

Motorschutz

Motorschutz

Überströme – Übertemperaturen

Von

Herbert Franken

Direktor der Firma Klöckner-Moeller GmbH
Bonn a. Rh.

Mit 138 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin/Göttingen/Heidelberg
1962

ISBN-13: 978-3-642-94847-3 e-ISBN-13: 978-3-642-94846-6
DOI: 10.1007/978-3-642-94846-6

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen
© by Springer-Verlag, OHG., Berlin / Göttingen / Heidelberg 1962
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1962
Library of Congress Catalog Card Number 61 – 18 362

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche
berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne
der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von
jedermann benutzt werden dürften

Vorwort

Die Einrichtungen zum thermischen Schutz der Elektromotoren haben unter dem Begriff des „Motorschutzes“ seit fast 40 Jahren Eingang in die Schaltgerätetechnik gefunden. Der Motorschutz stellt nicht nur ein technisches, sondern auch ein wirtschaftliches Problem dar. Er erlaubt, von einer Überbemessung der Motoren abzusehen und den Ausfall durch Überlastung auszuschließen. Die Motorschutzeinrichtungen tragen ihr Teil dazu bei, die Einsatzbereitschaft der Fertigungsmittel zu sichern. Sie spielen deshalb im Rahmen der Fertigung von Schaltgeräten eine ganz bedeutende Rolle. Die durch Einführung des elektrischen Einzelantriebes außerordentlich gesteigerte Zahl der Elektromotoren hat auch zu großen Produktionsziffern auf dem Gebiete dieser Schutzgeräte geführt. Die Geräte sind heute preiswert und bei richtiger Anwendung zuverlässig. Dem einfachen Aufbau stehen zum Teil schwierigere Fragen hinsichtlich der Auswirkungen entgegen, deren Beantwortung oft weniger einfach ist. In den nachfolgenden Ausführungen sind die Begriffe und Elemente, die allgemein zur Schaltgerätetechnik gehören, wie Kontaktfragen, Schaltleistungsfragen und dergleichen nicht behandelt¹, sondern nur die Dinge, die dem Motorschutzgerät eigentümlich sind. Das ist in erster Linie die Frage des zweckmäßigen Aufbaues der thermischen Auslöser und Relais. Der Gegenstand erforderte eine etwas breite Behandlung der Erwärmungsvorgänge, sowohl derer, die sich in den Stromverbrauchern als derer, die sich in den Schutzeinrichtungen abspielen. Wesentlich war dabei auch, die Zusammenhänge zwischen den Motorschutzeinrichtungen und den Netzvorgängen sowie den Erfordernissen des Antriebes zu schildern. Insbesondere erschien es notwendig, den Verhältnissen beim Drehstrommotor im gestörten Netz bei unsymmetrischer Belastung eine eingehendere Betrachtung zu widmen. Neben der seit Jahrzehnten durchgeführten Überwachung der Ströme in den Motorzuleitungen wird die in bestimmten Fällen jetzt weitgehend meist zusätzlich angewandte Überwachung der Wicklungstemperaturen behandelt. Die Fragen um den Motorschutz enthalten zahlreiche, oft schwierige Probleme, die wesentlich aus der Tatsache erwachsen, daß die Geräte Handelsware darstellen müssen und schlecht dem unterschiedlichen thermischen Verhalten der einzelnen Motoren angepaßt werden können.

¹ Hierzu sei auf das Buch des Verfassers, Schütze und Schützensteuerungen, Berlin: Springer 1959 verwiesen.

Die formelmäßigen Angaben über die Zusammenhänge wurden auf das Notwendige beschränkt, aber andererseits so weit aufgeführt, daß auch der weitgehender interessierte Fachmann sich orientieren kann. Ihre Kenntnis hat nicht nur Bedeutung für den Aufbau der Schutzelemente, sondern auch für ihre Verwendung. Der Verfasser hat im Verlauf der letzten Jahrzehnte wohl alle beim Motorschutz aufgetauchten Fragen in zahlreichen Einzelveröffentlichungen behandelt, so daß eine zusammenfassende Darstellung nahe lag. Auch sind die Motorschutzelemente ein sehr häufiges Zusatzglied zu den Schützen. In dem genannten Werk des Verfassers (1) konnten sie aber nur in kurzen Andeutungen behandelt werden. Die Arbeit behandelt neben dem thermischen Schutz durch Stromüberwachungselemente und deren Einwirkung auf Schaltgeräte in Form des „Motorschuttschalters“ auch den Schutz durch „Temperaturüberwachungselemente“ in der Wicklung. Sie hat vornehmlich den Zweck, insbesondere den projektierenden und den Betriebsingenieur in die Probleme des Motorschutzes einzuführen und dabei die Grenzen des Einsatzes marktgängiger Erzeugnisse aufzuzeigen, sowie dem Studierenden und dem Entwicklungsingenieur Hinweise zu geben. Der Verfasser ist für Kritik und Anregungen dankbar.

