsisolation unverzögert anzeigen. Sind nur die Temperaturen im stationären Betriebszustand von Interesse, so kann dieses Abbild auf einen einzigen Widerstand reduziert werden, auf den die resultierenden Verluste eingespeist werden:

$$\Delta\vartheta_{Cu} = a_1 \cdot P_{Cu} + a_2 \cdot P_{Fe} + a_3 \cdot P_{Rot} \tag{1}$$

$$\Delta\vartheta_{Cu} = a_1 \left(P_{Cu} + \frac{a_2}{a_1} \cdot P_{Fe} + \frac{a_3}{a_1} \cdot P_{Rot}\right)$$

$$\Delta\vartheta_{Cu} = a_1 \cdot P_{res} \tag{2}$$

Zur Überwachung der Grenzerwärmung genügt bei eindeutiger Abhängigkeit der Verluste von der Belastung die Überwachung einer einzigen belastungsabhängigen Verlusteinspeisung. Für ein stromerfassendes Schutzrelais sind dies bevorzugt die Kupferverluste und damit der Motorstrom. Dies deckt sich mit der Typenschildangabe des Motornennstromes bei Nennbelastung. Die praktische Lösung ist ein Überstromrelais, das bei Überschreiten des Zuleitungsstromes, der der zulässigen Grenzerwärmung der Wicklungsisolation entspricht, unverzögert auslöst. Fig. 6 zeigt die Auslösekennlinie eines derartigen Überstromrelais, die jeden Betrieb des Motors mit einer Überlast, die über dem Grenzstrom liegt, verbietet, d. h. auch einen normalen Motoranlauf. Der Motor ist in allen Betriebsfällen sicher geschützt. Eine Ausnutzung der durch die Wärmespeicherfähigkeit der einzelnen Konstruktionsteile gegebenen Überlastbarkeit ist jedoch nicht möglich.

3.2 Das Ein-Körper-Abbild

Um die Wärmespeicherfähigkeit des Motors zu berücksichtigen, muss das auf einen Widerstand reduzierte Abbild gemäss Gl. (2) durch einen Kondensator erweitert werden. Das damit vorliegende Verzögerungsglied erster Ordnung steht für einen Motor, der als homogener Körper mit gleichmässiger Verlustverteilung angenommen ist. Aus Gl. (2) wird damit

$$\Delta\vartheta_{Cu} = a_1 \cdot P_{res} \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] \tag{3}$$

wobei τ die Zeitkonstante des Kreises bedeutet.

Da im realen Motor die Eisen- und Rotorverluste über Verzögerungsglieder höherer Ordnung an den Kupferpunkt

angekoppelt sind (Fig. 4), ergibt sich immer noch eine Fehlanpassung.

Werden nur die Stator-Kupferverluste berücksichtigt, so folgt

$$\Delta\vartheta_{Cu} = a_4 \cdot P_{Cu} \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (4)$$

$a_4 \cdot P_{Cu}$ ist durch den stationären Betrieb bestimmt. Die Vereinfachung führt in der Nähe des besonders interessierenden Nennbetriebspunktes nur zu einem geringen Fehler der Kennlinie der Enderwärmung (Fig. 5). Die Wahl der Zeitkonstante τ bestimmt die Güte der Anpassung im transienten Bereich.

Die Nachbildungskurven in Fig. 7 stimmen mit jener des Motors nur im Anfangspunkt und im stationären Endzustand überein. Durch Anpassung der Anfangssteilheit der Erwärmungskurve des Schutzrelais (Kurve 2) an jene des Motors (Kurve 1) wird die volle thermische Ausnutzung des Motors im Anfahrbereich ($I \gg I_n$) erreicht. Die sich ergebende Zeitkonstante ist dabei grösser als die Eigenzeitkonstante der Motorwicklung. Bimetallrelais (Kurve 3) haben in der Regel zu flinke Charakteristiken.

In Fig. 7 ist der massgebende Grenzfall des blockierten Motors nicht enthalten, da die theoretische Enderwärmung > 1000 K beträgt. Da bei blockiertem Rotor der Erwärmungsvorgang der Wicklung im interessierenden Zeitbereich adiabatisch erfolgt, ist für die Anpassung des Schutzrelais an den Motor allein das Verhältnis der Verluste zur Wärmekapazität des Abbildes entscheidend.

$$\frac{P_{Cu}}{C_{Cu}}\,(\text{Motor}) = \frac{P_{Cu}}{C_{Cu}}\,(\text{Abbild}) \quad (5)$$

Während ein Ein-Körper-Abbild der Erwärmungskurve des Motors im Kurzzeitbereich bei Anpassung der Anfangssteilheit gut folgen kann, erlaubt es im Bereich geringer Überlastungen die Ausnutzung der Belastungskapazität des Motors nicht (Fig. 6).

