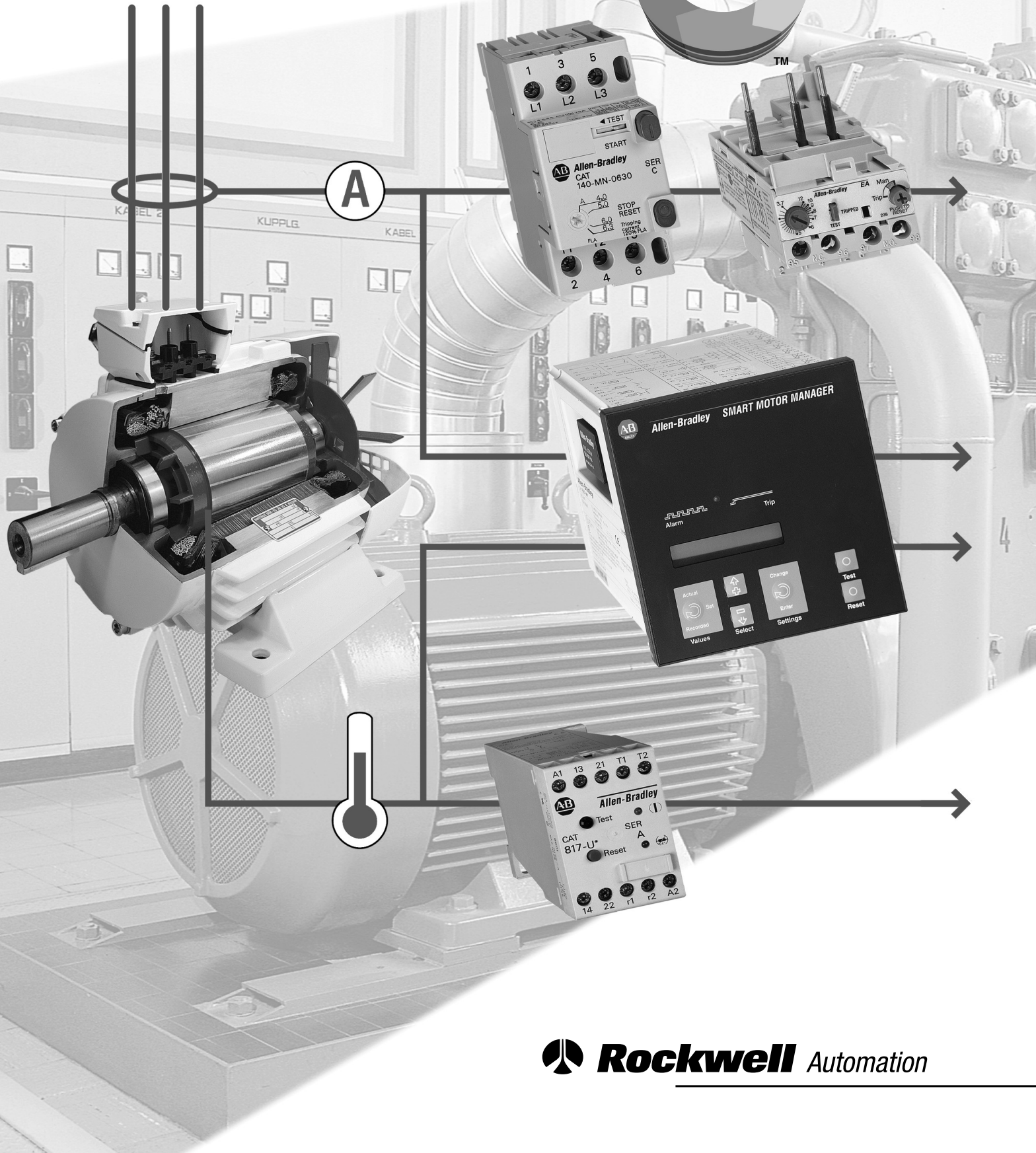


# Grundlagen für die Praxis

## Motorschutz

*Notwendigkeit des Motorschutz,  
Schutzbedürfnis des Motors,  
Schutzmethoden*





## Vorwort

Das vorliegende Fachbuch «Motorschutz» ist eine weitere Publikation zum Thema «Motor Management».

Mit diesen, in lockerer Folge erscheinenden Grundlagen für die Praxis steht dem Anwender ein wachsendes Nachschlagewerk rund um den Leistungsabgang für Projektierung und Anwendung zur Verfügung.

Themenbereiche sind:

- Starten von Motoren,
- Auswahl und Anwendung von Schaltgeräten,
- Kommunikation.

Bereits erschienen sind die Fachbücher

- «Drehstromasynchronmotoren», informiert über Aufbau, Betriebsarten, Auswahl und Dimensionierung von Motoren und
- «Grundlagen Leistungsschalter», ergänzende Angaben für den praktischen Umgang mit Leistungsschaltern.

Elektromotoren sind heute in jedem Produktionsprozess zu finden. Der optimalen Ausnutzung der Antriebe kommt unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit wachsende Bedeutung zu. «Motor Management» von Rockwell Automation hilft Ihnen,

- Anlagen besser zu nutzen,
- Unterhaltskosten zu senken,
- die Betriebssicherheit zu erhöhen.

Wir freuen uns, wenn Ihnen unsere Publikationen mithelfen, wirtschaftliche und effiziente Lösungen für Ihre Anwendungen zu finden.

Copyright © 1997 by Rockwell Automation AG

Alle Angaben erfolgen nach dem aktuellen Stand der Technik, ohne rechtliche Verbindlichkeit.

Inhalt

<b>1</b>	<b>Notwendigkeit des Motorschutz</b>	<b>1.1</b>
<b>2</b>	<b>Schutzbedürfnis des Motors</b>	<b>2.1</b>
<b>2.1</b>	<b>Erwärmung</b>	<b>2.1</b>
2.1.1	Betriebsverhalten	2.1
2.1.2	Grenztemperatur und Isolationsklassen	2.3
2.1.3	Alterung der Isolation	2.4
2.1.4	Ansprechgrenzen	2.5
2.1.5	Phasenausfall	2.6
2.1.6	Asymmetrie im Netz	2.8
2.1.7	Erdschluss	2.9
2.1.8	Kurzschluss	2.9
<b>3</b>	<b>Schutzbedürfnis der Anlage</b>	<b>3.1</b>
<b>3.1</b>	<b>Blockieren</b>	<b>3.1</b>
<b>3.2</b>	<b>Unterlast</b>	<b>3.1</b>
<b>3.3</b>	<b>Falsche Drehrichtung</b>	<b>3.1</b>
<b>3.4</b>	<b>Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen</b>	<b>3.1</b>
3.4.1	Zündschutzart erhöhte Sicherheit EEx e	3.1
3.4.2	Bedeutung der Zeit $t_E$	3.2
<b>4</b>	<b>Schutzmethoden</b>	<b>4.1</b>
<b>5</b>	<b>Temperaturabhängiger Schutz</b>	<b>5.1</b>
<b>5.1</b>	<b>Einsatzproblematik</b>	<b>5.1</b>
5.1.1	Anwendungen	5.1
5.1.2	Thermische Trägheit	5.1
<b>5.2</b>	<b>Bimetallfühler in der Wicklung</b>	<b>5.2</b>
<b>5.3</b>	<b>PTC - Fühler</b>	<b>5.3</b>
<b>5.4</b>	<b>Lineare Temperaturfühler</b>	<b>5.4</b>

<b>6</b>	<b>Stromabhängiger Schutz</b>	<b>6.1</b>
<b>6.1</b>	<b>Funktion</b>	<b>6.1</b>
<b>6.2</b>	<b>Gerätecharakteristik</b>	<b>6.1</b>
6.2.1	Stationärer Betrieb	6.1
6.2.2	Intermittierender Betrieb	6.2
<b>6.3</b>	<b>Bimetall - Schutzprinzip</b>	<b>6.3</b>
6.3.1	Funktion	6.3
6.3.2	Kurzschlussfestigkeit	6.5
6.3.3	Einphasiger Betrieb	6.5
6.3.4	Phasenausfall	6.5
6.3.5	Wiederbereitschaftszeit	6.7
6.3.6	Stromeinstellung	6.8
6.3.7	Freiauslösung	6.9
<b>6.4</b>	<b>Motorschutz bei Schweranlauf</b>	<b>6.9</b>
<b>6.5</b>	<b>Motorschutz in explosionsgefährdeten Räumen</b>	<b>6.10</b>
<b>6.6</b>	<b>Elektronischer Motorschutz</b>	<b>6.10</b>
<b>6.6.1</b>	<b>Überlastschutz</b>	<b>6.11</b>
6.6.6.1	Thermische Abbildungsmodelle	6.11
6.6.1.2	Stromeinstellung	6.12
6.6.1.3	Auslösezeit-Einstellung	6.13
<b>6.6.2</b>	<b>Spezielle Motorschutzfunktionen</b>	<b>6.14</b>
6.6.2.1	Phasenausfall	6.14
6.6.2.1	Asymmetrie	6.14
6.6.2.3	Erdschluss	6.15
	Erdschluss nach der "Holmgreen"- Methode (Starr geerdete Netze)	6.15
	Erdschluss mit Summenstromwandler	6.16
	Erdschluss-Schutz in Mittelspannungsnetzen	6.16
6.6.2.4	Kurzschlusschutz von Mittelspannungsmotoren	6.21
<b>6.6.3</b>	<b>Anlageschutzfunktionen</b>	<b>6.22</b>
6.6.3.1	Hohe Überlast und Blockierung	6.22
6.6.3.2	Unterlast	6.23
6.6.3.3	Drehrichtungsschutz	6.24
6.6.3.4	Anlaufzeit - Überwachung	6.24
6.6.3.5	Blockierung während des Starts	6.25
<b>6.6.4</b>	<b>Steuerfunktionen</b>	<b>6.26</b>
6.6.4.1	Vorwarnung	6.26
6.6.4.2	Lastregelung	6.26
6.6.4.3	Startverriegelung	6.26
6.6.4.4	Stern-Dreieck-Umschaltung	6.27
6.6.4.5	Warmstart	6.28
6.6.4.6	Kommunikationsmöglichkeiten	6.29

<b>6.6.5</b>	<b>Anwendungen elektronischer Motorschutzgeräte</b>	<b>6.29</b>
6.6.5.1	Motoren mit geringer thermischer Trägheit	6.29
6.6.5.2	Motoren mit hoher thermischer Trägheit	6.30
6.6.5.3	Rotorkritische Motoren	6.30
6.6.5.4	Mittelspannungsmotoren	6.30
6.6.5.5	Schleifringläufermotoren	6.31
6.6.5.6	Mehrstufenmotoren	6.31
6.6.5.7	Frequenzgeregelte Motoren	6.32
6.6.5.8	Sanftstart	6.32
6.6.5.9	Fremdbelüftete Motoren	6.33
6.6.5.10	Erhöhte Umgebungstemperatur	6.33
6.6.5.11	Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen	6.33
6.6.5.12	Schutz von kompensierten Motoren	6.34
<b>7</b>	<b>Auswahl des richtigen Motorschutzgeräts</b>	<b>7.1</b>
<b>7.1</b>	<b>Auswahl nach Anwendung</b>	<b>7.2</b>
<b>7.2</b>	<b>Auswahl nach Motor und Antrieb</b>	<b>7.3</b>
<b>7.3</b>	<b>Auswahl nach Umgebungsbedingungen</b>	<b>7.4</b>
<b>7.4</b>	<b>Auswahl nach Motormanagement-Kriterien</b>	<b>7.5</b>

## 1 Notwendigkeit des Motorschutz

Man könnte annehmen, dass korrekt geplante, dimensionierte, installierte, betriebene und gewartete Antriebe nicht ausfallen sollten. In der Praxis entsprechen aber diese Bedingungen selten dem Idealfall. Die Häufigkeit der verschiedenen Motorschäden ist je nach den spezifischen Betriebsbedingungen unterschiedlich.

Statistiken zeigen, dass man pro Jahr mit einer Ausfallrate von 0.5...4% rechnen muss. Die meisten Ausfälle entstehen durch Überlast. Isolationsfehler, die zu Erdschluss, Windungs- oder Windungskurzschluss führen, sind die Folge von Überspannungen oder Verschmutzung wie Feuchte, Öl, Fett, Staub oder Chemikalien.

Die ungefähren Anteile der einzelnen Schäden sind:

- Überlast 30%
- Isolationschäden 20%
- Phasenausfall 14%
- Lagerschäden 13%
- Alterung 10%
- Rotorschäden 5%
- Diverse 8%

Für den störungsfreien Betrieb eines Elektroantriebs sind deshalb die folgenden Punkte zu beachten:

- Richtige Projektierung: Für eine gegebene Anwendung muss der richtige Motor gewählt werden.
- Fachmännischer Betrieb: Eine fachkompetente Installation und eine regelmässige Wartung sind Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb.
- Guter Motorschutz: Dieser muss sämtliche denkbaren Problemkreise abdecken.
  - Er darf nicht auslösen, solange der Motor nicht gefährdet ist.
  - Ist der Motor gefährdet, muss das Schutzgerät auslösen, bevor ein Schaden entsteht.
  - Lässt sich ein Schaden nicht verhindern, so muss das Schutzgerät rasch auslösen, so dass das Schadenumfeld möglichst begrenzt bleibt.

Tabelle 1.2.1 gibt eine Übersicht der häufigsten Ausfallursachen bei Motoren, deren Auswirkungen und die möglichen Schäden.

Ursachen	Wirkungen	Mögliche Schäden
<b>Thermische Überlastung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extreme Anlaufbedingungen</li> <li>• Blockierter Rotor</li> <li>• Langandauernde Überlastung</li> <li>• Unterspannung</li> <li>• Unzulässiger intermittierender Betrieb</li> </ul>	Überstrom und damit unzulässige Erwärmung der Wicklungen	Ausgelöteter Rotorkäfig Verbrannte Statorwicklungen
<b>Kühlungsprobleme:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Behinderte Kühlung</li> <li>• Zu hohe Umgebungstemperatur</li> </ul>	Unzulässige Erwärmung	Verbrannte Statorwicklungen
<b>Elektrische Ursachen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einphasenlauf</li> <li>• Spannungsunsymmetrie</li> <li>• Erdschluss</li> <li>• Windungsschluss</li> <li>• Wicklungsschluss</li> </ul>	Unsymmetrischer Überstrom Unzulässige Erwärmung je nach Motorgrösse und Belastung	Einzelne Wicklungen oder Teile von Wicklungen verbrannt Lagerschäden
<b>Mechanische Ursachen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlechte Auswuchtung</li> <li>• Schlechte Ausrichtung des Antriebes</li> <li>• Unsachgemäss montierter Antrieb (z. B. zu hohe Lagerbelastung durch Keilriemen)</li> </ul>	Ungleichmässige Abnützung der Lager	Lagerschäden

Tab. 1.2.1 Ausfallursachen, Wirkungen und mögliche Schäden bei Motoren.

## 2 Schutzbedürfnis des Motors

### 2.1 Erwärmung

Entsprechend den Normen garantiert jeder Motorenhersteller, dass bei Bemessungsbetrieb die kritischen Teile der Maschine im zulässigen Temperaturbereich bleiben und kurzzeitige Überlastungen den Motor nicht gefährden. Die Motorschutzeinrichtung muss einerseits die volle Ausnutzung und damit den wirtschaftlichen Betrieb des Motors ermöglichen, aber andererseits bei Überlastung genügend schnell reagieren.

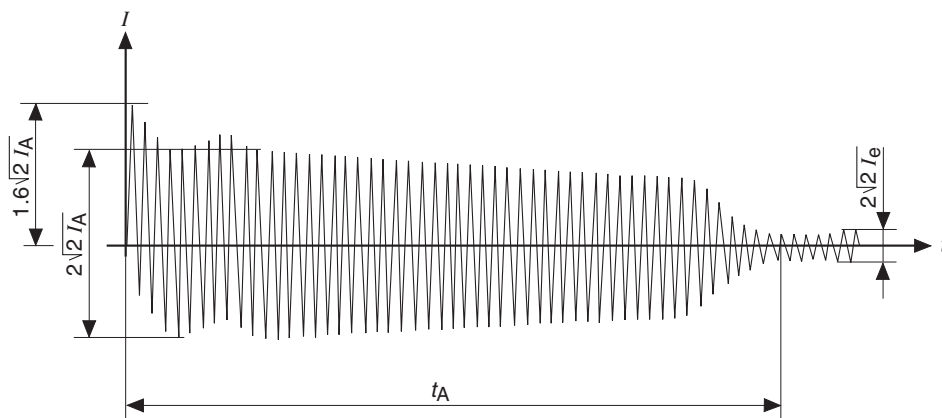
#### 2.1.1 Betriebsverhalten

Elektromotoren sind Energiewandler. Sie nehmen elektrische Energie auf und wandeln sie in mechanische um. Dabei entstehen Verluste, die in Form von Wärme anfallen. Der Gesamtverlust setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

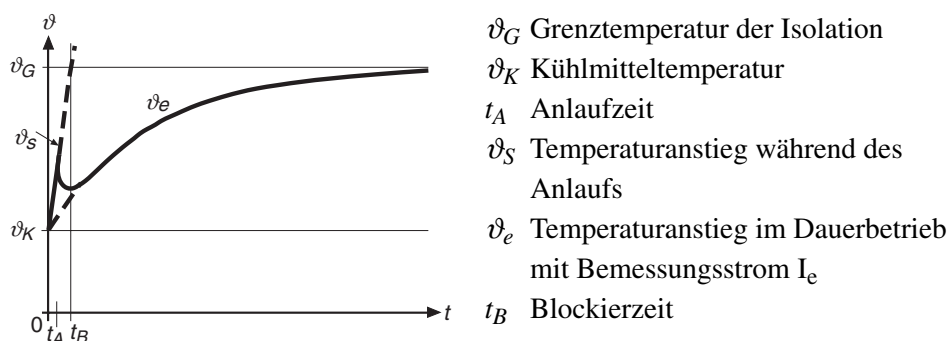
- *Stromunabhängige Verluste:* Sie sind praktisch konstant, das heisst auch im Leerlauf vorhanden.
  - Eisenverluste durch Ummagnetisierung und Wirbelströme
  - Mechanische Verluste durch Reibung und Lüftung
- *Stromabhängige Verluste:* Sie steigen mit der Belastung, das heisst mit der Stromaufnahme
  - Stromwärmeverluste im Stator
  - Stromwärmeverluste im Rotor

Die Verlustleistung steigt annähernd proportional mit dem Quadrat des aufgenommenen Stromes. Letzterer ist etwa proportional dem Schlupf des Motors. Bei blockiertem, stillstehendem Rotor, fliesst gemäss **Bild 2.2.1** im Stator der maximale Anzugsstromes mit  $4...8 I_n$ . Die gesamte aufgenommene Leistung wird in Wärme umgewandelt. Bleibt der Rotor blockiert, so steigt die Temperatur der Stator- und Rotorwicklung sehr stark an, weil erst nach einer Verzögerung ein Teil der Wärme in das Blechpaket abfliessen kann. Falls der Motor nicht rechtzeitig abgeschaltet wird, können Ständer- und Rotorwicklung verbrennen.