Bonn, im April 1962

H. Franken

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Formelzeichen	VII
1. Aufgabenstellung	1
1.1 Entwicklungsgründe	1
1.2 Welche Gefahren drohen dem Motor?	3
1.2.1 Die Verhältnisse des Aufstellungsraumes — Zustand und Wartung des Motors	4
1.2.2 Überlastungen und Fehlschaltungen als Störungsursache	4
1.2.3 Die Gefahren durch Störungen im Drehstromnetz	6
1.3 Der Stand der Schutztechnik vor Einführung der Motorschutzgeräte ..	19
1.4 Grundsätzliche Lösungen — Schutzmethoden	25
2. Schutz durch Überwachung der Zuleitungsströme-thermische Auslöseelemente außerhalb des Motors	26
2.1 Begriffsbestimmungen und VDE-Anforderungen	27
2.2 Aufbauprinzipien	31
2.2.1 Arten der Stromeinwirkung auf die Auslöseelemente	32
2.2.2 Zwei verschiedene Grundprinzipien	37
2.2.3 Geräte beruhend auf Wärmedehnung	38
2.2.3.1 Dehnungsstreifen	38
2.2.3.2 Bimetallauslöser und -relais	43
2.2.4 Auslöser beruhend auf der Änderung des Aggregatzustandes. ...	75
2.2.4.1 Übergang vom festen zum flüssigen Zustand — Schmelzlot- element	75
2.2.4.2 Übergang vom flüssigen zum dampfförmigen Zusand — Dampfdruckkapseln	77
2.2.5 Das Zusammenwirken der Auslöser und Relais mit den Schalt- geräten	78
2.2.6 Polzahl der Auslöser und Relais	83
2.2.7 Anpassung an die Motorstromstärke (Einstellung)	83
2.3 Auslösecharakteristiken	90
2.3.1 Die Erwärmungsverhältnisse	90
2.3.2 Die Zeitkonstante	95
2.3.3 Die Zeitkonstante und die Auslösekennlinie	99
2.3.4 Die Darstellung der Auslösekennlinie	100
2.3.5 Auslösezeiten bei Überlastung im betriebswarmen Zustande ...	101
2.3.6 Temperaturverteilung bei mittelbar beheizten und beschwerten Auslösern	105
2.3.7 Nachauslösung	114
2.3.8 Auslösekennlinien bei Wandlerrelais	116
2.3.9 Die Auslösekennlinie in formelmäßiger Darstellung	118
2.3.10 Grenzerwärmung und Grenzweg	129
2.3.11 Einfluß der Raumtemperatur	131
2.3.12 Kompensation des Raumtemperatureinflusses	133
2.4 Zusätze bei Motorschutzgeräten	140
2.4.1 Vorgeschaltete Kurzschlußsicherungen	140
2.4.2 Verbindung der thermischen Elemente mit Überstromschnell- auslösern	141
2.4.3 Thermische Sonderschutzeinrichtungen bei Einphasenlauf	142
2.4.4 Motorschutz in explosions- und schlagwettergefährdeten Räumen	144