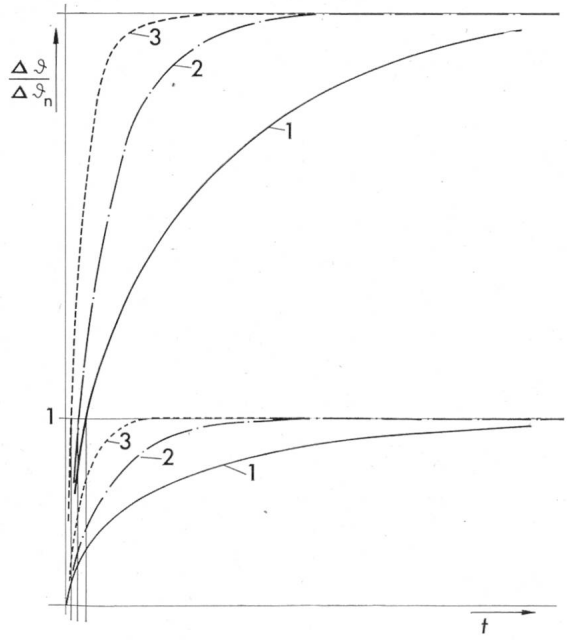


Fig. 7 Erwärmungskennlinien bei Nenn- und Überlast

1 Motorwicklung
2, 3 Schutzrelais mit Ein-Körper-Abbildern verschiedener Zeitkonstanten; $T_3 < T_2$
$\Delta\vartheta/\Delta\vartheta_n$ Erwärmung bezogen auf die Dauererwärmung bei Nennbetrieb
t Zeit

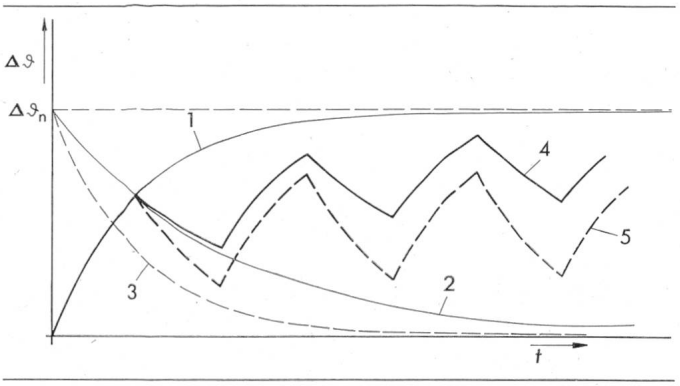


Fig. 8 Auseinanderlaufen von Motor- und Abbild-Erwärmung $\Delta\vartheta$ bei Aussetzbetrieb und nicht übereinstimmenden Abkühlcharakteristiken

1 Erwärmungscharakteristik von Motor und Abbild
2 Abkühlcharakteristik des Motors
3 Abkühlcharakteristik des Schutzrelais
4 Erwärmungsverlauf der Motorwicklungen
5 vom Schutzrelais simulierter Verlauf der Wicklungserwärmung
$\Delta\vartheta_n$ Wicklungserwärmung bei Nennbetrieb
t Zeit

3.3 Das Abkühlverhalten

Das beschriebene Ein-Körper-Abbild, dem die bekannten Bimetallrelais im wesentlichen entsprechen, vermag für Erwärmungsvorgänge ausgehend von thermisch stationären Betriebszuständen des Motors vollen Schutz zu bieten. Dies ist auch der Grund, warum sich das Bimetall-Relais als Schutzgerät für die meisten Anwendungsfälle mit einmaligen Anläufen und konstanter Belastung, sowie bei Überlastungen in grösseren zeitlichen Abständen bewährt. Im Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung und mehr noch bei Aussetzbetrieb ist eine genauere Nachbildung der Erwärmungs- und insbesondere auch der Abkühlcharakteristik wesentlich, da die Endtemperaturen der einzelnen Betriebsphasen gleichzeitig die Anfangstemperaturen für die folgenden Phasen darstellen und damit eine Aufsummierung von Fehlern eintreten kann. Besonders der Aussetzbetrieb, bei dem Abkühlphasen mit stillstehendem Rotor auftreten, verlangt nach einem genaueren Abbild, das die Drehzahlabhängigkeit der Wärmewiderstände (Fig. 4) wenigstens für die Grenzfälle von Nenndrehzahl und Stillstand berücksichtigt.