Mit zunehmender Drehzahl nimmt die produzierte Verlustwärme ab. Nach dem Hochlauf steigt die Temperatur gemäss **Bild 2.2.2** nach einer e-Funktion weiter an und erreicht schliesslich die Endtemperatur. Bei höherer Belastung stellt sich eine entsprechend höhere Endtemperatur ein.



**Bild 2.2.1** Einschalten eines Käfigläufermotors im Direktanlauf. Während der Anlaufzeit  $t_A$  fließt der hohe Motoranzugsstrom  $I_A$ . Dieser verursacht keine unzulässige Erwärmung, wenn die Anlaufzeit unterhalb der vom Motorhersteller festgelegten Grenze, in der Regel 10 s, bleibt. Die kurzzeitige asymmetrische Einschaltstromspitze kann vernachlässigt werden.



**Bild 2.2.2** Temperaturanstieg in der Motorwicklung. Die Wicklungstemperatur steigt während der Anlaufzeit  $t_A$  wegen des hohen Anlaufstromes  $I_A$  sehr rasch an. Nach dem Anlauf sinkt die Temperatur vorübergehend, weil Wärme an das Blechpaket abgegeben wird. Bleibt der Rotor blockiert, so erreichen die Wicklungen rasch die Grenztemperatur.

Elektromotoren sind thermisch nicht homogene Systeme. Wicklungen, Statoreisen und Rotor haben unterschiedliche Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten. Nach dem Anlauf und bei Belastungsänderungen erfolgt zwischen den einzelnen Maschinenteilen ein Temperatureausgleich. Die Wärme fließt dabei so lange von der heisseren Wicklung ins kühlere Eisen, bis der Temperaturunterschied ausgeglichen ist.

### 2.1.2 Grenztemperatur und Isolierklassen

Die Grenztemperaturen der Wicklungen und damit die zulässige Belastbarkeit des Motors, werden vor allem von der Wicklungsisolation bestimmt. Die IEC-Empfehlungen für elektrische Maschinen (IEC 34-1 und IEC 85) sowie die Vorschrift VDE 0530 Teil 1, sind in **Tabelle 2.3.1** zusammengestellt. Man spricht von der:

- *Max. Kühlmitteltemperatur:* Bei dieser Temperatur kann der Motor seine Bemessungsleistung abgeben.
- *Grenztemperatur in K,* gebildet als Mittelwert aus Widerstandsmessungen. Die Wicklungstemperatur ergibt sich aus der Summe der Kühlmitteltemperatur und der Wicklungserwärmung. Liegt die Kühlmitteltemperatur unterhalb 40 °C, so kann der Motor höher belastet werden. Liegt sie über 40 °C, so ist die Belastung zu reduzieren.
- *Höchstzulässige Dauertemperatur in °C* für den heissesten Punkt der Wicklung.

Isolier-Klasse	Max. Kühlmittel-temp. in °C	Grenzüber-temp. in K	Höchstzul. Dauertemp. in °C
E	40	75	120
B	40	80	130
F	40	105	155
H	40	125	180

Tab. 2.3.1 Isolierstoffklassen und höchste zulässige Dauertemperatur von Wicklungen.

Die höchst zulässige Dauertemperatur der einzelnen Isolierstoffe setzt sich aus der Kühlmitteltemperatur, der Grenzüber-temperatur und einer Erwärmungstoleranz zusammen. Letztere ist ein Sicherheitszuschlag, weil die Temperaturmessung über den ohmschen Widerstand nicht den heissesten Punkt der Wicklung erfasst.

Für sehr hohe Umgebungstemperaturen stellt man Motoren mit speziell wärmebeständiger Isolation her. Diese Maschinen können auch bei höheren Kühlmitteltemperaturen ihre Bemessungsleistung abgeben.

Die weitaus häufigste Kühlungsart ist die Eigenventilation mit Umgebungsluft. Eigenbelüftete Motoren führen mit einem auf der Welle angebrachten Ventilator einen Luftstrom über die Oberfläche des Gehäuses. Das Kühlmittel Luft hat damit die gleiche Temperatur wie die unmittelbare Umgebung des Motors. Die Kühlleistung ist abhängig von der Drehzahl des Motors.

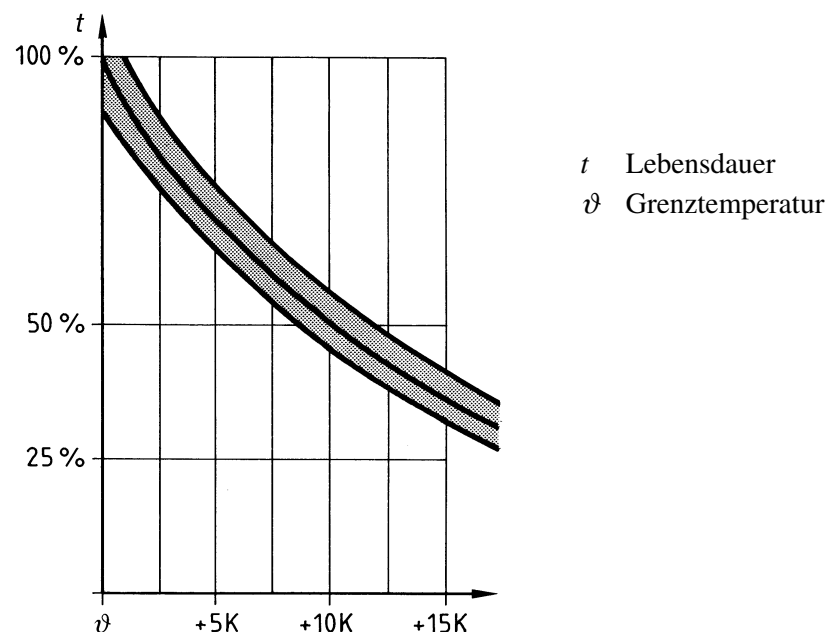
Die Rotoren von normalen Käfigläufermotoren sind aufgrund ihrer einfachen Konstruktion (keine Isolation) bezüglich der Temperatur unkritisch. Sie dürfen deshalb dauernd eine höhere Temperatur erreichen.

Bei Mittelspannungs- und grösseren Niederspannungsmotoren können während dem Anlauf Probleme entstehen, da die Dichte der Verluste die Anlaufzeit limitieren kann. Die Anlaufzeit und die zulässige Blockierzeit wird deshalb durch die Wärmekapazität des Rotors begrenzt. Man spricht hier von „rotorkritischen“ Motoren. Die hohe Erwärmung kann zu mechanischen Spannungen führen und das Auslöten der Läuferstäbe zur Folge haben.

Bei Motoren der Schutzart „erhöhte Sicherheit“ „EEx e“ kann die erhöhte Temperatur als Zündquelle wirken.

### 2.1.3 Alterung der Isolation

Für die Wicklungslebensdauer kann, bei Einhaltung der Grenztemperatur, bei allen Isolationsklassen mit 100'000 h gerechnet werden. Dies entspricht etwa einem 12jährigen Dauerbetrieb bei Bemessungslast. Die Alterung der Isolation läuft als chemischer Prozess ab, der gemäss **Bild 2.4.1** stark von der Temperatur abhängig ist. Als Folge der Erwärmung verdampft ein Teil des Isolierstoffes, was zu einer zunehmenden Porosität und einer damit verbundenen Abnahme der Spannungsfestigkeit führt. Als Richtwert gilt: Liegt die Betriebstemperatur 10K über der höchstzulässigen Dauertemperatur, so halbiert sich die Lebensdauer. Kurzzeitige Übertemperaturen beeinflussen die Lebensdauer eines Motors nicht stark. Hingegen darf die dauernde Betriebstemperatur nicht über dem höchstzulässigen Wert liegen.



*Bild 2.4.1 Reduktion der durchschnittlichen Lebensdauer von Motorwicklungen bei Übertemperatur.*

Moderne Projektierungsmethoden berücksichtigen gezielte Überlastungssituationen des Motors. Dadurch lässt sich die Lebensdauerreserve voll ausschöpfen. Man spricht hier von der lebensdauerorientierten Projektierung, die darauf abzielt, dass der Motor genau so lange betrieben werden kann, wie er aus wirtschaftlichen Gründen funktionieren muss.

### 2.1.4 Ansprechgrenzen

Damit der Schutz von Normmotoren gewährleistet ist, hat die IEC Ansprechgrenzen für zeitverzögerte Überlastrelais festgelegt.

Für auf den Bemessungsbetriebsstrom eingestellte, temperaturkompensierte, allpolig belastete Überlastrelais, gelten die Werte gemäss IEC 947-4-1.

**Bild 2.5.1** und **Tabelle 2.5.1**.

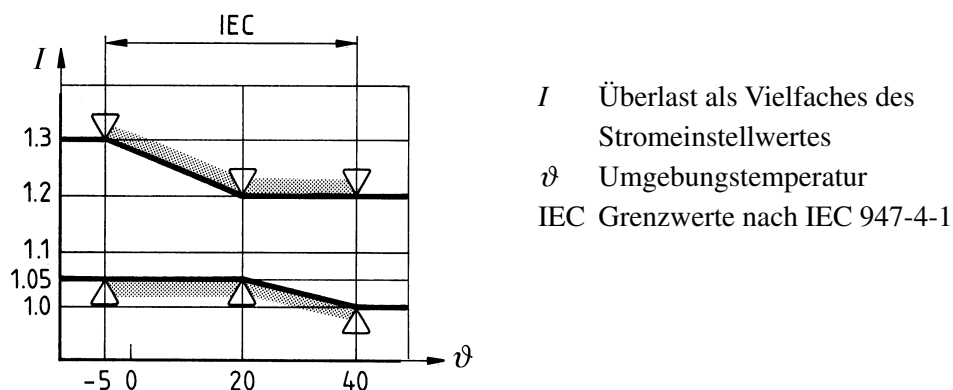


Bild 2.5.1 Grenzwerte des Stromvielfachen für temperaturkompensierte Überlastrelais nach IEC 947-4-1.

Funktion	nicht ansprechen vom kalten Zustand aus	ansprechen nach anschliessender Stromerhöhung	ansprechen vom warmen Zustand aus	ansprechen vom kalten Zustand aus
Vielfaches des Stromeinstellwertes	1.05	1.2	1.5	7.2
Auslösezeit 10 A	$\geq 2$ h	$< 2$ h	$< 2$ min	2...10 s
gemäss 10	$\geq 2$ h	$< 2$ h	$< 4$ min	4...10 s
Auslöse-klasse: 20	$\geq 2$ h	$< 2$ h	$< 8$ min	6...20 s
30	$\geq 2$ h	$< 2$ h	$< 12$ min	9...30 s

Tab. 2.5.1 Ansprechgrenzen bei +20 °C und allpoliger Belastung für umgebungstemperaturkompensierte, thermische Überlastrelais gemäss IEC 947-4-1.

Bei zweipoliger Belastung von dreipoligen thermischen Überlastrelais (z.B. bei Ausfall einer Phase) gelten die Ansprechgrenzen gemäss Tabelle 2.6.1.

Art des thermischen Überlastrelais	Vielfaches des Stromeinstellwertes		Bezugsumgebungstemperatur
	Ansprechen $t > 2 \text{ h}$ , ausgehend vom kalten Zustand des Relais	Ansprechen $t \leq 2 \text{ h}$	
Umgebungstemperaturkompensiert, nicht phasenausfallempfindlich	3 Pole 1.0	2 Pole 1.32 1 Pole 0	+ 20 °C
Nichtumgebungstemperaturkompens., nicht phasenausfallempfindlich	3 Pole 1.0	2 Pole 1.25 1 Pole 0	+ 40 °C
Umgebungstemperaturkompensiert, phasenausfallempfindlich	2 Pole 1.0 1 Pole 0.9	2 Pole 1.15 1 Pole 0	+ 20 °C

Tab. 2.6.1 Ansprechgrenzen von dreipoligen thermischen Überlastrelais mit nur zweipoliger Belastung.

### 2.1.5 Phasenausfall

Unter Phasenausfall versteht man den Unterbruch eines Polleiters. Der Motor läuft dann einphasig weiter und kann Schaden nehmen. Ursache ist z.B. ein ausgelöstes Überstromschutzgerät. Kleine bis mittelgrosse Motoren sind meist ständerkritisch, so dass allenfalls der Stator Schaden nehmen kann. Es ist zu unterscheiden:

- *Motoren in Sternschaltung:* Diese Motoren sind durch den Ausfall einer Phase nicht gefährdet. Gemäss **Bild 2.7.1** sind die Ströme in den Motorwicklungen im ungestörten wie auch im gestörten Betrieb beim Ausfall eines Polleiters gleich den Strömen in den Aussenleitern. In den beiden stromdurchflossenen Wicklungen entsteht wegen zunehmendem Strom wohl eine erhöhte Verlustleistung. Insgesamt wird der Motor weniger erwärmt, weil mit der dritten, stromlosen Wicklung ein Temperatenausgleich erfolgt. Ein stromerfassendes Schutzgerät löst bei Überstrom rechtzeitig aus. Kleine bis mittelgrosse (ständerkritische) Motoren in Sternschaltung sind durch Phasenausfall allgemein nicht gefährdet.
- *Motoren in Dreieckschaltung:* In der Dreieckschaltung sind im ungestörten Betrieb die Strangströme um den Faktor  $1/\sqrt{3}$  mal kleiner als die Ströme in den Aussenleitern  $I_{STR} = 0.58 I_n$ . Bei Ausfall einer Phase steigt der Strom

aus elektromagnetischen Gründen gemäss **Bild 2.7.2** um etwa 50% an. In den beiden andern, nun in Serie geschalteten Strängen, sinkt der Strom auf etwa 67%. Diese Situation tritt ein, weil der Motor die an der Welle abgegebene Leistung praktisch konstant hält. Die absolute Erhöhung der Ströme in den Strängen und in den beiden intakten Aussenleitern hängt von der augenblicklichen Belastung ab.

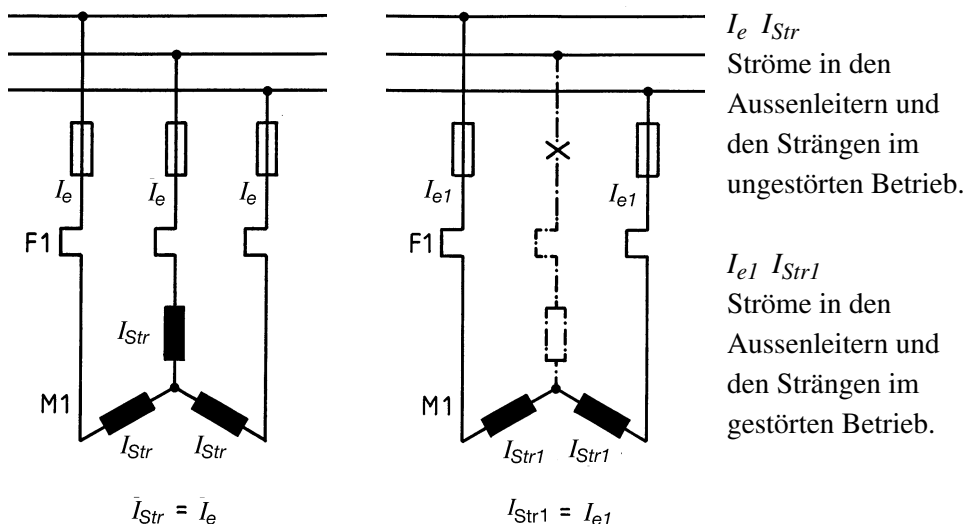


Bild 2.7.1 Phasenausfall eines Motors in Sternschaltung. Stromfluss des ungestörten und gestörten Betriebs.