	Seite
2.5 Verhalten der Schutzelemente	146
2.5.1 Freiauslösung — „Pumpen“ der Motorschutzgeräte	146
2.5.2 Die Genauigkeit der Motorschutzauslöser	148
2.5.3 Der Temperaturanstieg und -abfall in elektrischen Maschinen, deren Zeitkonstanten und die Beziehungen zum Schutzauslöser	156
2.5.4 Schutzwirkung bei niedriger Auslöser-Zeitkonstante	165
2.5.5 Bei welcher Auslösekennlinie ist der Anlauf noch möglich?	167
2.5.6 Motorschutz bei aussetzendem Betrieb	169
2.5.7 Die „Höhereinstellung“ der Motorschutzgeräte	187
2.5.8 Motorschutz und Leitungsschutz	191
2.5.9 Die Wartepause	193
2.5.10 Die Kurzschlußfestigkeit von thermischen Auslösern und Relais	196
2.5.11 Das Zusammenwirken von thermischen Elementen, Sicherungen und Schnellauslösern	207
2.5.11.1 Thermische Elemente und Schnellauslöser	208
2.5.11.2 Thermische Elemente und vorgeschaltete Abschmelzsicherungen	211
2.6 Anwendung in Sonderfällen	218
2.6.1 Motorschutz bei schwer anlaufenden Maschinen	218
2.6.2 Motorschutzgeräte als Maschinen- und Werkzeugschutz sowie für andere Stromverbraucher als Motoren	220
2.6.3 Schutz gegen Bedienungsfehler bei Motoranlaßgeräten	221
2.6.4 Der Schutz von Motoren mit Stern dreieckschaltern, Polumschaltern und dergl.	222
2.6.5 Motorschutz bei Blindstrom-Einzelkompensation	224
2.6.6 Motorschutz bei Einphasen-Wechselstrommotoren	224
2.7 Zu den Motorschutzauslösern und -relais gehörende Hauptstrom- Schaltgeräte	226
2.7.1 Das Schaltvermögen (Motorschalter — Leistungsschalter)	227
2.7.2 Schloßschalter (Selbstschalter)	229
2.7.3 Schütze in Verbindung mit Motorschutzrelais	234
2.7.4 Spannungsrückgangsauslösung	238
2.7.5 Geräte für Mehrmotorenmaschinen und aussetzenden Betrieb ...	239
2.7.6 Geräte mit selbsttätiger Rückschaltung nach Überstromauslösung wegen Einphasenlauf	242
2.7.7 Motorschutzgeräte als Abzweigschalter an Verteilern	244
2.7.8 Die Lebensdauer der Geräte	245
2.8 Eichung und Prüfung von Motorschutz-Auslösern und Relais	245
3. Schutz durch Temperaturüberwachungs-Elemente im Motor ..	262
4. Schutz durch Überwachung sowohl des Stromes in der Zuleitung wie der Temperatur im Motor	269
5. Schutz durch Ermittlung von Strom- und Spannungsunterschieden in den Zuleitungen	273
6. Weitere Schutzmittel (Lastüberwachung, Phasenumkehrrelais)	279
7. Geschichtliches	280
8. Anhang (e^x , e^{-x} , $x^{1,6}$, $x^{-1,6} = f(x)$)	288
9. Schrifttum	289
Sachverzeichnis	296

Benutzte Formelzeichen

soweit die Bedeutung nicht auf einen engbegrenzten Absatz beschränkt ist.

a	= Verhältnis des obersten zum untersten Einstellwert der Skala für die Wegverstellung	
b	= Breite	meist mm
c	= spezifische Wärme	Ws · cm ⁻³ · °C ⁻¹
c_b	= spezifische Wärme des eigentlichen Wärmeelementes, z. B. des Bimetallstreifens	Ws · cm ⁻³ · °C ⁻¹
c_w	= spezifische Wärme der Heizwicklung	Ws · cm ⁻³ · °C ⁻¹
d	= Dicke, Durchmesser	meist mm
e	= Verhältnis der Elastizitätsmoduln der beiden Komponenten von Bimetall $E_1 : E_2$	
$f_{1,3}$	= ein Maß für die Grenzstromfehler (S. 153), und zwar das Verhältnis des einpoligen zum dreipoligen Grenzstrom	
$f_{2,3}$	= desgleichen das Verhältnis des zweipoligen zum dreipoligen	
f_d	= desgleichen bedingt lediglich durch die Unterschiede in der mechanischen Verformung	
f_g	= ist der Gesamtfehler bedingt durch f_d und f_t	
$f_{m o}$	= Gesamtfehler bei gleichzeitiger Steigerung von m und o . Der Fehler beim gleichen Auslöser und $m = 1$ sowie $o = 1$ ist mit f_1 bezeichnet	
f_t	= der Grenzstromfehler lediglich bedingt durch die Temperaturunterschiede bei ein- und dreipoliger Belastung	
g	= Grenzstrom zu Einstellstrom I_g/I_e	
h	= Höhe	meist mm
k	= spezifische Ausbiegung eines Bimetallstreifens = $0,75 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot f(E)$	°C ⁻¹
k'	= desgleichen für einen Streifen von 100 mm Länge und 1 mm Dicke ($k' = k \cdot 10^4$)	mm °C ⁻¹
l	= Länge	meist mm
m	= Erhöhung der Einstellstromstärke durch Feinverstellung (Wegänderung) als Vielfachwert (beliebiger Skalenwert zu niedrigstem Wert); $m > 1$	
o	= Steigerung der Einstellstromstärke durch Nebenschlüsse als Vielfachwert (Einstellstrom mit Nebenschluß: ohne Nebenschluß)	
q	= Querschnittsfläche	meist mm ²
r	= Radius	meist mm
s	= Weglänge	meist mm
s_d	= siehe s_m	
s_m	= die durch die Einwirkung der Schaltkraft bedingte Rückbiegung der Bimetallstreifen — allgemein bei dreipoligem Eingriff s_d	mm
s_m'	= die Rückbiegung eines Streifens von 100 mm Länge, 10 mm Breite und 1 mm Dicke bei einer Schaltkraft von 100 g	mm
s_n	= Nettoauslöseweg der Bimetallstreifen = $s_w - s_m$	mm