Fig. 8 zeigt das Auseinanderlaufen von Motor- und Abbild-Temperatur für den Fall eines an die Erwärmungscharakteristik des Motors angepassten Abbildes mit gleicher Erwärmungs- und Abkühlzeitkonstante. Der Motor ist als Ein-Körper-System angenommen, dessen Abkühlzeitkonstante das Zweifache der Erwärmungszeitkonstante beträgt.

Eine einfache Umschaltung des Wärmeableitwiderstandes des Ein-Körper-Abbildes zwischen Lauf und Stillstand führt zu keiner befriedigenden Lösung, da die Zeitkonstante wegen der Anpassung der Anfangssteilheit grössenordnungsmässig jener der Motorwicklung entspricht, während sich die Erwärmungs- und Abkühlkurve eines Motors nur durch die Summe zweier Exponentialfunktionen mit weit auseinanderliegenden Zeitkonstanten ausreichend genau nachbilden lassen. Die kurze Zeitkonstante ist dabei für Erwärmung und Abkühlung praktisch gleich (Wärmeweg vom Kupfer über die Nutisolation zum Ständereisen, nicht lüftungsabhängig).

Die Eignung eines thermischen Abbildes zum Schutz von Motoren im Aussetzbetrieb kann einfach anhand einer Grenz-

betrachtung überprüft werden (Fig. 9): Wird ein Motor mit sehr hoher Schalthäufigkeit betrieben, so stellt sich nach der Einlaufzeit wegen der grossen Zeitkonstanten der Maschinenmassen eine praktisch konstante und nur vom Einschaltverhältnis abhängige mittlere Wicklungstemperatur ein. Deren Höhe wird einzig durch die Verlusteinspeisungen und die Wärmewiderstände bestimmt. Die Wärmekapazitäten wirken nur als Glättungskondensatoren. Untersuchungen verschiedener Quellen [6; 7] und eigene Versuche zeigen, dass die Kurven verschiedener Maschinen nahe beieinanderliegen. Dies erklärt sich aus einer konstruktionsbedingt wenig streuenden Wirksamkeit der Lüftung.

3.4 Das Zwei-Körper-Abbild mit Berücksichtigung der Lüftung

Die Erfüllung der Forderung nach guter Übereinstimmung zwischen Abbild und Schutzobjekt in bezug auf

- die Endtemperaturen im gesamten Lastbereich
- die Anfangssteilheit der Erwärmungskurve bei blockiertem Rotor
- die Erwärmungs- und Abkühlkurven bei bzw. aus dem Nennbetrieb auch im Bereich der langen Zeitkonstanten
- die mittlere Wicklungstemperatur im Aussetzbetrieb bei hoher Schalthäufigkeit

führt zu einem Abbild gemäss Fig. 10. Ein Vergleich mit Fig. 4 zeigt, dass die Schaltungselemente für den Rotor fehlen. Dessen Rückwirkung auf die Wicklung kann durch entsprechende Wahl der verbleibenden Schaltungsparameter berücksichtigt werden. Dies gilt für den Bereich der angenäherten Proportionalität von Ständerkupfer- und Rotorverlusten, also für jenen Drehzahlbereich, in dem keine Stromverdrängung in den Rotorstäben auftritt. Da dieses Abbild das in bezug auf den Wicklungsschutz interessierende thermische Verhalten des Motors für die wichtigsten Grenzfälle mit guter Näherung nachzubilden vermag, ist die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Simulation der Maschinenerwärmung und damit eines sicheren Schutzes in gemischten Belastungsfällen gross. Dies bestätigen vergleichende Berechnungen und Messungen (Fig. 11).

Für Übereinstimmung auch für Betriebsarten mit überproportionalen Rotorverlusten ist das Vier-Körper-Abbild zu wählen. Dasselbe gilt für Betriebsarten mit variabler Drehzahl.

Für den Schutz von Motoren der Zündschutzart «e» (erhöhte Sicherheit) [8] bringt ein Zwei-Körper-Abbild mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Kühlverhältnisse bei Lauf und Stillstand und gut angepasster Erwärmungs- und Abkühlcharakteristik neue Aspekte. Die für diese Motoren definierte Erwärmungszeit t_E gilt für den Fall, dass eine Blockierung des Motors im betriebswarmen Zustand auftritt. Wegen der sehr kurzen Abkühlzeitkonstanten der üblicherweise verwendeten Bimetallrelais muss das Schutzgerät aus dem kalten Zustand innerhalb der t_E-Zeit abschalten. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit zu starker Überdimensionierung des Rotors und bei Anlaufzeiten, die länger als ungefähr die 1,7fache t_E-Zeit sind, zur Ergreifung von Sondermassnahmen zur Überwachung des Anlaufes. Bei richtiger Nachbildung der Abkühlcharakteristik könnte sich die t_E-Zeit auf die Auslösezeit des Schutzrelais aus dem warmen Zustand beziehen, wodurch sich von selbst eine längere zulässige Überlastungszeit aus dem kalten Zustand ergäbe.