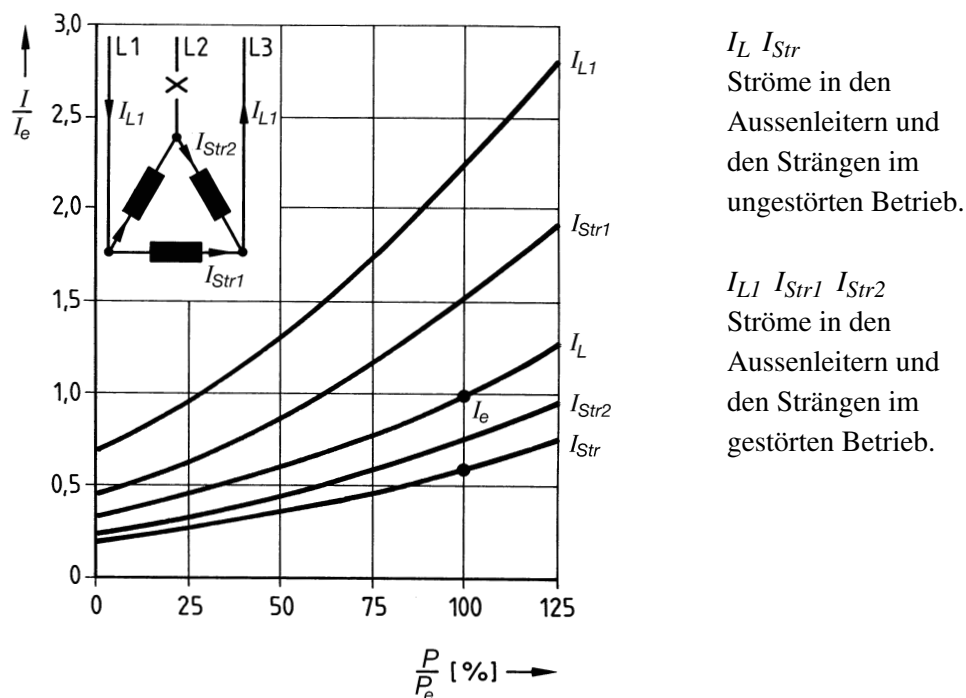


Bild 2.7.2 Phasenausfall eines Motors in Dreieckschaltung. Stromfluss des ungestörten und gestörten Betriebs als Funktion der Belastung

Entsprechend den ungleichen Strömen in den Wicklungen ist deren Erwärmung ungleich. Weil zwischen den Wicklungen untereinander sowie zwischen den Wicklungen und dem Eisenkörper Wärme ausgetauscht wird, ist die Erwärmung des Stators proportional zur Summe der Verluste in allen Strängen. Allgemein gilt für Motoren mit einer Leistung von,

-  $P_e \leq 10\text{KW}$ : Sie benötigen keinen speziellen Phasenausfallschutz, sofern der zweiphasige Auslösestrom  $\leq 1.25 I_e$  ist. Die Erwärmung ist in diesem Falle höchstens derjenigen bei symmetrischer dreiphasiger Belastung.

-  $P_e \geq 10\text{KW}$ : Für diese Motoren empfiehlt sich ein Motorschutzgerät mit Phasenausfallschutz oder ein schnell reagierendes elektronisches Schutzgerät. Die schnelle Abschaltung trägt neben der elektrischen Sicherheit auch zur Schonung der Lager bei.

In Werkvorschriften vieler Firmen und Elektrizitätswerke werden vorwiegend für grössere Antriebe, oder in Anlagen mit erhöhtem Sicherheitsbedürfnis, phasenausfallempfindliche Motorschutzgeräte verlangt.

Bei einphasiger Speisung des Stators sind die Rotorverluste wesentlich höher als bei symmetrischer Speisung. Besonders rotorkritische Motoren können dadurch zusätzlich gefährdet sein.

### 2.1.6 Asymmetrie im Netz

Die verketteten, wie auch die Strangspannung im Drehstromnetz, sind nicht exakt gleich. Ursache dafür sind zum Beispiel:

- sehr lange Netzzuleitungen
- defekte Kontakte an Leistungsschaltern und Schütze
- lose Klemmenanschlüsse

IEC und NEMA definieren die Spannungsasymmetrie wie folgt:

$$\Delta U (\%) = \frac{\text{Maximale Abweichung vom Durchschnitt der Phasenspannungen} \times 100}{\text{Durchschnitt der Phasenspannungen}}$$

Die aus den abweichenden Spannungen resultierende Stromasymmetrie der Wicklungsströme beträgt das 6...10fache der Spannungsasymmetrie und verursacht eine zusätzliche Erwärmung und Reduktion der Motorlebensdauer.

**Bild 2.9.1** gibt die Reduktionsfaktoren für die Motorleistung gemäss IEC und NEMA.

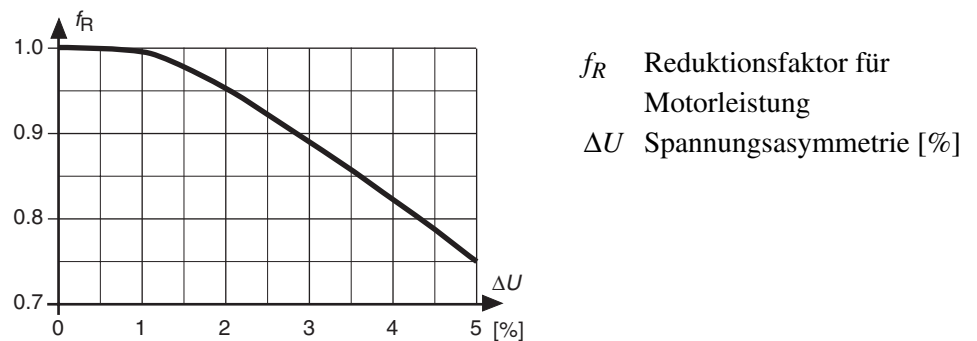


Bild 2.9.1 Leistungsreduktion infolge Spannungsasymmetrie.

## 2.1.7 Erdschluss

Isolationsschäden resultieren meist von hohen Spannungstößen und führen oft zu Schlüssen gegen geerdete Maschinenteile. Quellen dieser Entladungen sind Blitzeinschläge, Netzumschaltungen, Kondensatorentladungen und der Betrieb von Leistungselektronikgeräten.

## 2.1.8 Kurzschluss

Man unterscheidet einpolige Kurzschlüsse gegen Erde, sowie zwei- und dreipolige Kurzschlüsse mit und ohne Erdberührung. Hauptursache der Kurzschlüsse sind Isolationsschäden und mechanische Beschädigungen. Die Ströme sind von den sich im Stromkreis befindlichen Widerständen abhängig und können hohe Werte erreichen. Mit der Kurzschlussdauer nehmen die Materialschäden stark zu. Kurzschlüsse müssen deshalb rasch erkannt und abgeschaltet werden.



## 3 Schutzbedürfnis der Anlage

### 3.1 Blockieren

Blockieren eines Antriebes kann durch ein zu hohes Lastmoment oder einen mechanischen Schaden verursacht werden. Es ist sinnvoll, den betroffenen Antrieb möglichst rasch vom Netz zu trennen. Man vermeidet damit eine unnötige mechanische und thermische Belastung von Motor und Kraftübertragungselementen. Grundsätzlich lassen sich auch mögliche Unfallfolgen reduzieren.

### 3.2 Unterlast

Gefährdung bei Unterlast und entsprechend tiefer Stromaufnahme ist möglich, wenn Motoren durch das Fördermedium selbst gekühlt werden. Probleme können zum Beispiel bei Ventilatoren oder Unterwasserpumpen bei fehlendem oder ungenügendem Förderstrom wegen verstopften Filtern oder geschlossenen Schiebern usw. entstehen. Die Antriebe können sich trotz Unterlast überhitzen. Solche Maschinen sind oft an unzugänglichen Orten, wie zum Beispiel Pumpen in Bohrlöchern, was im Schadenfall zu kostspieligen Reparaturen führt. Unterlast bei kleinem Strom kann auch auf einen mechanischen Fehler hinweisen. Beispiele sind defekte Kupplungen, gebrochene Wellen, gerissene Transportbänder, beschädigte Ventilatorblätter usw. Solche Unterlastsituationen gefährden zwar den Motor nicht, verursachen aber Produktionsausfälle und können zu Anlageschäden führen. Die rasche Fehlererkennung hilft Stillstandzeiten und mögliche Unfallfolgen zu reduzieren.

### 3.3 Falsche Drehrichtung

Das Einschalten eines Antriebes in der falschen Drehrichtung kann eine Anlage schwer beschädigen und ist oft mit hoher Unfallgefahr verbunden. Bei mobilen Anlagen, wie Baumaschinen, Kühltransporter usw., muss nach Reparaturarbeiten oder Netzarbeiten im elektrischen Verteilnetz mit falschem Drehsinn gerechnet werden. Bei solchen Antrieben ist das Einschalten bei falschem Drehsinn zu verhindern.

### 3.4 Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen

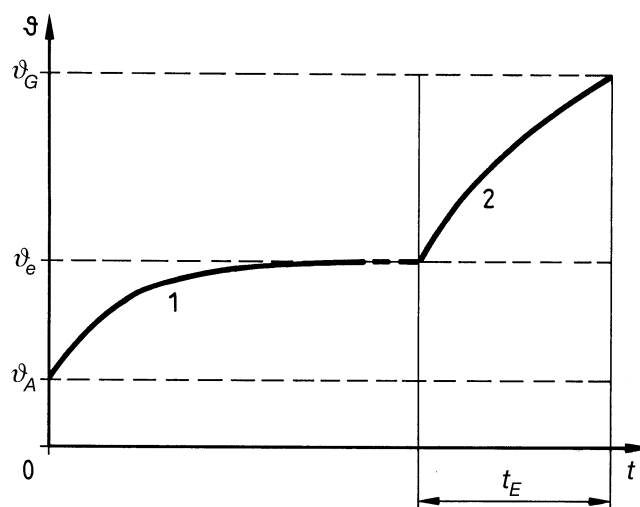
#### 3.4.1 Zündschutzart erhöhte Sicherheit EEx e

Gemische aus zündbaren Gasen oder Dämpfen und Luft können unter bestimmten Voraussetzungen durch Funken oder hohe Temperaturen gezündet werden. Die Zündtemperatur ist je nach chemischer Zusammensetzung des Stoffgemisches und dem Mischverhältnis verschieden.

Die Zündung eines explosionsfähigen Gemisches lässt sich bei Motoren verhindern, wenn sichergestellt ist, dass die maximale Temperatur der heissesten Stelle unter der örtlich kritischen niedrigsten Zündtemperatur liegt. Die Grenztemperatur der Wicklungsisolation darf selbstverständlich nicht überschritten werden.

### 3.4.2 Bedeutung der Zeit $t_E$

Unter der Zeit  $t_E$  versteht man gemäss **Bild 3.2.1** die Zeitspanne die verstreicht, wenn der Motor von der Bemessungsbetriebs- auf die zulässige Grenztemperatur erwärmt wird. Sie wird für den ungünstigsten Fall, das heisst bei blockiertem Rotor und der höchst zulässigen Umgebungstemperatur bestimmt. Ein Motorschutzgerät muss deshalb beim Anlaufstrom  $I_A$  (Höchstwert bei blockiertem Rotor) den Motor innerhalb der Zeit  $t_E$  abschalten. Der Motor erreicht damit nicht die kritische Temperatur.



*Bild 3.2.1 Definition der Zeit  $t_E$ , innerhalb der sich der Motor bei blockiertem Rotor von seiner Bemessungsbetriebs- auf die Grenztemperatur erwärmt.*

- $\vartheta$  Temperatur
- $\vartheta_A$  Höchstzulässige Umgebungstemperatur des Motors
- $\vartheta_e$  Bemessungsbetriebstemperatur
- $\vartheta_G$  Grenztemperatur
- $t$  Zeit
- 1 Erwärmungskurve im Bemessungsbetrieb
- 2 Erwärmung bei blockiertem Motor

In Ländern mit allgemeiner Prüfpflicht ist auch die Zeit-/Strom-Kennlinie automatisch eingeschlossen. Nur solch geprüfte Geräte dürfen in diesen Ländern zum Schutz von EEx e Motoren eingesetzt werden.

## 4 Schutzmethoden

Für die Temperaturüberwachung von Motoren sind die zwei sich ergänzenden Methoden üblich:

- *Temperaturmessung mit eingebauten Fühlern in der Statorwicklung:* Der Fühler misst wohl die Temperatur direkt in der Motorwicklung, aber nur genau an dem Ort wo er eingebaut ist. Zusätzlich muss die thermische Verzögerung des Fühlers von oft mehr als 10 s berücksichtigt werden.

Nicht erfasst werden:

- Rotorüberlast
  - Phasenausfall
  - Asymmetrie
  - Kurzschluss
  - Erdschluss
- 
- *Strommessung in der Zuleitung:* Die Strommessung in der Zuleitung ist sinnvoll, wenn der Temperaturanstieg des Motors als Funktion des Motorstromes bekannt ist. Die Schutzgeräte sind einstellbar gemäss des Bemessungsbetriebsstromes und für kurze Überlastungssituationen.



## 5. Temperaturabhängige Schutzmethoden

### 5.1 Einsatzproblematik

#### 5.1.1 Anwendungen

Die Temperaturfühler baut man in die Wicklungsköpfe der Statorwicklung ein. Sie messen deshalb direkt die für den Motor kritische Temperatur. Temperaturfühler werden vor allem bei den folgenden Betriebsverhältnissen eingesetzt:

- Wechselnde Belastung
- Start - Stop - Betrieb
- Gegenstrombremsung
- Hohe Umgebungstemperatur
- Schlechte Kühlung, zum Beispiel bei staubiger Umgebung
- Drehzahlgeregelte Motoren

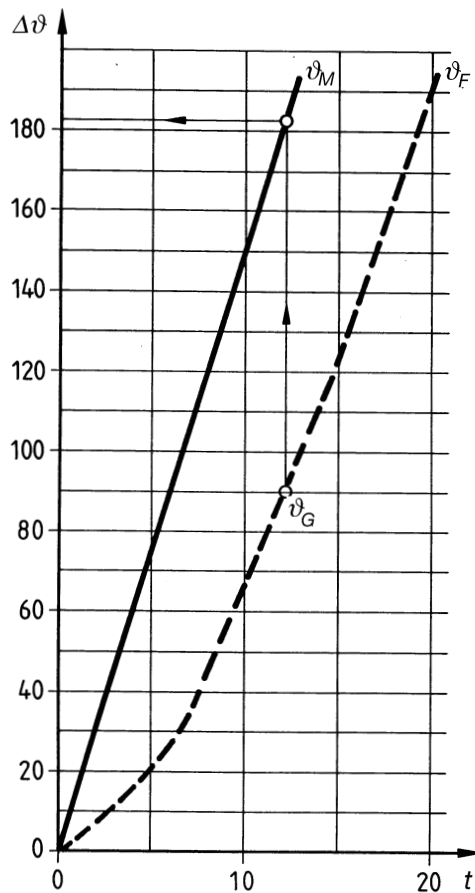
Bei verschiedenen Anwendungen bietet der Temperaturfühler allein ungenügenden oder sogar keinen Schutz. In diesen Fällen werden zusätzlich strommessende Schutzgeräte eingesetzt. Dies ist nötig bei:

- Rotorkritischen Motoren
- Schutz bei,
  - Erdschluss
  - Kurzschluss
  - Blockierung des Rotors
  - Motoren mit kleiner Thermischer Trägheit
- Schneller Reaktion bei Phasenausfall und Asymmetrie

#### 5.1.2 Thermische Trägheit

Bei Motoren mit kleiner thermischer Trägheit, wie zum Beispiel bei thermisch gekapselten Kältemaschinenmotoren oder bei Antrieben von Unterwasserpumpen, kann die thermische Verzögerung zwischen Wicklung und Fühler kritisch sein. Die Koppelzeit liegt, je nach Art des Fühlers und dessen Einbau in der Wicklung, in der Grössenordnung von 10 s.

Ein Schutzproblem entsteht bei schnellen Temperaturänderungen. Im Dauerbetrieb haben Wicklung und Fühler praktisch die gleiche Temperatur. Während dem Anlauf oder bei grossen Laständerungen wie zum Beispiel bei blockiertem Rotor, steigt die Wicklungstemperatur sehr rasch. Die Fühlertemperatur eilt mit der Koppelzeitkonstante gemäss **Bild 5.2.1** nach.



Wegen der Koppelzeitkonstante des Fühlers hat die Wicklung der Isolationsklasse B bereits eine Temperatur  $\Delta\vartheta = 180$  K über der Kühlmitteltemperatur von  $40$  °C erreicht, wenn der Fühler die Grenztemperatur erreicht.

- $\Delta\vartheta$  Temperaturdifferenz über der Kühlmitteltemperatur von  $40$  °C
- $\vartheta_M$  Verlauf der Wicklungstemperatur beim Motor mit einem Temperaturanstieg von  $15$  K/s
- $\vartheta_F$  Verlauf der Fühlertemperatur
- $\vartheta_G$  Grenztemperatur für die Isolationsklasse B
- $t$  Zeit in s

Bild 5.2.1 Thermische Verzögerung eines in der Statorwicklung eingebauten PTC-Fühlers.