s_t	= Zusatzweg zu s_{w0} bedingt durch die Erwärmung der umgebenden Luft bei dreipoliger Belastung (s. s_{w3})	mm
s_w	= der durch die Erwärmung bedingte Bruttoweg des Auslöseelementes	mm
s_{w0}	= Bruttoauslöseweg nur bedingt durch die Übertemperatur des Auslöseelementes gegenüber seiner Umgebung	mm
s_{w1}	= der durch die Erwärmung bedingte gesamte Bruttoauslöseweg des Auslöseelementes bei einpoliger Belastung	mm
s_{w3}	= desgleichen bei dreipoliger Belastung $s_{w3} = s_{w0} + s_t$	mm
t	= Zeit	s
t_a	= Auslösezeit (soweit besonders betont)	s
t_b	= Belastungszeit	s
t_e	= Eigenzeit	s
t_k	= Summe der Eigenzeiten von Schnellauslöser und Hauptschaltgerät (Kurzschlußausschaltverzug)	s
t_r	= Ruhezeit (Pause) im periodischen aussetzenden Betrieb	s
t_s	= Spieldauer im aussetzenden Betrieb	s
t_w	= Wartezeit	s
t_x	= Nacheilung der Erwärmung des eigentlichen Wärmeelementes bei mittelbar beheizten Auslösern	s
t_y	= Voreilung der Erwärmung der Heizwicklung bei mittelbar beheizten Auslösern	s
t_z	= Zeitkonstante der Übergangsexponentialfunktion für t_x und t_y von $t = 0$ an	s
u	= Anteil der Wärmeentwicklung des eigentlichen Wärmeelementes an der gesamten eines mittelbar beheizten Auslösers	
\ddot{u}	= Überlaststrom zu Einstellstrom	$I_{\ddot{u}}/I_e$
\ddot{u}'	= Überlaststrom zu Grenzstrom	$I_{\ddot{u}'}/I_g$
\ddot{u}'_k	= zulässiger Kurzschlußstrom zu Grenzstrom	$I_{k'}/I_g$
\ddot{u}_A	= Überlastungsfähigkeit bedingt durch den Schutzauslöser im aussetzenden Betrieb	$I_{\ddot{u}_A}/I_d$
\ddot{u}_M	= zulässige Motorüberlastung	$I_{\ddot{u}_M}/I_d$
v	= Vorbelastungsstrom zu Einstellstrom	I_v/I_e
w	= Anteil der Wärmekapazität des eigentlichen Wärmeelementes an der gesamten eines mittelbar beheizten Auslösers, z. B. des Bimetallstreifens, der eine Zusatzheizwicklung trägt	
w_{bb}	= Warteverhältnis für die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft (s. S. 195)	
x	= Kühlungsanteil der umlaufenden Motorteile	
y	= Verhältnis der Zeitkonstanten T_R und T_L mit Bezug auf die Überlastungsfähigkeit im aussetzenden Betrieb	
z	= Verminderung der Einstellstromstärke durch Wegverstellung (beliebiger Skalenwert zu Skalenhöchstwert); $z < 1$	
A	= Festwert als Anteil an $\ddot{u}'^2 \cdot t$ bei der Gleichung der Auslösekenlinie	
B	= Multiplikator der Zeit als Anteil an $\ddot{u}'^2 \cdot t$ zur Berücksichtigung der Wärmeableitung bei der Gleichung der Auslösekenlinie	
C	= Multiplikator von $1/t$ zur Berücksichtigung der Wärmestauung als Anteil an $\ddot{u}'^2 \cdot t$ bei der Gleichung der Auslösekenlinie	
D	= Auslöserübertemperatur bei Skalenhöchstmarke	°C