Das beschriebene Zwei-Körper-Abbild hat den Vorteil, aus einfachen Erwärmungs- und Abkühlkurven bestimmbare Parameter und nur eine belastungsabhängige Einspeisung zu enthalten; die Eisenverluste können mit guter Näherung als konstant angenommen werden. Die Einspeisung der Kupferverluste kann einfach vom Motorstrom abgeleitet werden.

Fig. 12 zeigt die Ausführung eines Motorschutzrelais mit dem beschriebenen Abbild. Eine Anpassung der Auslösecharakteristik an das jeweilige Schutzobjekt ist durch Einstellung der Auslösezeit beim 6fachen des Motornennstromes (entsprechend der spezifischen Belastung der Wicklung) gegeben. Die Auslösekennlinie in Fig. 13 zeigt den Einstellbereich und auch den typischen Verlauf im Bereich kleiner Überlastungen, der sich bei der Realisierung von Mehr-Körper-Abbildern mit weit auseinanderliegenden Zeitkonstanten ergibt. Es ist zu beachten, dass für komplexe Abbilder die Auslösekennlinie allein keine ausreichende Information über die Schutzeigenschaften des Apparates geben kann, da aus ihr z. B. das Verhalten bei Abkühlvorgängen nicht hervorgeht. Dazu ist eine genaue Kenntnis des verwendeten Abbildes einschliesslich der Verlusteinspeisungen erforderlich. Das Relais

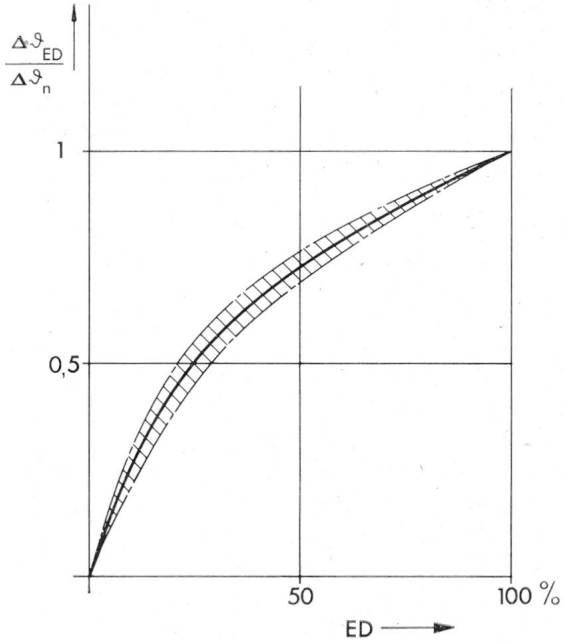


Fig. 9 Relative mittlere Wicklungserwärmung $\Delta\vartheta_{ED}/\Delta\vartheta_n$ bei Aussetzbetrieb mit hoher Schalthäufigkeit in Abhängigkeit von der relativen Einschaltdauer ED
(schraffierter Bereich = Streubereich verschiedener Motoren)

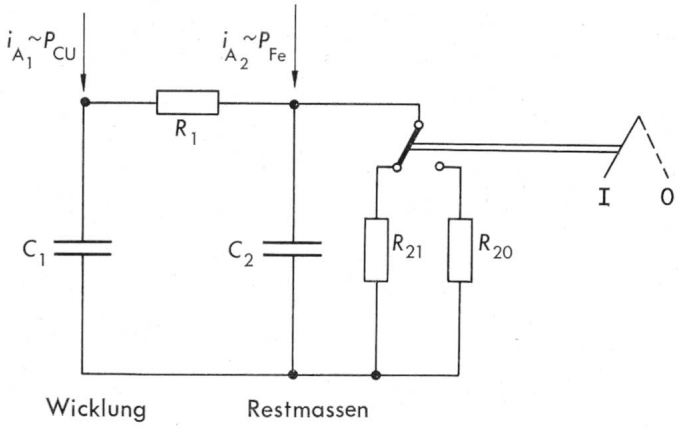


Fig. 10 Zwei-Körper-Abbild mit Berücksichtigung der Lüftungsverhältnisse von eigenbelüfteten Motoren
i_{A1}, i_{A2} Verlusteinströmungen
P_{Cu} Ständer-Kupferverluste
P_{Fe} Ständer-Eisenverluste