Zum Beispiel kann bei Blockierung eines Unterwassermotors die Stromdichte in der Statorwicklung bis  $50$  A/mm<sup>2</sup> erreichen. Die Wicklungstemperatur steigt hier rasch mit etwa  $15$  K/s an. Wenn der Fühler mit einer Koppelzeitkonstante von  $8$  s die zulässige Grenztemperatur der Isolationsklasse B erreicht, beträgt die Wicklungstemperatur bereits mehr als  $180$  K über der Kühlmitteltemperatur von  $40$ °C. Der Motor kann gefährdet sein.

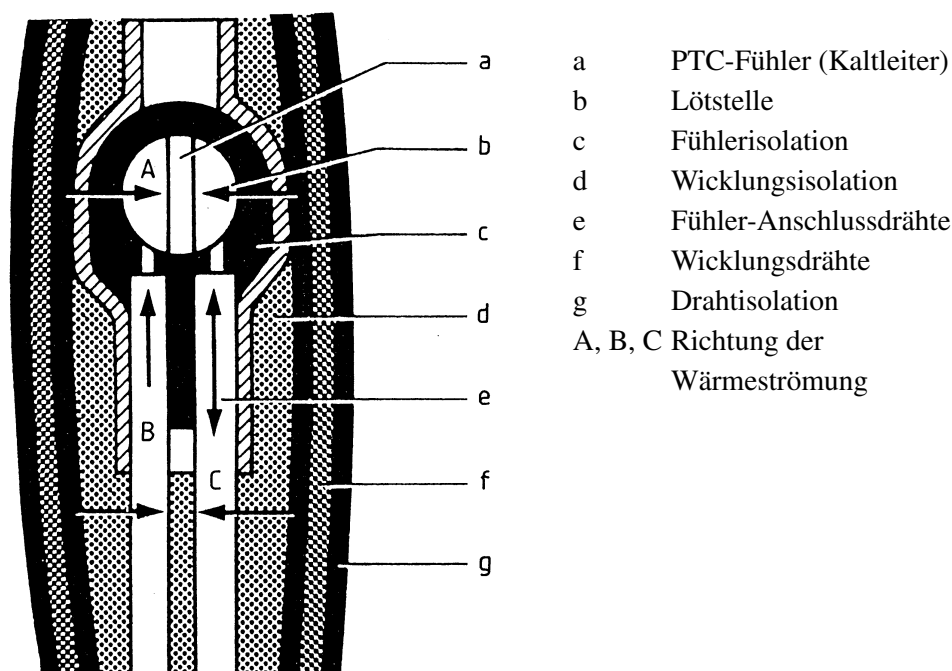
## 5.2 Bimetallfühler in der Wicklung

Bimetallfühler bestehen aus zwei aufeinander gewalzten Metallen mit ungleichen thermischem Ausdehnungskoeffizient. Werden sie erwärmt, dehnen sie sich ungleichmässig aus und können einen Schaltkontakt betätigen. Sie haben den Vorteil, dass im Prinzip die Steuerspannung direkt an den Schalter gelegt werden kann und damit ein spezielles Auslösegerät entfällt. Folgende Nachteile begrenzen jedoch ihren Einsatz:

- Lange thermische Verzögerung
- Eingeschränkte Genauigkeit. Unsorgfältige Montage können die Auslösetemperatur ändern.
- Grosse Abmessungen im Vergleich zu modernen Fühlern

### 5.3 PTC - Fühler

Der meist verwendete Fühler in Niederspannungsmotoren ist der Kaltleiterfühler mit positivem Temperaturkoeffizient (PTC). Sie werden auch als Thermistorfühler bezeichnet. Die miniaturisierten Fühler (**Bild 5.3.1**) haben unterhalb der Bemessungsansprechtemperatur einen niedrigen Widerstand und erhöhen im Bereich der Bemessungsansprechtemperatur ihren Widerstand gemäss **Bild 5.4.1** um Größenordnungen. Diese Widerstandsänderung wird mit einem Auslösegerät ausgewertet. Die Bemessungsansprechtemperatur ist durch den PTC - Fühler gegeben und damit unabhängig vom Auslösegerät.



*Bild 5.3.1 Schnitt durch einen PTC-Fühler und die Wicklung eines Niederspannungsmotors.*

Die Fühler werden meist abluftseitig in die Wickelköpfe der Motoren eingebaut und die Bemessungsansprechtemperatur TNF der Isolationsklasse zugeordnet. Das Ansprechen des Fühlers kann zum Abschalten des Motorschalters oder auch zum Melden benutzt werden. Soll vor Erreichen der kritischen Temperatur eine Warnung erfolgen, sind weitere Fühler mit einer niedrigeren Bemessungsansprechtemperatur einzubauen.

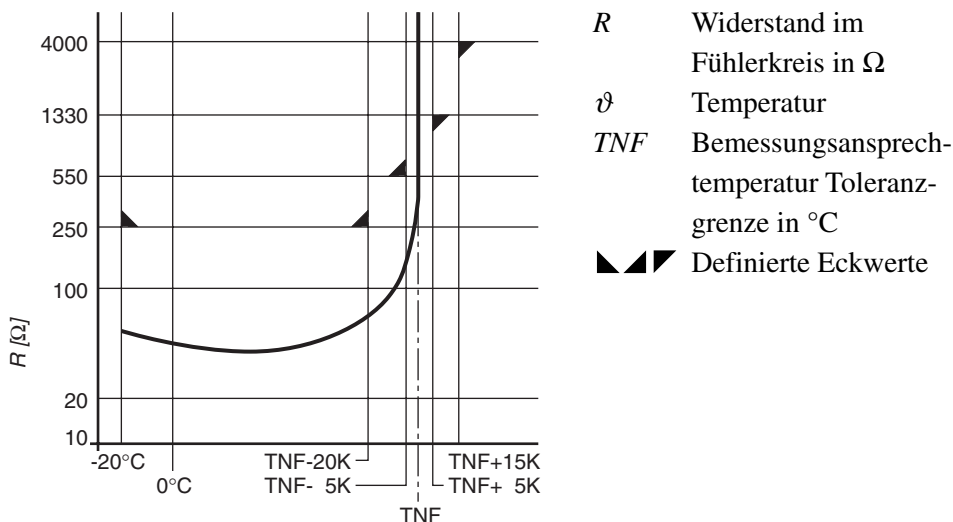


Bild 5.4.1 Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines PTC-Fühlers gemäss IEC 34-11-2.

### 5.4 Lineare Temperaturfühler

Als lineare Temperaturfühler verwendet man meist Pt 100 - Fühler aus Platin. Der Widerstandswert ändert sich proportional zur Temperatur. Pt 100 - Fühler haben gemäss Bild 5.4.2 bei 0 °C einen Widerstand von 100  $\Omega$ . Sie werden vorwiegend bei grossen Motoren eingesetzt. Mittelspannungsmotoren haben standardmässig meist Pt 100 - Fühler eingebaut.

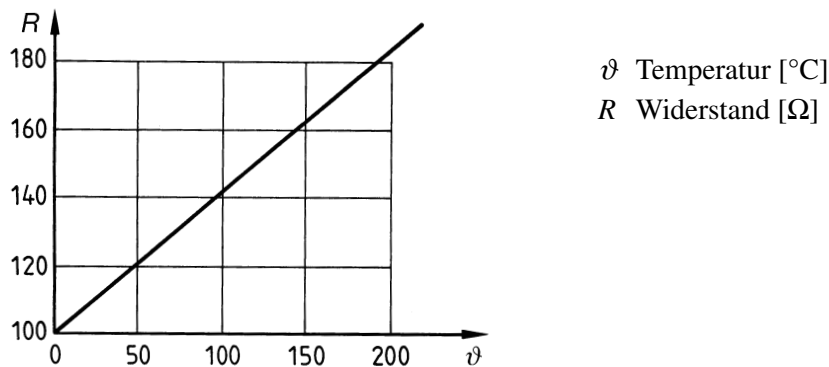


Bild 5.4.2 Widerstandskennlinie eines Pt 100-Fühlers.

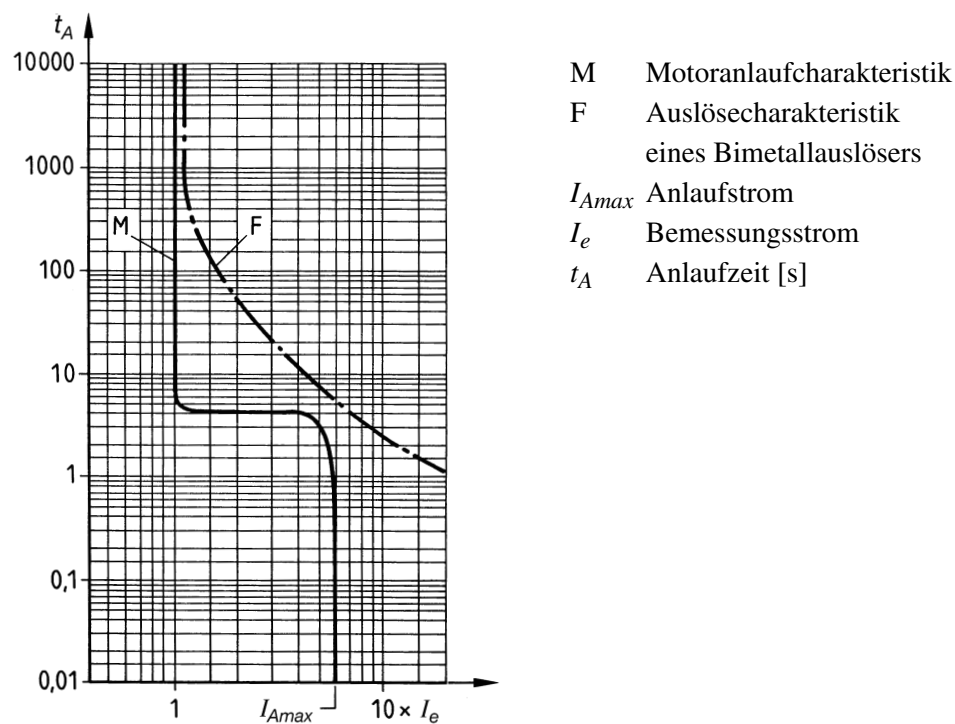
Im Gegensatz zum PTC-Fühler, dessen Bemessungsansprechtemperatur durch den Fühler bestimmt ist, kann beim Pt 100-Fühler die Ansprechtemperatur frei am Auslösegerät eingestellt werden. Zusätzlich lässt sich jede beliebige Temperatur zur Vorwarnung, Wiedereinschaltverriegelung oder Belastungsregelung abgreifen. Selten werden auch Ni 100 -, Ni 120 - und Cu 10 - Fühler eingesetzt.

## 6 Stromabhängiger Schutz

### 6.1 Funktion

Die Stromaufnahme des Motors ist ein Mass für dessen Erwärmung. Da die Temperatur der Statorwicklung bzw. des Rotorkörpers nicht gemessen wird, gilt dieser Zusammenhang nur, wenn die folgenden Randbedingungen eingehalten werden:

- Die Bemessungsbelastung des Motors bezieht sich auf die maximale Kühlmitteltemperatur von 40 °C.
- Vorübergehende Überlastungen, zum Beispiel während des Anlaufs, muss das Schutzgerät gemäss **Bild 6.1.1** zulassen.



*Bild 6.1.1 Motorschutzgeräte müssen den Motoranlauf zulassen. Die Geräte-kennlinie F muss immer oberhalb der Motorkennlinie M liegen.*

Bei stromerfassenden Schutzsystemen entfallen die bei den Temperaturfühlern besprochenen Probleme und Einschränkungen.

### 6.2 Gerätecharakteristik

#### 6.2.1 Stationärer Betrieb

Beim stationären Betrieb lässt sich das Überschreiten der Grenztemperatur gemäss **Bild 6.2.1** auch mit einem einfachen Schutzgerät verhindern, dessen Erwärmungskennlinien sich nicht mit denjenigen des Motors decken. Voraussetzung ist, dass das Schutzgerät thermisch gleich oder flinker ist als der Motor.

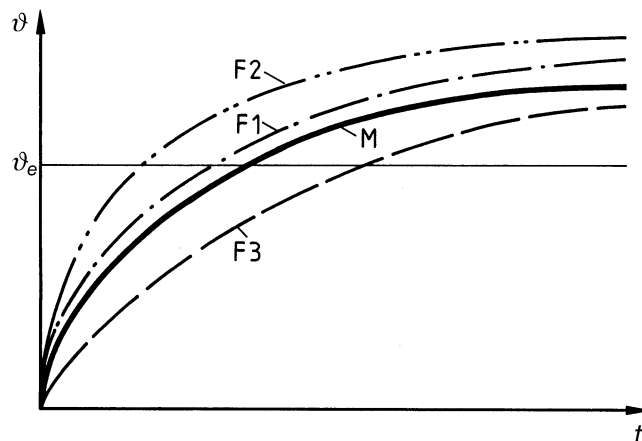


Bild 6.2.1 Erwärmungscharakteristiken von Motor und thermischem Schutzgerät bei leichter Überlast und konstantem Betrieb.

M	Thermische Kennlinie des Motors
F1, F2	Flinke Motorschutzgeräte: Motor ist bei Überlast geschützt
F3	Träges Motorschutzgerät: Motor kann sich bei Überlast unzulässig erwärmen
$\vartheta$	Temperatur
$\vartheta_e$	Temperatur bei Bemessungsbetrieb
t	Zeit

- *Flinkeres Auslösegerät als die Motorerwärmungskurve:* Der Motor ist gegen Überlast geschützt. Das Schutzgerät löst zu früh aus und verhindert allenfalls die volle Ausnützung des Motors.
- *Trägeres Auslösegerät als die Motorerwärmungskurve:* Der Motor kann sich unzulässig erwärmen.

Mit hochwertigen Motorschutzeinrichtungen (**Kapitel 6.6**) lässt sich der Verlauf der Motorerwärmung genau nachbilden. Trotz maximaler Ausnützung ist dann der Motor sicher geschützt.

### 6.2.2 Intermittierender Betrieb

Bei konstanter Belastung bzw. einmaliger Erwärmung des Motors, sind die thermischen Verhältnisse relativ einfach. Bei wechselnden Betriebszuständen, wie zum Beispiel beim Aussetzbetrieb, ist jedoch die Übereinstimmung des transienten Zustandes von Motor und Schutzgerät sehr wichtig. **Bild 6.3.1** zeigt, wie die verschiedenen Kennlinien auseinanderlaufen. Im intermittierenden Betrieb ändert die Temperatur der Wicklung gegenüber dem Eisen relativ stark. Bei Zykluszeiten unter 5...10 min bleibt letztere praktisch konstant. Zusätzlich sind die Kühlverhältnisse eigenbelüfteter Motoren im Lauf und im Stillstand sehr unterschiedlich. Die Abkühlzeitkonstante ist etwa 2...5mal länger als die Erwärmungszeitkonstante. Bimetall- und einfache elektronische Schutzgeräte berücksichtigen diesen Umstand nicht.

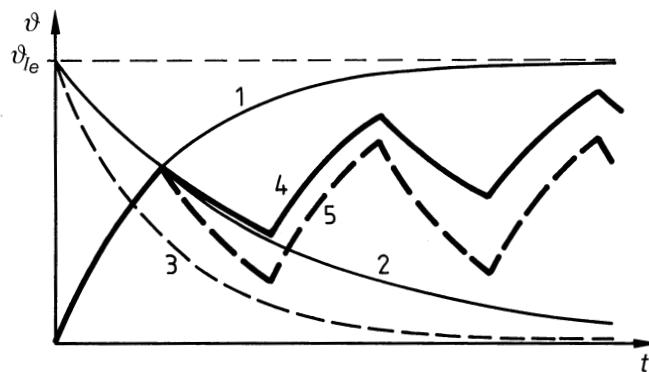


Bild 6.3.1 Erwärmungs- und Abkühlcharakteristik von Motor und Thermorelais bei intermittierender Belastung.

- 1 Erwärmungscharakteristik von Motor und Thermorelais
  - 2 Abkühlcharakteristik des Motors
  - 3 Abkühlcharakteristik eines Thermorelais, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Abkühlverhältnisse bei Lauf und Stillstand
  - 4 Verlauf der Wicklungstemperatur im Motor
  - 5 Verlauf der vom Thermorelais nachgebildeten Wicklungstemperatur
- $\vartheta_{Ie}$  Temperatur bei Bemessungsbetrieb  
 $t$  Zeit

Das transiente Verhalten ungleicher Motoren ist verschieden. Trotzdem sollten Schutzgeräte das Temperaturverhalten des Motors möglichst genau nachbilden. Meist sind Kompromisse notwendig, so dass der Motor leicht überschützt wird.

Auch beim intermittierenden Betrieb können elektronische Schutzgeräte

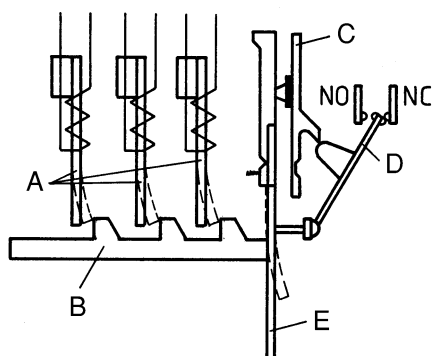
**Kapitel 6.6** die maximale Ausnutzung des Motors ermöglichen.