E	= Elastizitätsmodul	i. allg. $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$
ED	= Prozentuale Einschaltdauer	%
G	= Faktor bei Höhereinstellung; G' desgleichen (s. S. 188, 191)	
I	= elektrische Stromstärke	A
I_b	= Belastungsstrom	A
I_d	= Dauerstrom	A
I_e	= Einstellstrom	A
I_e'	= desgleichen bei Höhereinstellung	A
I_g	= Grenzstrom (niedrigster Auslösestrom) bei thermischen Relais und Auslösern	A
I_k	= Kurzschlußstrom	A
I_m	= Motorstrom	A
I_n	= Nennstrom	A
I_{nm}	= Motornennstrom	A
$I_{\bar{u}}$	= Überlaststrom	A
I_v	= Vorbelastungsstrom	A
I_{ED}	= Strom bei der prozentualen Einschaltdauer (ED)	A
J	= Trägheitsmoment	meist mm^4
K	= spezifischer Wert für die Bewegung von Bimetallstücken unter Wärmeeinwirkung $1,5 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta \vartheta / d \cdot f(E) = 2 \cdot k \cdot \Delta \vartheta / d$	mm^{-1}
M	= Masse	meist $\text{kg m}^{-1} \text{s}^2$
M_d	= Drehmoment	
M_n	= Nenndrehmoment	
N	= Leistung	W
O	= Oberfläche	cm^2
P	= Kraft (z. B. Schaltkraft)	g u. kg
P_b	= Beschleunigungskraft	g u. kg
P_r	= Reibkraft (allgemein Gegenkraft)	g u. kg
Q	= Wärmeentwicklung	W
Q_b	= Wärmeentwicklung im eigentlichen Wärmeelement, z. B. dem Bimetallstreifen	W
Q_g	= Wärmeentwicklung bei Grenzstrom	W
Q_n	= Wärmeentwicklung bei Nennstrom	W
Q_w	= Wärmeentwicklung in der Heizwicklung	W
R	= elektrischer Widerstand	Ω
RT	= Raumtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
S	= Zahl der Schaltspiele	
S/h	= Schalthäufigkeit (Zahl der Schaltspiele je Stunde)	h^{-1}
T	= Zeitkonstante	s
T_A	= Auslöser-(Relais-) Zeitkonstante	s
T_L	= Motorzeitkonstante bei Lauf	s
T_M	= Motorzeitkonstante	s
T_R	= Motorzeitkonstante bei Stillstand	s
$\dot{U}T$	= Übertemperatur — Erwärmung	$^{\circ}\text{C}$
V	= Volumen	meist cm^3
V_b	= Volumen des eigentlichen Wärmeelementes, z. B. des Bimetallstreifens	cm^3
V_w	= Volumen der Heizwicklung	cm^3
α	= Längenausdehnungszahl bei Erwärmung	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\bar{\alpha}$	= Wärmeübergangszahl (-Abgabeziffer)	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
β	= Winkel, den die Tangente am Ende eines gekrümmten Bimetallstreifens mit der Ursprungsrichtung bildet	meist Bogenmaß

γ	= Dichte	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
ϑ	= Temperatur (im allgemeinen Erwärmung)	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_b	= Erwärmung des Bimetalls bei mittelbar beheizten Auslösern und Relais	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{bg}	= Erwärmung des Bimetalles bei mittelbarer Beheizung durch Grenzstrom	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_e	= Erwärmung bei Einstellstrom	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_g	= Erwärmung bei Grenzstrom	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_m	= Höchsttemperatur (im allgemeinen Erwärmung), die ein Körper bei Dauerbelastung erreicht	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{m\bar{u}}$	= desgl. bei Überlast \bar{u}	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{max}	= Höchstzulässige Erwärmung bei Kurzschlußabschaltung	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_n	= Erwärmung bei Nennstrom — also größtem Einstellstrom	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_o	= obere Erwärmungsgrenze im periodischen Betrieb	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_u	= untere Erwärmungsgrenze im periodischen Betrieb	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_w	= Erwärmung der Heizwicklung bei mittelbar beheizten Relais und Auslösern	$^{\circ}\text{C}$
λ	= Verhältnis der Schichtstärken bei Bimetall	
ϱ	= spezifischer elektrischer Widerstand.	$\Omega \cdot \text{cm}$
φ	= Zentriwinkel entsprechend dem Kreisbogen eines Bimetallstreifens	meist Bogenmaß
φ_1	= desgleichen im warmen Zustand, wenn zu φ im kalten im Gegensatz	meist Bogenmaß
ψ	= Winkel, den die Sehne eines gebogenen Bimetallstreifens mit der Tangente bei Bogenanfang bildet.	Bogenmaß