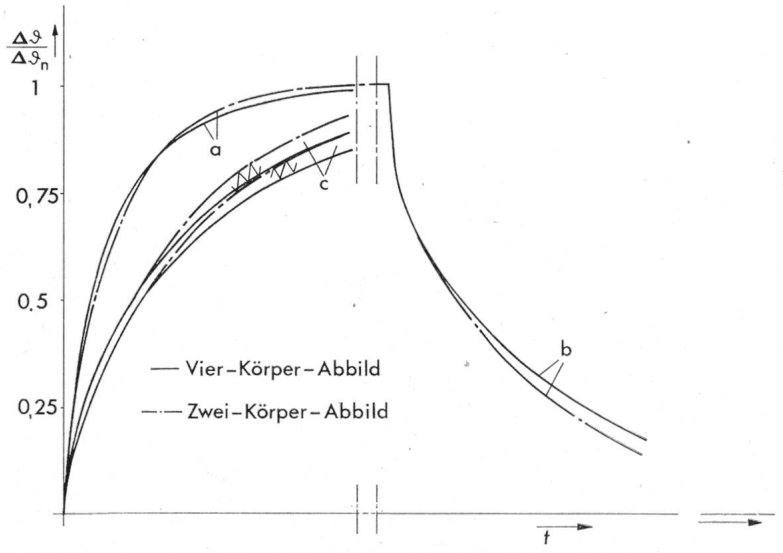


Fig. 11 Vergleich des Vier-Körper-Abbildes nach [6] mit einem angepassten Zwei-Körper-Abbild gemäss Fig. 10

a) Erwärmungskurven bei Nennbelastung

b) Abkühlkurven aus dem stationären Erwärmungszustand im Nennbetrieb

c) Erwärmungskurven bei Aussetzbetrieb mit hoher Schalthäufigkeit (die Belastung wurde bei einer relativen Einschaltdauer von ca. 12% so gewählt, dass die stationäre Enderwärmung gerade jener bei Nennbetrieb entspricht).

$\Delta\vartheta/\Delta\vartheta_n$ Erwärmung bezogen auf die Dauererwärmung bei Nennbelastung

t Zeit

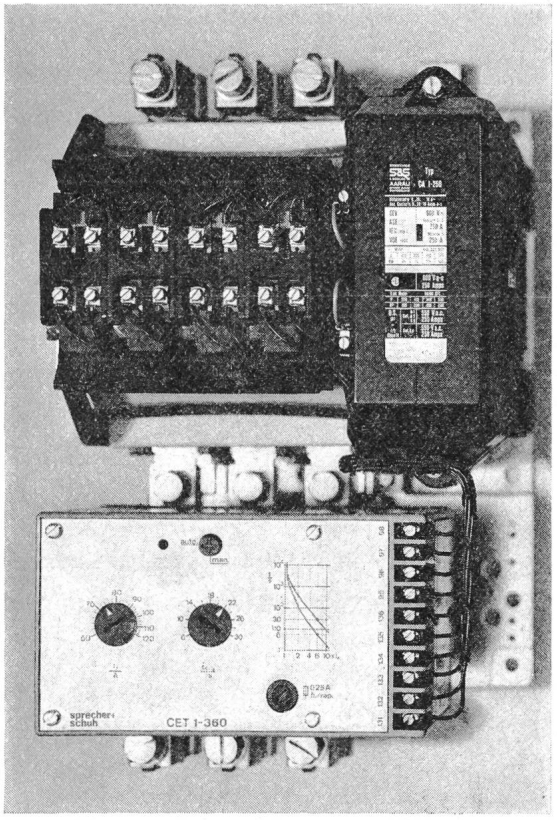


Fig. 12 Elektronisches Motorschutzrelais mit Zwei-Körper-Abbild gemäss Fig. 10, mit einstellbarer Auslösecharakteristik

in Fig. 12 enthält zusätzlich einen praktisch unverzögert und von der Höhe des Motorstromes unabhängig wirkenden Phasenausfallschutz sowie einen Analogausgang für die simulierte Erwärmung. Ein solcher Analogausgang ist bei elektronischen Relais mit geringem Aufwand realisierbar. Er gibt einen Strom proportional der im Abbild aufgebauten und der mittleren Wicklungserwärmung proportionalen Spannung ab. Dieser kann der Anzeige, Vorwarnung oder Belastungsregelung dienen.