## 6.3 Bimetall - Schutzprinzip

### 6.3.1 Funktion

Thermisch verzögerte Überlastrelais und der Überlastschutz bei den meisten Leistungsschaltern arbeiten mit Bimetallstreifen und allenfalls Heizwicklungen, die vom Motorstrom erwärmt werden. Gemäss **Bild 6.4.1** wird durch die Bimetalle ein Hilfsschalter betätigt, der den Spulenkreis des Motorschützes unterbricht. Bei den Leistungsschaltern wird ein Schaltschloss ausgeklinkt, das die Abschaltung herbeiführt. Bei der Beheizung unterscheidet man gemäss **Bild 6.4.2**:

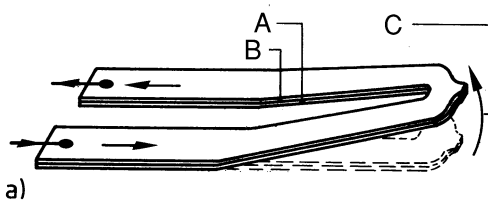
- *Direktbeheizung*: Der Heizstrom von etwa 20...70 A fliesst direkt durch das Bimetallpaket. Kleinere Ströme sind nicht möglich, da ihre Wärmeleistung ( $P_v = I^2 R$ ) nicht zur Auslenkung reicht. Je nach Grösse des Auslösestromes sind die Lamellen serie oder parallel geschaltet.
- *Indirekte Beheizung*: Es wird nicht das Bimetall selber, sondern eine Heizwicklung aus Widerstandsdraht vom Strom durchflossen. Sie sind für Ströme von etwa 0.1...20 A geeignet.



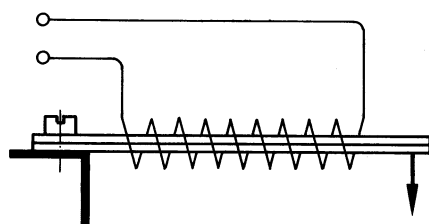
- A Indirekt beheizte Bimetalle
- B Auslöseschieber
- C Auslösehebel
- D Bewegter Kontakt
- E Kompensations-Bimetall

Bild 6.4.1 Funktionsprinzip eines dreipoligen thermisch verzögerten Thermorelais mit Temperaturkompensation. Gemäss IEC wirkt die Temperaturkompensation zwischen  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ... $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

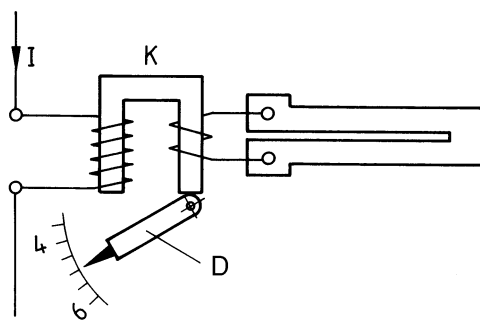
- *Transformatorische Beheizung*: Der Motorstrom ( $> 60\text{ A}$ ) durchfließt die Primärwicklung eines Transformators. An der Sekundärseite ist die Heizwicklung des Bimetallrelais angeschlossen. Im Kurzschlussfall ist praktisch ein absoluter Schutz des Bimetallrelais vorhanden.



a)



b)



c)

- A Legierung mit grosser Ausdehnung
- B Legierung mit kleiner Ausdehnung
- C durch Erwärmung verursachte Ausbiegung
- D Anker

Bild 6.4.2 Möglichkeiten der beheizten Bimetalle.

- a Direkte Beheizung
- b Indirekte Beheizung
- c Transformatorische Beheizung (Wandlerrelais)

Thermorelais sind meist temperaturkompensiert. Ein zusätzliches Kompensationsbimetall im Kraftübertragungsweg vom Strom-Bimetall zum Auslösekontakt bewirkt, dass sich die Auslösecharakteristik des Relais durch die Umgebungstemperatur, gemäss IEC zwischen  $-5...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nicht zum Nachteil des Schutzobjektes verändert. Weil die zulässige Belastung der Motoren mit steigender Kühlmitteltemperatur abnimmt, werden die Relais oft, der Sicherheit halber, leicht unterkompensiert.

Während des Anlaufs mit anschliessender konstanter Belastung, schützt das Thermorelais den Motor einwandfrei. Hingegen ist der Motorschutz bei Aussetzbetrieb mit hoher Schalthäufigkeit und bei wechselnder Belastung nur ungenügend gewährleistet, da das Thermorelais das thermische Verhalten des Motors nur angenähert nachbilden kann. Bei häufigen Anläufen im intermittierenden Betrieb, bewirkt die gegenüber dem Motor wesentlich kürzere Zeitkonstante des Bimetalls, eine vorzeitige Auslösung. Folglich kann die thermische Kapazität des Motors nicht voll genutzt werden. Zusätzlich ist die Abkühlzeitkonstante des Thermorelais kürzer, so dass im intermittierenden Betrieb der Unterschied zwischen der Motortemperatur und der Simulation durch das Thermorelais immer grösser wird. **Bild 6.3.1.**

### 6.3.2 Kurzschlussfestigkeit

Aus thermischen Gründen ist die Kurzschlussfestigkeit direkt beheizter Thermorelais grösser als die der indirekt beheizten. Bei hohen Bemessungsströmen betreibt man deshalb die Thermorelais über Stromwandler. Sie sind bis zu den höchsten Strömen kurzschlussfest. Bezüglich des am Thermorelais eingestellten Stromes  $I_{eF}$  gelten etwa die folgenden Kurzschlussfestigkeiten:

- Indirekt beheizte Thermorelais bis  $16 I_{eF}$  max
- Direkt beheizte Thermorelais bis  $30 I_{eF}$  max
- Stromwandler-Thermorelais bis  $50 I_{eF}$  max

### 6.3.3 Einphasiger Betrieb

Die für die Auslösung des Schaltmechanismus erforderliche Kraft kann nur von drei Bimetallstreifen gemeinsam aufgebracht werden. Die drei Bimetallrelais sind deshalb gemäss **Bild 6.6.1** in Serie zu schalten, damit sie auch bei einphasigem Betrieb vom Strom durchflossen werden.

### 6.3.4 Phasenausfall

Motoren in Sternschaltung sind beim Ausfall einer Phase thermisch nicht gefährdet. Bei Motoren in Dreieckschaltung ist zu unterscheiden:

- *Bemessungsleistung  $P_e \leq 10\text{ KW}$* : Der einphasige Auslösestrom der Thermorelais soll  $\leq 1.25 I_e$  betragen

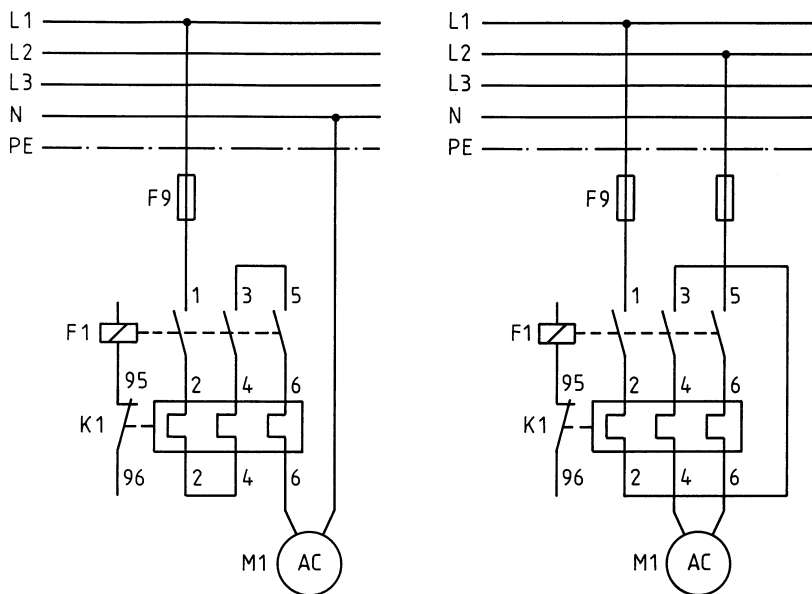
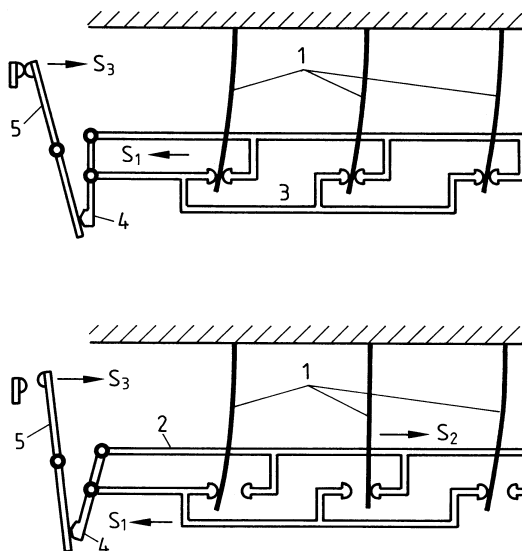


Bild 6.6.1 Serieschaltung der Thermorelais-Bimetalle bei einphasigem Betrieb.

- Bemessungsleistung  $P_e \geq 10 \text{ KW}$ : Die Motorschutzgeräte sollen mit einer Differentialauslösung versehen sein.

Verschiedene Industrien verlangen in ihren Betriebsmittelvorschriften die Differentialauslösung, so zum Beispiel Chemie, Petrochemie, Gas.



Auslösung bei dreiphasiger Überlast

Auslösung bei Ausfall einer Phase mit unbeheiztem, mittlerem Bimetall

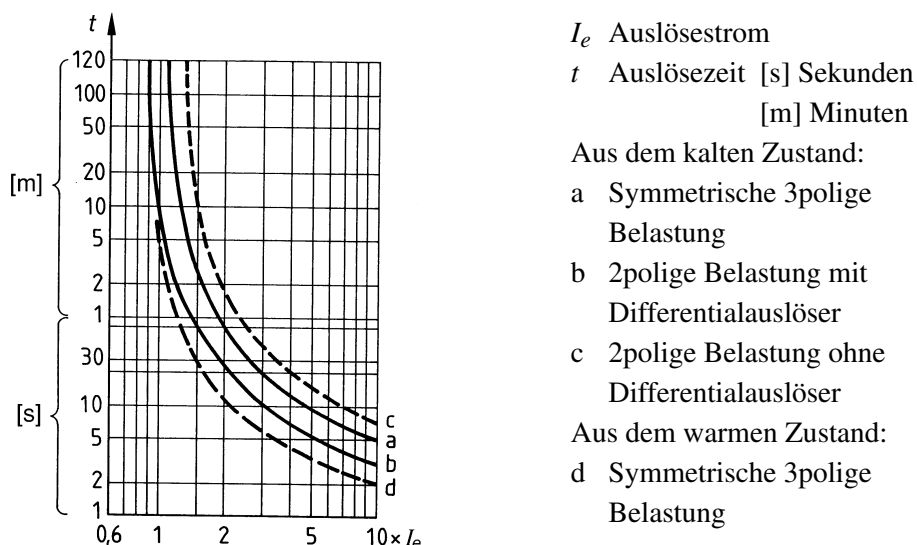
Bild 6.6.2 Prinzip der Differentialauslösung bei Thermorelais.

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1 Bimetallschieber                      | 4 Differenzhebel                   |
| 2 Ausfallschieber                       | 5 Auslösekontakt (Sprungkontakt)   |
| 3 Überlastschieber                      | $S_1$ Auslösebewegung bei Überlast |
| $S_2$ Auslösebewegung bei Phasenausfall |                                    |
| $S_3$ Öffnen des Auslösekontaktes       |                                    |

Basis der Differentialauslösung ist gemäss **Bild 6.6.2** eine Doppelschieber-Anordnung in Form eines Ausfallschiebers und eines Überlastschiebers. Bei Phasenausfall bewegt das stromlose, sich abkühlende Bimetall den Ausfallschieber gegenläufig zum Überlastschieber. Über einen Differentialhebel wird diese gegenläufige Bewegung in eine zusätzliche Auslösebewegung umgewandelt.

Bei Phasenausfall bewirkt diese Doppelschieber-Einrichtung bereits bei 85% des dreiphasigen Auslösestromes eine Auslösung. Diese Angabe bezieht sich auf den Strom, der im Thermorelais fließt. Bei Dreieckschaltung der Motoren und bei Phasenausfall sind die Ströme im Thermorelais und in den Motorwicklungen nicht gleich gross. Auch die Stromverteilung im Motor selbst ist nicht konstant, sondern abhängig von der Belastung.

**Bild 6.7.1** zeigt die typische Auslösekennlinie eines Thermorelais mit und ohne Differentialauslöser für den kalten, bzw. warmen Zustand.



*Bild 6.7.1 Typische Auslösekennlinie eines Thermorelais.*

### 6.3.5 Wiederbereitschaftszeit

Thermorelais benötigen nach einer Auslösung eine bestimmte Zeit, damit sich die Bimetallstreifen wieder abkühlen können. Diese Zeitspanne bezeichnet man als Wiederbereitschaftszeit. Erst danach lassen sie sich wieder zurücksetzen.

Die Wiederbereitschaftszeit ist abhängig von der Auslösekennlinie des Thermorelais und von der Höhe des Stromes, der zur Auslösung führt. **Bild 6.8.1** gibt Richtwerte für die Wiederbereitschaftszeit von Thermorelais an. Daraus lässt sich entnehmen, dass zum Beispiel nach einer Auslösung beim 4fachen Einstellstrom, die Wiederbereitschaftszeit etwa 35 s beträgt.

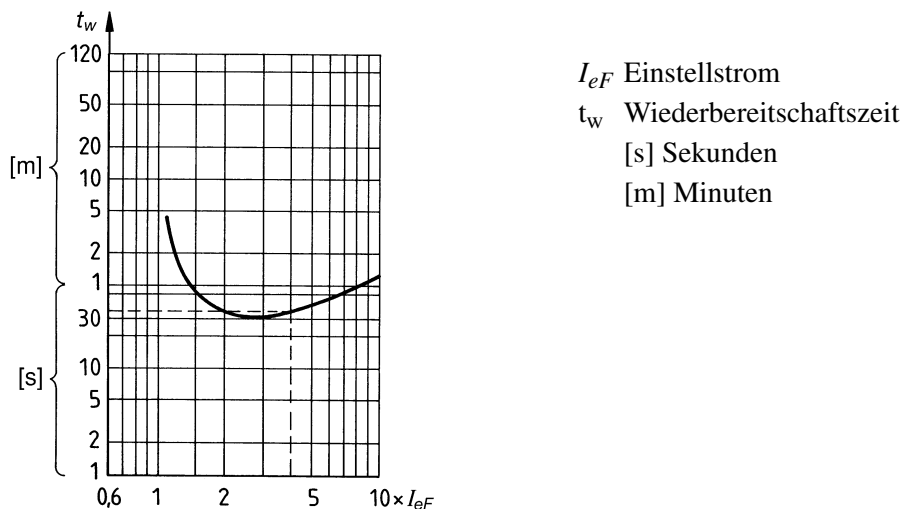


Bild 6.8.1 Richtwerte für die Wiederbereitschaftszeit von Thermorelais.

Die Wiederbereitschaftszeit dient auch dazu, dem Motor während dieser Betriebspause die Abkühlung zu ermöglichen. Diese Zeit ist aber meist nicht ausreichend, um eine erneute Einschaltung zuzulassen.

### 6.3.6 Stromeinstellung

In der Regel ist das Thermorelais auf den Bemessungsstrom  $I_e$  einzustellen. Auf den meisten Schutzgeräten ist auf dem Skalenschild ein Strombereich für Direktanlauf und ein zweiter Bereich für Stern-Dreieck-Anlauf angegeben. In letzterem ist der Faktor  $1/\sqrt{3}$  bereits berücksichtigt.

Ist die Kühlmitteltemperatur über  $40\text{ °C}$ , so ist die Leistung des Motors zu reduzieren und die Stromeinstellung am Thermorelais anzupassen. Gibt der Motorenhersteller keine anderen Angaben vor, so gilt **Tabelle 6.8.1**.

Kühlmitteltemperatur $\text{°C}$	30	35	40	45	50	55	60
Korrekturfaktor $\cdot I_e$	1.08	1.04	1	0.95	0.9	0.85	0.8

Tab. 6.8.1 Richtwerte für die Korrekturfaktoren für die Stromeinstellung am Thermorelais bei abweichender Kühlmitteltemperatur des Motors.

Bei Aufstellhöhen über  $1000\text{ m}\ddot{u}\text{M}$  verkleinern sich die zulässigen Motorbelastungen und damit auch die Einstellungen am Thermorelais. Gibt der Motorenhersteller keine anderen Angaben vor, so gilt **Tabelle 6.9.1**. Treten abweichende Kühlmitteltemperaturen und gleichzeitig Montage in grösseren Höhen auf, so ist bei der Stromeinstellung am Thermorelais das Produkt der beiden Faktoren zu berücksichtigen.

Aufstellhöhe m. ü. M.	Faktor für die Korrektur der Bemessungsleistung
≤ 1000	1.00
≥ 1500	0.97
2000	0.94
2500	0.90
3000	0.86
3500	0.82

Tab. 6.9.1 Richtwerte für die Korrektur der Bemessungsleistung bei abweichender Aufstellhöhe.

### 6.3.7 Freiauslösung

Die Freiauslösung wird von IEC und verschiedenen nationalen Vorschriften verlangt. Die Auslösung muss auch dann funktionieren, wenn gleichzeitig die Rückstell- bzw. die 0-Taste gedrückt wird. Der Auslösemechanismus wird dann durch nochmaliges Drücken der Rückstelltaste zurückgestellt.

Der Auslösemechanismus funktioniert bei vielen Thermorelais auch bei automatischer Rückstellung bei blockierter Rückstelltase. Wiedereinschalten ist erst nach erneutem Betätigen der Rückstelltaste möglich.

### 6.4 Motorschutz bei Schweranlauf

Der Anzugstrom  $I_A \approx 4 \dots 8 I_e$  eines Motors ist nicht von der Belastung, sondern von dessen Konstruktion abhängig. Hingegen ist die Anlaufzeit  $t_A$  von der Belastung abhängig. Gemäss **Bild 6.9.1** spricht man von Schweranlauf, wenn die Anlaufzeit abhängig vom Anzugsstrom einige Sekunden beträgt. Ein Standard-Thermorelais ist hier thermisch überfordert und löst meist aus.

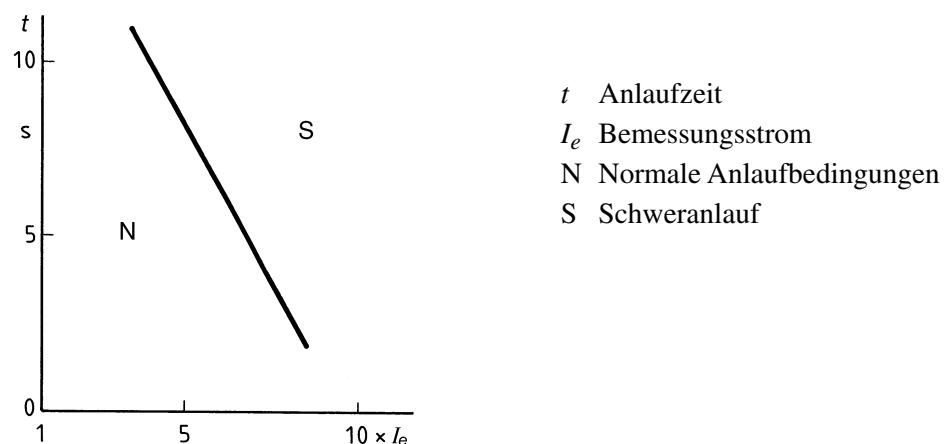


Bild 6.9.1 Bei Schweranlauf beträgt die Anlaufzeit in Funktion des Anlaufstromes einige Sekunden.

Für diese Fälle können elektronische Motorschutzgeräte genau an den Schweranlauf des Motors angepasst werden (**Kapitel 6.6**). Behelfsmässige Schaltungen mit Thermorelais, wie Sättigungswandler, Überbrücken des Schutzrelais während des Anlaufs und separate Thermorelais für den Anlauf, sind daher nicht mehr nötig.

## 6.5 Motorschutz in explosionsgefährdeten Räumen

Die Thermorelais für den Schutz von EEx e - Motoren müssen den Normen und Vorschriften gemäss **Kapitel 3.4** entsprechen. Die Thermorelais selber sind nicht explosionsgeschützt und dürfen deshalb nicht in der gefährdeten Zone installiert werden.

In Ländern mit allgemeiner Prüfpflicht dürfen Motorschutzgeräte zum Schutz von EEx e - Motoren eingesetzt werden, wenn die  $t_E$  - Zeit der Motoren den Mindestwerten entspricht oder länger ist. Wenn dies nicht zutrifft, ist die  $t_E$  - Zeit des Motors mit den Werten der Auslösekennlinie im kalten Zustand zu vergleichen. Entsprechen die Werte mindestens der Kennlinie oder sind höher, dann ist der Schutz gewährleistet.

Zusätzlich ist bei Motoren in Dreieckschaltung zu überprüfen, ob die Auslösezeit für zweipolige Auslösung beim 0.87-fachen von  $I_A/I_e \leq t_E$  ist.

Elektronische Motorschutzgeräte (**Kapitel 6.6**) erlauben die genaue Einstellung der  $t_E$  - Zeit. Bei einem Schweranlauf kann so die zulässige  $t_E$  - Zeit voll ausgenützt werden.

## 6.6 Elektronischer Motorschutz

Elektronische Motorschutzgeräte bieten die Möglichkeit, die thermischen Verhältnisse im Motor für jede Betriebsart wesentlich genauer abzubilden, als dies zum Beispiel bei den Thermorelais auf der Basis von Bimetallen der Fall ist. Zugleich erweitern die so gewonnenen Informationen den Einsatzbereich des Schutzgerätes.

Wesentliche Eigenschaften elektronischer Motorschutzgeräte sind:

- Genaue Stromeinstellung
- Verbesserter Schutz bei unterschiedlichen Anlauf- und Betriebsbedingungen
- Erweiterte Schutz-, Kontroll-, Überwachungs- und Steuerfunktionen

## 6.6.1 Überlastschutz

### 6.6.1.1 Thermische Abbildungsmodelle

Im Prinzip spielt es bezüglich der Genauigkeit keine Rolle, ob die Geräte auf analoger oder digitaler Basis realisiert werden. Die mit Mikroprozessoren bestückten Geräte sind teilweise auch für die Kommunikation mit übergeordneten Steuersystemen geeignet und können zum Beispiel an Bussysteme angeschlossen werden. Je nach Anforderung verwendet man in der Praxis Geräte nach dem:

- *Einkörper-Modell*: Einfache elektronische Motorschutzgeräte simulieren die Motorerwärmung nur auf der Basis eines thermischen Einkörper-Modells. Ihre Erwärmungs- und Abkühlkennlinie ist etwa vergleichbar mit den Verhältnissen bei Thermorelais. Sie berücksichtigen nur die Wärmekapazität der Statorwicklung und kühlen deshalb bei Motorstillstand zu schnell ab, weil das Eisen nicht berücksichtigt wird. Bei wechselnder Belastung und bei Aussetzbetrieb muss daher der Motor zusätzlich mit Thermofühlern geschützt werden.
- *Zweikörper-Modell*: Komplexe elektronische Motorschutzgeräte bilden die Motorerwärmung auf der Basis eines thermischen Zweikörper-Modells nach. Die Simulation basiert auf der Berücksichtigung der Erwärmung der Statorwicklung und der Eisenmasse des Motors. Dadurch wird z.B. die rasche Erwärmung der Wicklung während eines Schweranlaufs ebenso richtig nachgebildet, wie die nachfolgende Wärmeabgabe der Motorwicklung an das Eisen, welches sich wesentlich langsamer erwärmt. Während dem Lauf werden die Eisenverluste, sowie durch die Asymmetrie verursachte Verluste zusätzlich in das Simulationsmodell eingespielen. Die Berücksichtigung der Umgebungstemperatur des Motors, erhöht die maximale Ausnutzung der Anlage auch bei grossen Temperaturschwankungen. Die unterschiedlichen Kühlverhältnisse eines eigenbelüfteten Motors bei Lauf und Stillstand, werden durch zwei verschiedene Zeitkonstanten berücksichtigt. Nach dem Abschalten wird die rasche Abkühlung der Wicklung auf Eisentemperatur und die nachfolgende langsame Abkühlung des Motors als Ganzes nachgebildet.

Somit entspricht das thermische Abbild des elektronischen Motorschutzgerätes jederzeit den Verhältnissen des Motors. Dies ermöglicht die maximale Ausnutzung einer Anlage und gewährleistet einen sicheren Schutz des Motors auch bei schwierigen Anlauf- und Betriebsbedingungen.

Die Zwei-Körper- Simulation kann anhand eines Kapazitäts-Widerstandnetzwerkes gemäss **Bild 6.12.1** erklärt werden.

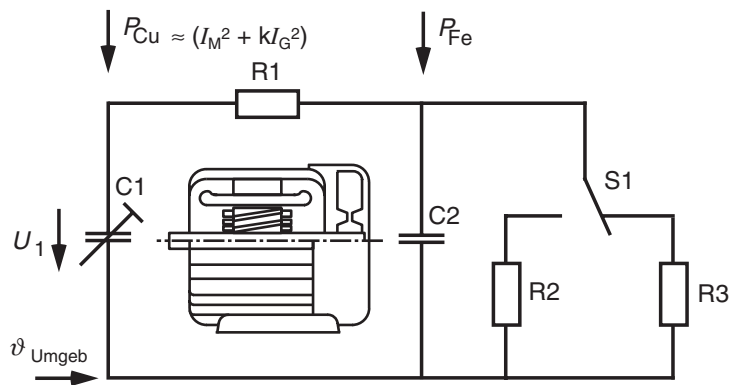


Bild 6.12.1 2-Körperabbild zur Simulation der Motorerwärmung.

- C1 Kapazität entsprechend der Wärmekapazität der Wicklung (einstellbar)
- C2 Kapazität entsprechend der Wärmekapazität des Eisens und der übrigen Maschinenmassen
- R1 Widerstand entsprechend Wärmeübergangswiderstand zwischen Wicklung und Eisen
- R2 Widerstand entsprechend Wärmeabfluss an die Umgebung im Stillstand
- R3 Widerstand entsprechend Wärmeabfluss an die Umgebung im Lauf
- $P_{Cu}$  Einspeisung eines Stromes proportional den Kupferverlusten
- $P_{Fe}$  Einspeisung eines Stromes proportional den Eisenverlusten
- S1 Umschaltung Stillstand / Lauf
- $I_M$  Motorstrom
- $I_G$  Durch Asymmetrie verursachte Gegenkomponente
- $\vartheta_{Umgeb}$  Berücksichtigung der Umgebungs-/Kühlmediumtemperatur mit Pt 100-Fühler.

### 6.6.1.2 Stromeinstellung

Mit der Einhaltung der zulässigen Dauerbetriebstemperatur des Motors wird die Lebensdauer der Isolation sichergestellt. Die richtige Einstellung des Stromes ist daher sehr wichtig. Bei einer zu hohen Stromeinstellung wäre der Schutz der Maschine nicht gewährleistet. Bei der Einstellung sind auch allfällige von den Normalbedingungen abweichende Faktoren wie z.B. zu hohe Kühlmitteltemperatur **Tabelle 6.8.1** oder Aufstellung des Motors über 1000 müM zu berücksichtigen. **Tabelle 6.9.1**.

Bei modernen elektronischen Motorschutzgeräten wird der Bemessungsstrom direkt digital in Ampere eingestellt.

Falls Primärstromwandler vorgeschaltet sind, ist auch deren Übersetzungsverhältnis zu berücksichtigen.

Wird am Motorschutzgerät anstelle des Bemessungsstroms der benötigte niedrigere Betriebsstrom eingestellt, so ist die betriebene Anlage ebenfalls geschützt. Eine erhöhte Belastung, z.B. durch mechanische Schäden, wird erfasst und die Anlage kann abgeschaltet werden, solange der Schaden klein ist.

### 6.6.1.3 Auslösezeit-Einstellung

Durch die Einstellung der Auslösezeit wird die Auslösecharakteristik der elektronischen Motorschutzgeräte der thermischen Kapazität des Motors angepasst. Die optimale Einstellung der Auslösezeit ist möglich, wenn die zulässige Blockierzeit des Motors aus dem kalten Zustand und der dazugehörige Blockierstrom bekannt sind. **Bild 6.13.1** Beide Größen kann der Motorenhersteller angeben.

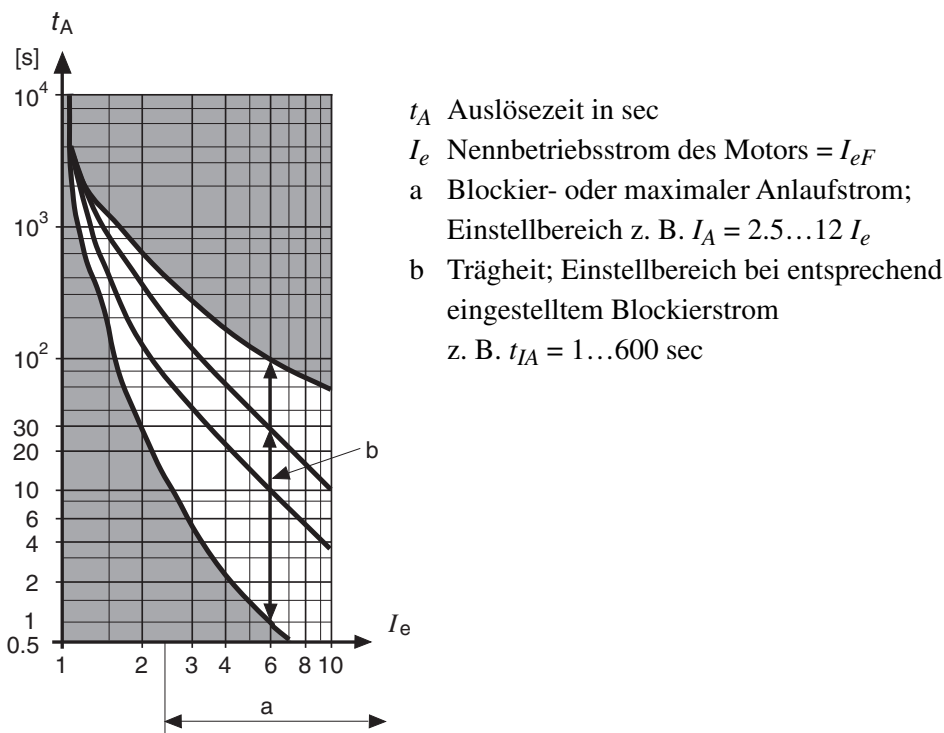


Bild 6.13.1 Zeit-/Stromkennlinie eines elektronischen Motorschutzgerätes (vom kalten Zustand aus).

Oft ist die zulässige Blockierzeit nicht bekannt. Wenn der Motor aber für die betreffende Anwendung richtig dimensioniert ist, sind die folgenden Auslösezeiten sinnvoll:

- *Standardmotoren:* Die Normaleinsellung ist 10 s
- *Spezialmotoren, z.B. thermisch flinke Antriebe:* Man beginnt mit einem Anlaufversuch mit der Einstellung 2 s. Löst das Motorschutzgerät aus, lässt man den Motor abkühlen und startet erneut mit der Einstellung 4 s und erhöht so die Auslösezeit, bis der Anlauf gelingt.

## 6.6.2 Spezielle Motorschutzfunktionen

### 6.6.2.1 Phasenausfall

Elektronische Motorschutzgeräte erkennen den Ausfall einer Phase unabhängig von der Belastung und können sofort reagieren.

Man verwendet unterschiedliche Lösungen:

- *Differentialauslösung*: Die Auslösekennlinie wird ähnlich wie beim Thermorelais mit einer elektronischen Differentialauslösung verschoben. Falls der Motor nicht voll belastet ist, kann er weiter betrieben werden.
- *Schnelle Abschaltung*: Dies verhindert eine unnötige, weitere Erwärmung des Motors und schont die Lager des Motors und der Anlage. Die Auslösung wird oft kurze Zeit verzögert, um bei einphasigen Kurzunterbrechungen im speisenden Netz eine unnötige Abschaltung zu verhindern.

### 6.6.2.2 Asymmetrie

Asymmetrische Phasenspannungen entstehen meistens durch lange Netzleitungen. Die resultierende Stromasymmetrie in den Motorwicklungen beträgt je nach Bauart des Motors, das 6...10-fache der Spannungsasymmetrie.

Mittelspannungs- und grosse Niederspannungsmotoren sind rasch thermisch gefährdet. (rotorkritische Motoren) Die Belastung ist daher gemäss **Bild 2.9.1** zu reduzieren wenn eine Überhitzung des Motors verhindert werden soll. Einige elektronische Motorschutzgeräte erfassen die Asymmetrie und korrigieren die Auslöseschwelle nach unten. In der Praxis ist es allerdings nicht immer möglich, die Belastung des Motors zu reduzieren. Das Schutzgerät kann aber ein Warnsignal geben.

Bei asymmetrischer Speisung ist meist nicht nur ein einzelner Motor, sondern die gesamte Anlage betroffen. Es ist daher sinnvoll, die Netzspannung zentral zu überwachen. In Anlagen in einem "schlechten" Netz mit regelmässig unsymmetrischen Netzspannung, sind die Motoren allenfalls entsprechend zu dimensionieren, um die Lebensdauer nicht negativ zu beeinflussen.

Höhere Asymmetrien oder der Ausfall einer Phase können durch defekte Kontakte von Leistungsschaltern und Schütze, Anschlussklemmen, ausgefallene Sicherungen sowie durch Fehler im Motor verursacht werden. Durch das rasche Erkennen und Abschalten werden Überhitzungsschäden an diesen Geräten verhindert. Anlage und Motorlager werden geschont.

Definition der Spannungsasymmetrie gemäss NEMA und IEC:

$$\Delta U (\%) = \frac{\text{Maximale Abweichung vom Durchschnitt der Phasenspannungen} \times 100}{\text{Durchschnitt der Phasenspannungen}}$$

### 6.6.2.3 Erdschluss

Isolationsschäden an Motoren werden oft von hohen Spannungsstössen verursacht. Die Quellen sind Blitzeinschläge, Netzumschaltungen, Kondensatorentladungen und Geräte der Leistungselektronik. Weitere Ursachen sind Alterung und dauernde oder zyklische Überlastung sowie mechanische Schwingungen und eingedrungene Fremdkörper. Die meisten Isolationsschäden führen zu Schlüssen gegen geerdete Teile der Maschine. In geerdeten Netzen können die Erdströme schnell sehr hohe Werte erreichen. Je nach Netzart und Anforderung erfolgt die Erdschlussüberwachung entweder nach der „Holmgreen“-Methode oder mit einem Summenstromwandler.