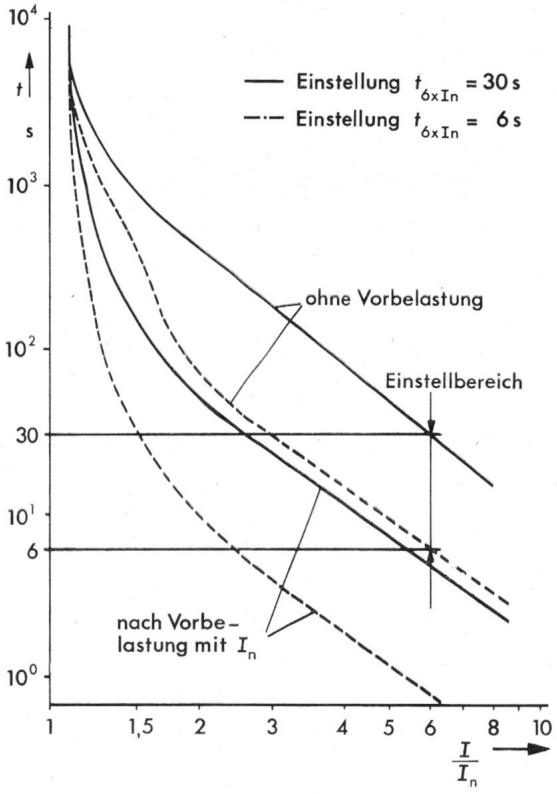


Fig. 13 Auslösekennlinien des Motorschutzrelais in Fig. 12

Literatur

[1] Recommandations relatives à la classification des matières destinées à l'isolement des machines et appareils électriques en fonction de leur stabilité thermique en service. Publication de la CEI No. 85, 1957.

[2] Bestimmungen für umlaufende elektrische Maschinen. VDE-Vorschrift 0530.

[3] *W. Büssing:* Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen. Arch. Elektrotechn. 36(1942)6, S. 333...361 + Nr. 12, S. 735...742.

[4] *V. M. Montsinger:* Loading transformers by temperature. Quarterly Transactions AIEE 49(1930)2, p. 776...792.

[5] *R. Hemmann:* Lebensdauer elektrischer Maschinen bei Überlasttemperaturen. VDI-Z 115(1973)5, S. 342...346.

[6] *H. G. Gerlach:* Transiente thermische Vorgänge in normalen Käfigankermotoren und deren analoge Darstellung. Zürich, Verlag der Fachvereine an der ETH, 1974.

[7] *G. B. Rail* and *P. G. Kendall:* Simple calculation of ratings of t.e.f.c. motors on S3 and S6 duty-cycle operation. ERA-Report 5277. Leatherhead (England), The Electrical Research Association, 1969.