#### Erdschluss nach der „Holmgreen“- Methode (Starr geerdete Netze)

Um in starr oder niederohmig geerdeten Netzen einen Erdschlussstrom zu erkennen, werden normalerweise die drei Polleiter gemessen. Beim gesunden Motor ist die Summe dieser Ströme null. Fließt jedoch ein Strom zum Motorgehäuse und damit zur Erde ab, entsteht zum Wandlersternpunkt ein diesem Erdstrom proportionaler Nullstrom  $I_0$ , der vom Erdschlussdetektor erfasst wird und eine Auslösung bewirkt. Eine kurze Verzögerung vermeidet Fehlauflösungen durch transiente Wandlersättigung, welche bei Schaltvorgängen auftreten kann. Die Empfindlichkeit ist so zu wählen, dass weder Übertragungsfehler der Wandler, noch Störsignale in Stern-Dreieck-Schaltungen durch die 3. Oberschwingung zu Fehlauflösungen führen können. Bild 6.15.1

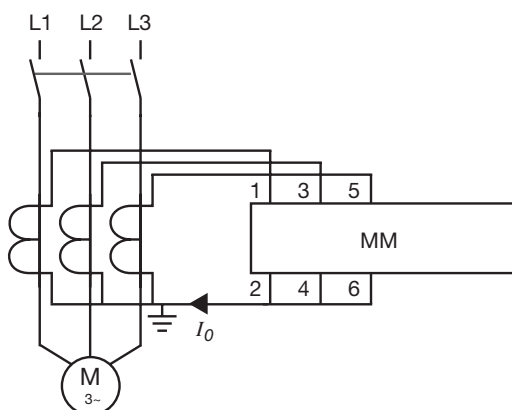
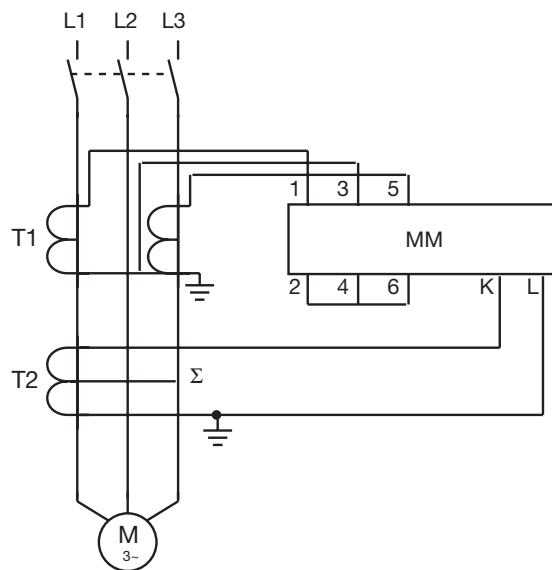


Bild 6.15.1 Erdschluss-Schutz nach der «Holmgreen»-Methode.

- T1 Hauptstromwandler
- MM Motorschutzgerät
- $I_0$  Nullstrom (proportional zum Erdstrom)

## Erdschluss mit Summenstromwandler

In isolierten, hochohmig geerdeten oder kompensierten Netzen, wird die erforderliche hohe Empfindlichkeit durch die Verwendung eines Summenstromwandlers erreicht, der alle drei zum Motor führenden Leiter mit seinem Kern umfasst. Nach dem Prinzip des Fehlerstrom-Schutzschalters ist ein empfindlicher Schutz gegen Erdschluss möglich. Bei einer niedrigen Ansprechschwelle löst schon ein kleiner Isolationschaden frühzeitig eine Warnung oder Abschaltung aus. **Bild 6.16.1.**



*Bild 6.16.1 Erdschluss-Schutz mit Summenstromwandler.*

- T1 Hauptstromwandler (Stromerfassung 2phasig)
- T2 Summenstromwandler
- MM Motorschutzgerät

## Anwendungen

- Mittelspannungsmotoren
- Anlagen in schwieriger Umgebung wie Feuchte, Staub, u.s.w. z.B. Minen, Kieswerke, Zementwerke, Mühlen, Holzbearbeitung, Wasserpumpwerke, Abwasseraufbereitung, Drainage

## Erdschluss-Schutz in Mittelspannungsnetzen

Nachfolgend wird ohne Anspruch auf Vollständigkeit und ohne Berücksichtigung der transienten Effekte, ein Überblick über die Verhältnisse bei Erdschluss in isolierten, hochohmig geerdeten oder kompensierten Netzen gegeben.

Bei Netzen der genannten Sternpunkt-Erdungsarten wird die Grösse des Erdschluss-Fehlerstromes durch die Erdkapazität des Netzes und des Erdungswiderstandes beziehungsweise der Kompensationsdrossel bestimmt. Es ist typisch für Industrienetze mit ihrer relativ geringen Ausdehnung, dass die Erdschlussströme sehr klein sind. Die Erdkapazitäten werden im wesentlichen durch die Kabel und die Motoren bestimmt.

Die Kapazitätswerte von Kabeln finden sich in Kabeltabellen und sind in der Grössenordnung von 0.2...1.2  $\mu\text{F}$  pro Kilometer Länge. Für Mittelspannungsmotoren kann mit ca. 0.02...0.05  $\mu\text{F}$  pro Megawatt Motorleistung gerechnet werden.

Als Faustregel für industrielle Mittelspannungsnetze gilt auch, dass pro 1000...1500 KVA Systemleistung mit etwa 1 A kapazitivem Erdstrom gerechnet werden kann. Für das gesamte zu überwachende Netz wird meist eine Sternpunktüberwachung durch Messen der Verlagerungsspannung durchgeführt.

Mittels Erdschlussdetektor in den Motorzweigen, wird der Erdschluss lokalisiert. Vielfach kann der Betrieb weitergeführt werden, da die auftretenden Erdströme verhältnismässig klein sind und die Isolation der gesunden Phasen kurzzeitig mit einer erhöhten Spannung betrieben werden darf.

### **Isolierte oder hochohmig geerdete Netze**

Bei symmetrischen Erdkapazitäten nimmt der Sternpunkt des ungestörten Netzes das Erdpotential an und die Summe der über die Erdkapazitäten abfliessenden Ströme ist Null. Auch der hochohmige Erdungswiderstand **Bild 6.19.2/6.20.1/6.20.3** ist bei Transformatoren mit Sternpunkt im Normalbetrieb stromlos. Er vermeidet extreme Überspannungen bei intermittierenden Erdfehlern, wie sie in isolierten Netzen auftreten können. Die Bemessung ist normalerweise so, dass der Widerstand bei einem Erdschluss einen Strom etwa in der Höhe des kapazitiven Ladestroms des Netzes führt.

Wird z.B. der Polleiter **Bild 6.19.1** und **Bild 6.19.3** wegen eines Erdschlusses mit Erde verbunden, so führen die beiden anderen Polleiter verkettete Spannung gegen Erde. Über ihre Erdkapazitäten  $C_N$  (netzseitig vom Schutzgerät MM aus gesehen) und  $C_M$  (motorseitig) fliesst ein kapazitiver Strom gegen Erde und über die Fehlerstelle zurück auf den Polleiter 3. Bei hochohmiger Erdung **Bild 6.19.2/6.20.1/6.20.3** treibt die Spannung des nun hoch liegenden Sternpunktes einen zusätzlichen Strom über die Fehlerstelle, begrenzt durch den Erdungswiderstand.

Bei Erdschluss netzseitig der Messstelle (Einbauort der Stromwandler) misst das Schutzgerät MM den über  $C_M$  fließenden Erdstromanteil. Die Ansprechempfindlichkeit muss so gewählt werden, dass das MM in diesem Fall nicht auslöst. Andererseits sollte das MM auftretende Erdschlüsse möglichst empfindlich erkennen, da bei Erdschlüssen in den Motorenwicklungen die Verlagerungsspannung um so kleiner wird, je näher die Fehlerstelle am Sternpunkt liegt. Proportional dazu sinkt der Fehlerstrom. Normalerweise wird die Ansprechschwelle nicht kleiner als 5...10 % des Stromes bei sattem Erdschluss an den Klemmen des Motors gewählt.

### **Kompensierte Netze**

Gelöschte Netze, Resonanzerdung, Petersen-Spule.

In den **Bildern** 6.19.2/6.20.1/6.20.3 sind auch die prinzipiellen Verhältnisse für kompensierte Industriernetze dargestellt, obwohl solche eher selten sind. Die Kompensationsspule liefert bei vollständiger Kompensation einen Strom in der Höhe des kapazitiven Fehlerstromes, aber umgekehrter Phasenlage, so dass über die Fehlerstelle nur der sehr kleine ohmsche Reststrom fließt.

### **Schematische Darstellung verschiedener Netzarten und Erdschlussorte**

Der vom elektronischen Motorschutzgerät MM mit einem Summenstromwandler gemessene Erdstrom hängt von der Netzart und vom Ort des Erdschlusses ab. Die nachstehenden Bilder zeigen die Verhältnisse in den verschiedenen Anwendungen.

### **Legende für nachstehende Bilder:**

K1	Schütz
MM	Motorschutzgerät
M1	Motor
$C_N$	Erdkapazität der Polleiter netzseitig
$C_M$	Erdkapazität des Motors inklusive Leitungen zwischen Stromwandler und Motor
L	Kompensationsspule
R	Hochohmiger Erdungswiderstand
T	Transformator
$I_E$	Erdschlussstrom



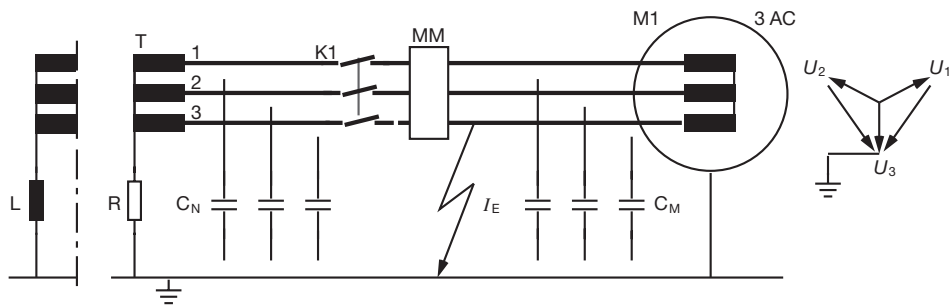


Bild 6.20.1 Hochohmig geerdetes Netz:

Erdschluss motorseitig auf den Zuleitungen. Das MM misst die Vektorsumme der Erdströme durch  $C_N$  und den Erdungswiderstand  $R$ .

Kompensiertes Netz:

Das MM misst die Vektorsumme der Erdströme durch  $C_N$  und die Kompensationsspule  $L$ .

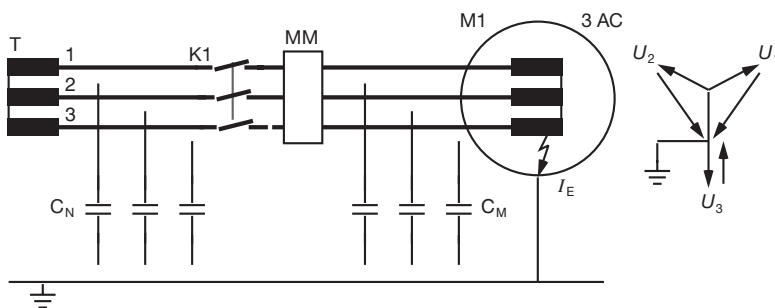


Bild 6.20.2 Isoliertes Netz:

Erdschluss im Motor. Je näher die Fehlerstelle beim Motorsternpunkt liegt, desto kleiner ist der Fehlerstrom.

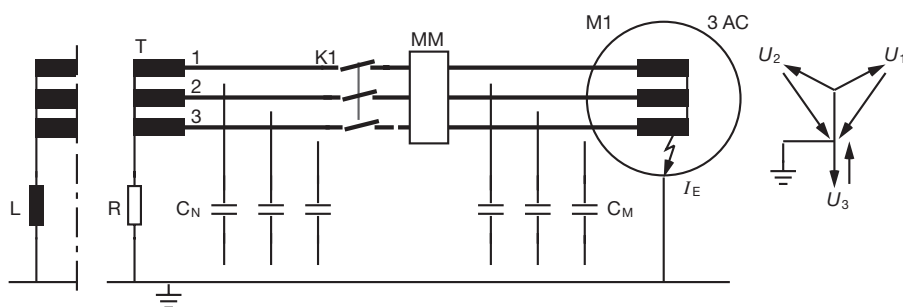


Bild 6.20.3 Hochohmig geerdetes Netz:

Erdschluss im Motor. Das MM misst die Vektorsumme der Erdströme  $C_N$  und den Erdungswiderstand  $R$ .

Kompensiertes Netz:

Das MM misst die Vektorsumme der Erdströme durch  $C_N$  und die Kompensationsspule  $L$ . Je näher die Fehlerquelle beim Motorsternpunkt liegt, desto kleiner ist der Fehlerstrom.

### 6.6.2.4 Kurzschluss-Schutz von Mittelspannungsmotoren

Hohe Phasenströme, verursacht durch Phasenschlüsse und Schlüsse von Phase zu Erde, werden erfasst. Über den vorgeschalteten Leistungsschalter kann die Speisung sofort unterbrochen werden.

Der Kurzschlusschutz ist normalerweise immer in Funktion. Der Auslösepegel muss deshalb etwas über dem maximalen Anlaufstrom eingestellt werden.

Die Auslösung muss um ca. 50 ms verzögert werden. Dies erlaubt einerseits die schnelle Ansteuerung des Leistungsschalters und verhindert andererseits ungewollte Abschaltungen durch Stromspitzen.

Bei Kurzschluss löst ein separates Ausgangsrelais unabhängig von den übrigen Schutzfunktionen aus. Damit wird ein Leistungsschalter mit genügendem Abschaltvermögen angesteuert.

Um zu verhindern, dass unter Kurzschlussbedingungen das Schütz ausgeschaltet und damit zerstört wird, muss bei Strömen  $> 12 I_e$  das Ausgangsrelais des thermischen Schutzes gesperrt werden. **Bilder** 6.21.1 und 6.22.1

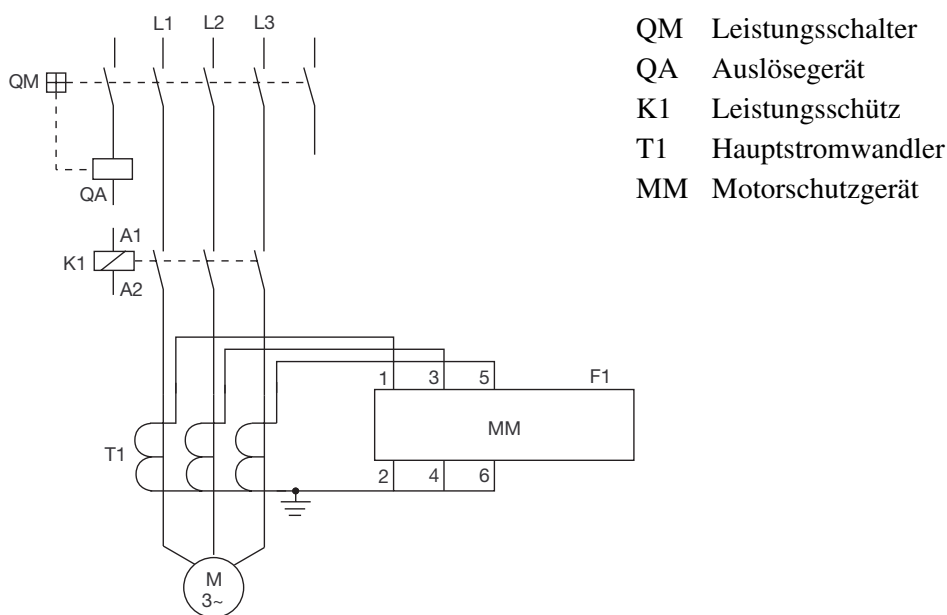


Bild 6.21.1 MM für Kurzschluss-Schutz.

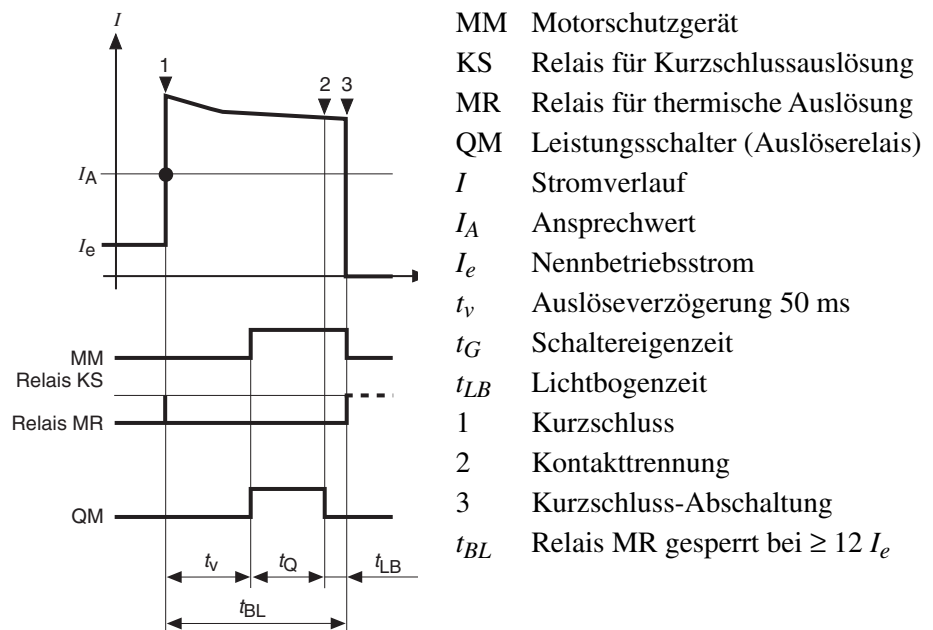


Bild 6.22.1 MM Kurzschluss-Abschaltdiagramm.