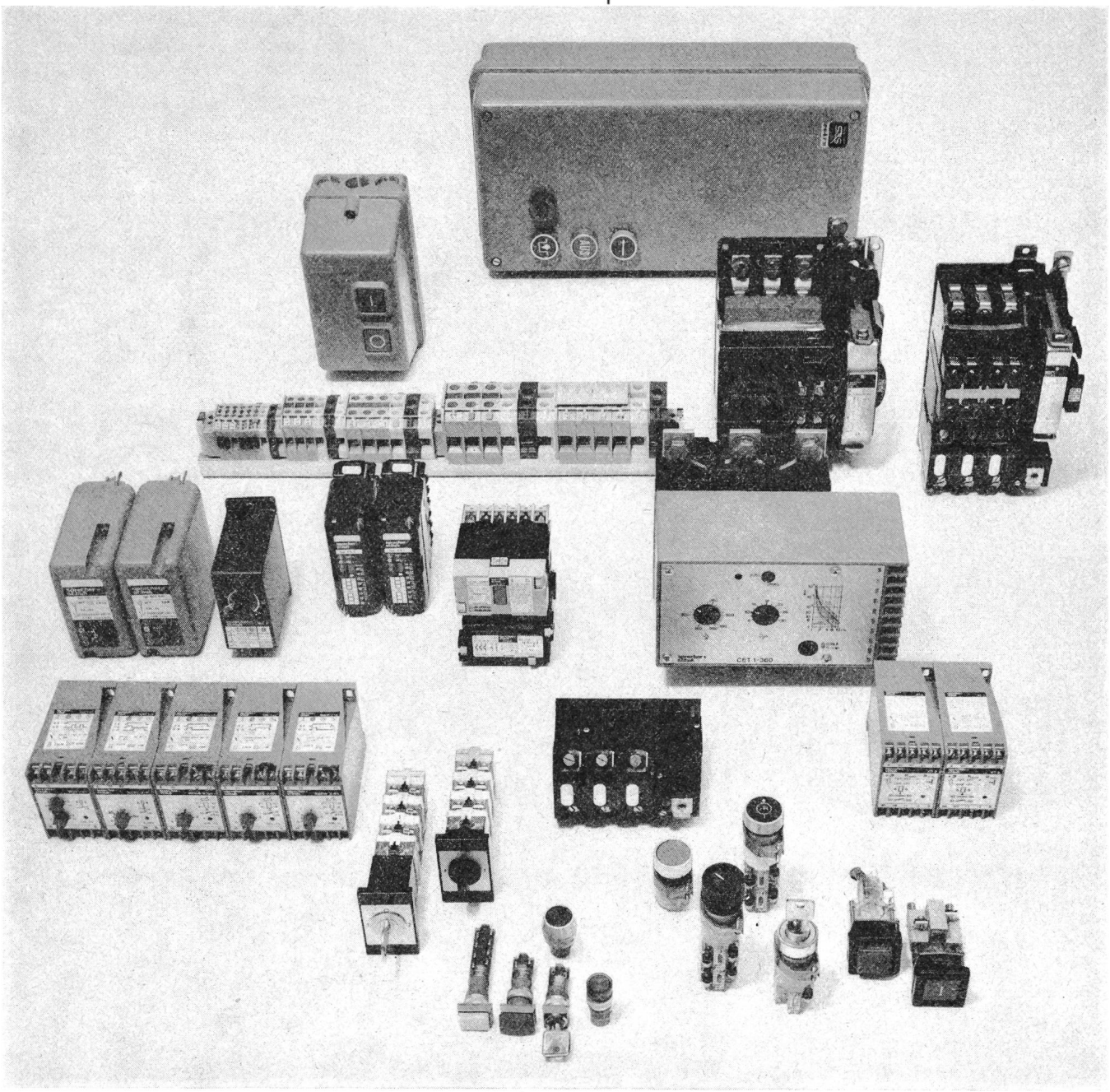
[8] Elektrische Betriebsmittel für explosible Atmosphäre – Betriebsmittel für Zündschutzart «e»: Erhöhte Sicherheit. VDE-Vorschrift 0170/0171 Teil 4/...75 und EN 50 019 (Entwurf).

[9] *G. Kirschner:* Motorschutz. Brown Boveri Mitt. 53(1966)11/12, S. 811...819.

Adresse des Autors

Dipl. Ing. *H. Unterweger,* Sprecher & Schuh AG, 5001 Aarau.

Schalten und **Schützen**
mit Sprecher + Schuh



Sprecher + Schuh Schalt- und Motorschutzgeräte sind qualitativ hochstehende Grosserienprodukte, für harten Industrieeinsatz in den Weltmärkten entwickelt.

— Langlebig, betriebssicher und servicefreundlich.

— Kompakte Bauweise, schnelle Montage und gute Zugänglichkeit zu den Anschlüssen.

— Konsequente Bausteintechnik und viel Zubehör ermöglichen zahllose Kombinationen.

Einheitliche Blockschützreihe bis 1000 A.
Breites Motorschutzkonzept auch für schwierigste Betriebsbedingungen.
Steckbares Steuerschützsystem.
Elektronische, mechanische Zeitrelais mit zahlreichen Schaltfunktionen.
Befehlsgeräte für 16,2 und 22,5 mm Bohrung.
Nockenschalter. Reihenklemmen.
Apparatekasten.

sprecher + schuh

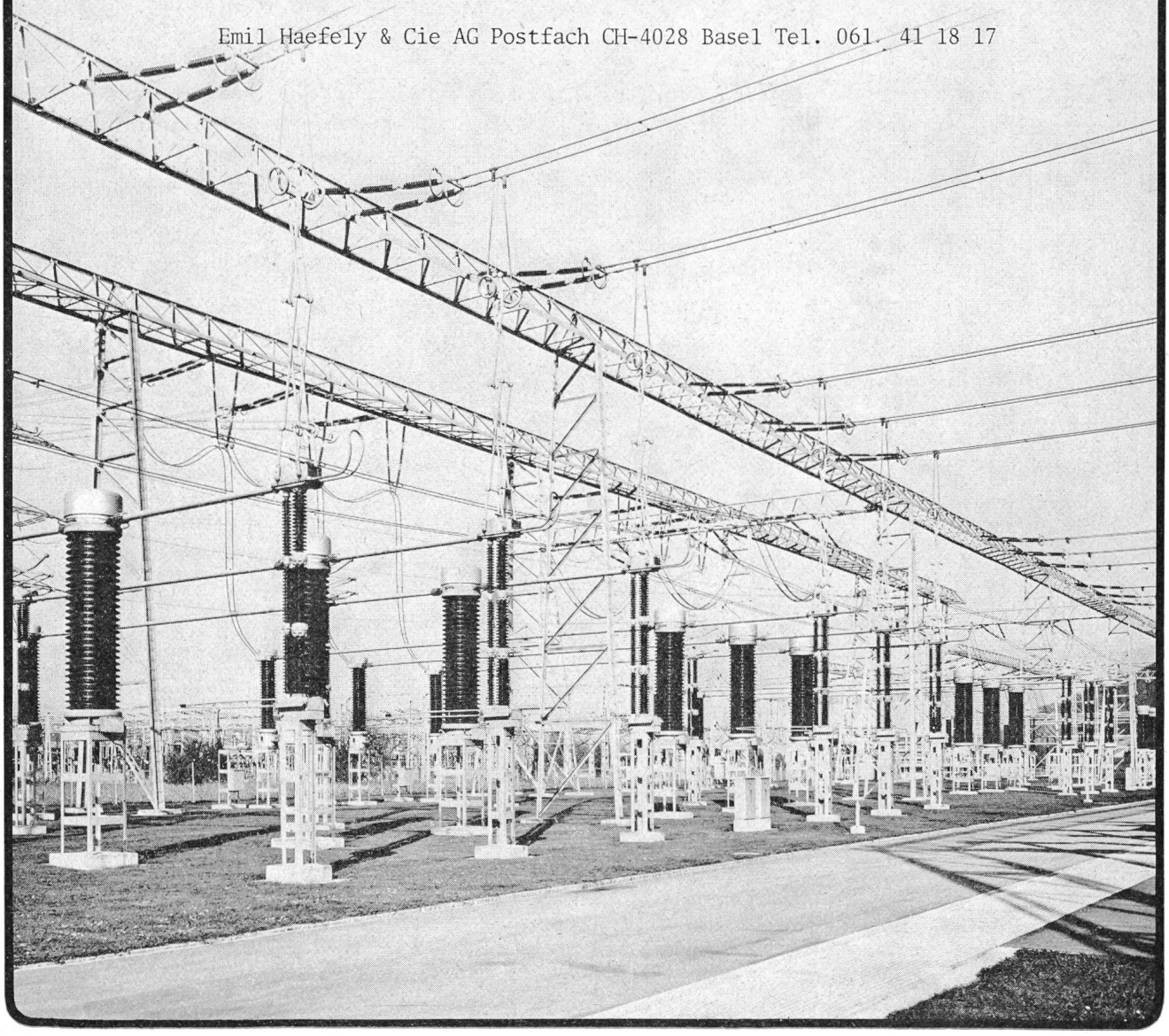
Sprecher + Schuh Verkauf AG
CH-5001 Aarau / Schweiz
Telefon 064 / 25 21 21

Für Service und Beratung stehen Ihnen die Grossisten und unsere 14 Verkaufsstellen zur Verfügung: Basel 061 39 53 31, Bern 031 24 11 11, Biel 032 23 41 21, Renens 021 34 02 44, Ebikon bei Luzern 041 36 80 38, Lugano 091 3 97 08, Olten 062 22 36 56, Rohr bei Aarau 064 24 19 19, Sargans 085 2 25 22, St. Gallen 071 24 00 80, Winterthur 052 29 20 21, Zürich 01 62 54 62, Genève 022 21 13 12, Sion 027 22 16 92

761N

Haefely erhielt u.a. die Aufträge für:
magnetische Spannungswandler 400 kV Kernkraftwerk Leibstadt
und magnetische Spannungswandler für die 400 kV / 220 kV Anlage
KKG Kernkraftwerk Gösgen
alle HF-Kopplungselemente -HF Sperren und HF Kooplungskondensatoren-
und alle magnetischen Spannungswandler für die Kraftwerke
Sarganserland AG Zentrale Mapragg
und für das Etzelwerk alle 132 kV, 16 2/3 Hz Messgruppen
ebenso für Kerzers
alle 132 kV, 16 2/3 Hz Messgruppen.
....weil Haefely-Qualität wirtschaftlicher ist.

HAEFELY

Ihr Partner in der Technik hoher und höchster Spannungen

Emil Haefely & Cie AG Postfach CH-4028 Basel Tel. 061 41 18 17