## 6.6.3 Anlagenschutzfunktionen

### 6.6.3.1 Hohe Überlast und Blockierung

Bei unzulässig hoher Überlast und bei Blockierung werden durch das sofortige Abschalten der Anlage unnötige mechanische und thermische Belastungen an Motor und Kraftübertragungselementen vermieden. Unfallfolgen und Produktionseinbußen werden damit reduziert. Eine sich langsam anbahnende Überbeanspruchung kann frühzeitig erfasst und gemeldet werden (z.B. Lager-schäden). Die Schutzfunktion wird nach erfolgtem Hochlauf des Motors bei Erreichen des Betriebsstromes freigegeben. **Bild 6.23.1.**

#### Anwendungen

- Transportanlagen
- Mühlen
- Mischer
- Brecher
- Sägen, u.s.w.

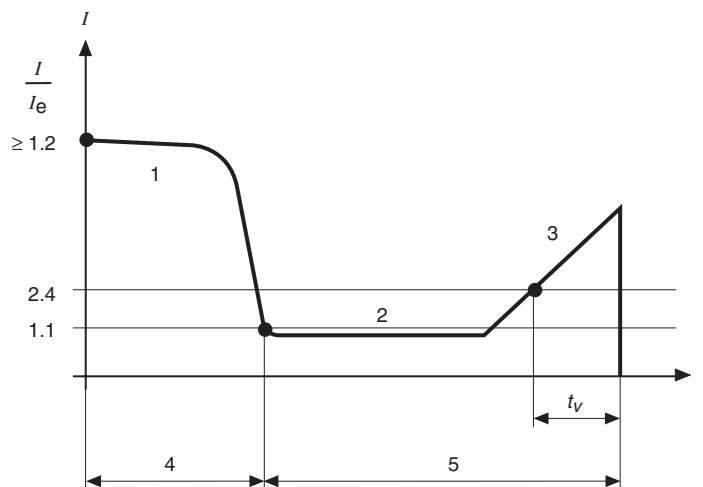


Bild 6.23.1 Funktion des Schutzes, hohe Überlast und Blockierung.

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1 Motorstart $I \geq 1.2 I_e$                      | $t_v$ Auslöseverzögerung     |
| 2 Bemessungsbetrieb                                | 4 Blockierschutz nicht aktiv |
| 3 Hohe Überlast oder Blockierung (Auslöseschwelle) | 5 Blockierschutz aktiv       |

### 6.6.3.2 Unterlast

Motoren, welche durch das Fördermedium selbst gekühlt werden (z.B. Unterwasserpumpen, Ventilatoren), können bei fehlender oder ungenügender Fördermenge (verstopfte Filter, geschlossene Schieber), trotz Unterbelastung überhitzt werden. Oft sind diese Maschinen an schlecht zugänglichen Orten eingesetzt. Die Folgen davon sind lange Reparaturzeiten und entsprechend hohe Kosten. Das Unterschreiten einer bestimmten Stromaufnahme kann auch auf einen mechanischen Fehler in der Anlage hinweisen (gerissene Transportbänder, schadhafte Ventilatorblätter, defekte Kupplungen, gebrochene Wellen oder abgenutzte Werkzeuge). Solche Zustände gefährden nicht den Motor, sondern führen zu Produktionsausfällen. Die rasche Früherkennung hilft die Schäden minimal zu halten.

Die Freigabe des Unterlastschutzes muss nach dem Start beliebig verzögert werden können, um eine Auslösung zu verhindern, solange z.B. ein Schieber oder Ventil geschlossen bleiben muss. **Bild 6.24.1**

#### Anwendungen

- Unterwasserpumpen
- Ventilatoren
- Transportanlagen
- Erfassen von Brüchen mechanischer Übertragungssysteme

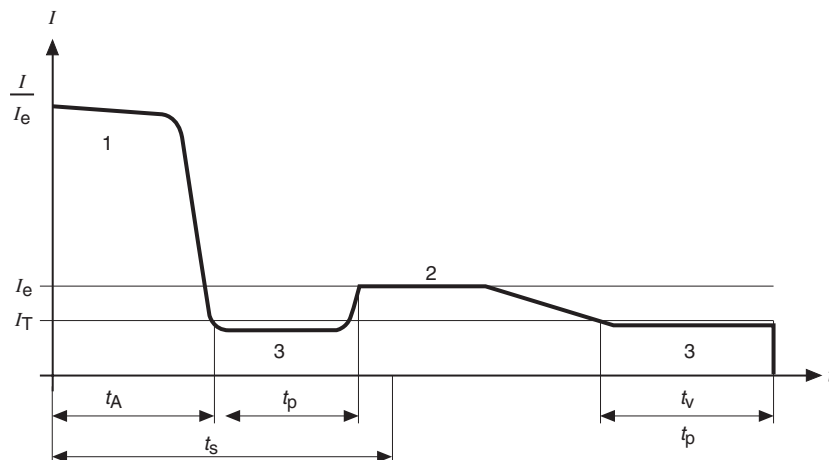


Bild 6.24.1 Funktion des Unterlastschutzes.

1 Start	$t_s$ Verzögerung Freigabe
2 Bemessungsbetrieb	Unterlastschutz-Auslösung
3 Betrieb mit Unterlast	nicht aktiv
$t_A$ Startzeit	$t_v$ Auslöseverzögerung
$I_T$ Auslöseschwelle	$t_p$ Warnung

### 6.6.3.3 Drehrichtungsschutz

Der Drehrichtungsschutz erfasst die Phasenreihenfolge im Drehstromnetz und löst aus, wenn sie nicht stimmt.

Man unterscheidet zwei verschiedene Methoden:

- *Ständige Überwachung:* Die anliegende Netzspannung wird laufend überwacht. Bei falscher Phasenfolge (Drehsinn im Drehstromnetz), wird das Einschalten des Motors verhindert.
- *Reaktion erst nach dem Start:* Das Schutzgerät reagiert erst, wenn der Motor gestartet ist und bereits ein messbarer Strom fließt. Eine trägheitsarme, schnell reagierende Anlage kann jedoch in der falschen Drehrichtung anlaufen und allenfalls beschädigt werden.

### 6.6.3.4 Anlaufzeit-Überwachung

Die Anlaufzeit wird überwacht. Ist der Anlauf innerhalb der vorgewählten Zeit nicht beendet, kann die Anlage abgeschaltet werden. Diese Überwachung ist unabhängig vom thermischen Zustand des Motors.

#### Anwendungen

- Anlagen bei denen eine erhöhte Belastung oder Blockierung des Antriebs schon während dem Anlauf erfasst werden muss, um grössere Schäden zu vermeiden. Mögliche Ursachen: Überladene Anlagen, defekte Lager oder Übertragungselemente. **Bild 6.25.1**

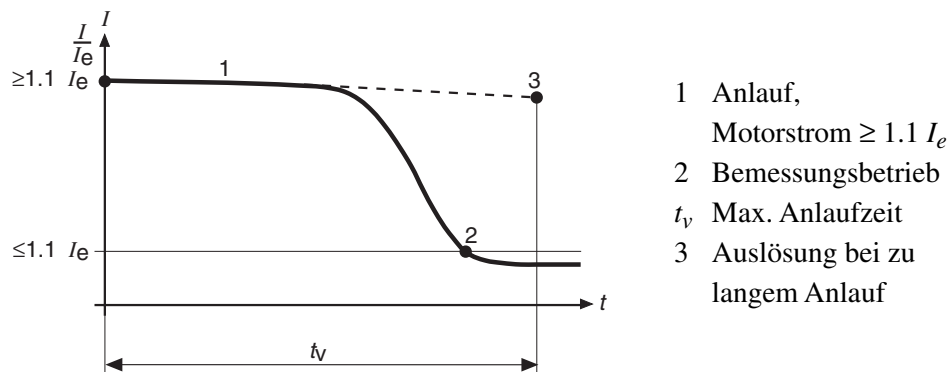


Bild 6.25.1 Anlaufzeit-Überwachung.

### 6.6.3.5 Blockierung während des Startes

Blockiert ein Antrieb während der Startphase, so erwärmt sich der Motor sehr schnell und erreicht nach Ablauf der zulässigen Blockierzeit die Grenztemperatur der Isolation. Grosse Niederspannungsmotoren und vor allem Mittelspannungsmotoren haben meist kurze zulässige Blockierzeiten, erlauben jedoch bedeutend längere Anläufe. Um den Anlauf zu gewährleisten, muss die Blockierzeit oft höher eingestellt werden. Mit einem externen Drehgeber oder Stillstandsmelder erkennt das Schutzgerät eine Blockierung während des Starts und schaltet den Motor sofort ab. Dadurch wird der Motor und die betriebene Anlage bei einer Blockierung keinem unnötigem Stress ausgesetzt. Während des Betriebs wird eine zu hohe Überlast oder Blockierung mit der Funktion „Hohe Überlast und Blockierung“ erfasst. **Bild 6.25.2.**

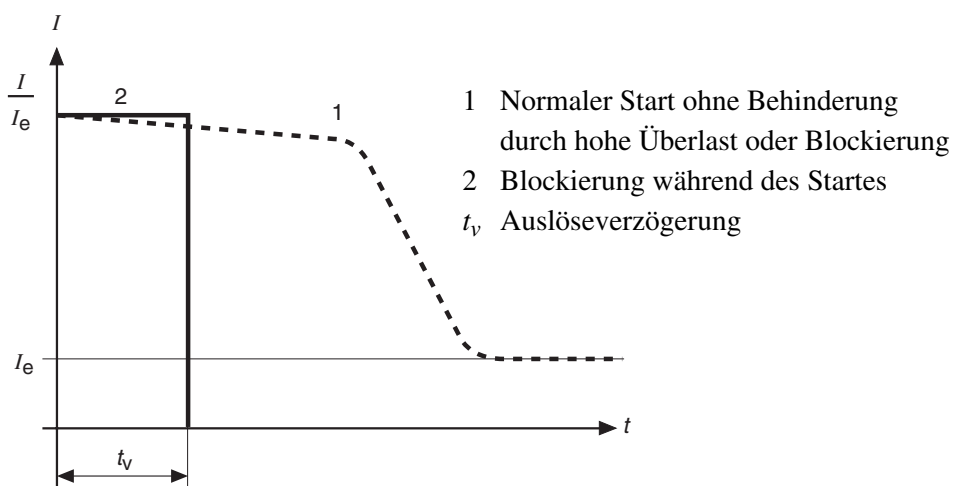


Bild 6.25.2 Blockierung während des Startes.

### Anwendungen

- Grosse Niederspannungsmotoren
- Mühlen
- Sägen
- Mittelspannungsmotoren
- Mischer
- Krane
- Transportanlagen
- Brecher
- Hebebühnen

## 6.6.4 Steuerfunktionen

Elektronische Motorschutzgeräte erfüllen neben den eigentlichen Schutzfunktionen auch Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben. Solche Geräte können in einem hierarchisch aufgebauten Steuerungssystem auch mit der Handsteuerung kombiniert oder in ein Netzwerk eingebettet werden.

Mit anspruchsvollen Motorschutzgeräten, welche die Temperatursimulation z.B. auf der Basis eines Zweikörpermodells realisieren, kann neben der Stromaufnahme des Motors auch dessen Wärmebelastung zur optimalen Ausnutzung und Steuerung eines Prozesses dienen.

### 6.6.4.1 Vorwarnung

Oft ist es nicht erwünscht, eine Anlage sofort abzuschalten, wenn eine von der Norm abweichende Situation eintritt. Eine Vorwarnung kann sinnvoll sein, um die Belastung zu senken, oder z.B. bei einem Erdschluss den Schaden erst beim nächsten Betriebsunterbruch zu beheben.

Man unterscheidet:

- *Stromabhängige Vorwarnung bei:*
  - Überlast unterhalb der Blockiergrenze
  - Unterlast
  - Asymmetrie
  - Erdschluss
- *Temperaturabhängige Vorwarnung*
  - Unterhalb der Grenztemperatur

### 6.6.4.2 Lastregelung

Bei Mühlen, Steinbrechern, oder Förderanlagen, kann die Belastung des Motors dosiert oder optimiert werden. Wenn das Motorschutzgerät die Motortemperatur genau nachbildet, so kann auch bei wechselnder Belastung, die Anlage auf die maximale Bemessungstemperatur geregelt werden. Dies erlaubt die optimale Ausnutzung der Anlage. Die Regelung kann „von Hand,“ basierend auf der Erwärmungsanzeige oder über eine zentrale Steuerung erfolgen.

### 6.6.4.3 Startverriegelung

Motoren, die auf Grund von Überhitzung abgeschaltet wurden, können erst wieder gestartet werden, nachdem der Motor genügend abgekühlt ist und die Auslösung am Schutzgerät zurückgestellt ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur bei genauer Nachbildung der Abkühlung der Motor beim folgenden Start nicht gefährdet ist.

Um nach einer betriebsbedingten Abschaltung den Wiederanlauf des noch warmen Motors zu gewährleisten, muss er zuerst abkühlen bis er genügend thermische Reserve aufweist. Die Schaltung gemäss **Bild 6.27.1** verhindert vorzeitige, erfolglose Startversuche und. zusätzlichen Stress des Motors.

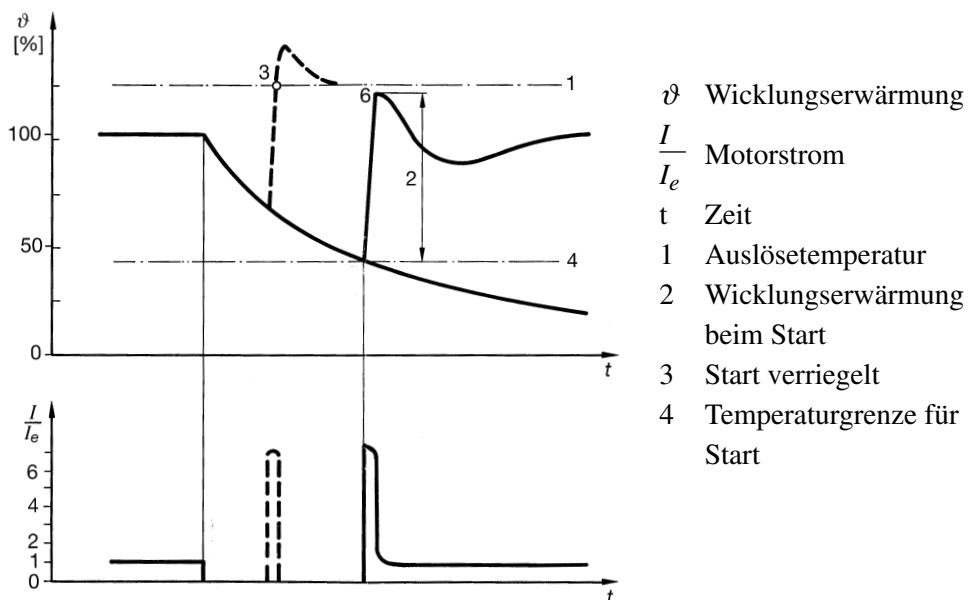


Bild 6.27.1

#### 6.6.4.4 Stern-Dreieck-Umschaltung

Da der Motorstrom laufend gemessen wird kann die Stern-Dreieck-Umschaltung, unabhängig von der Last, zeitlich optimal gesteuert werden.

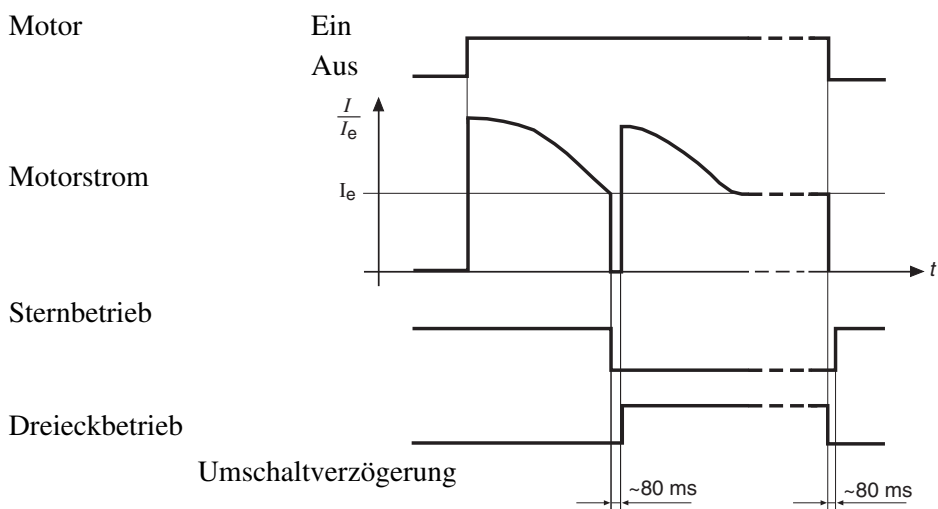


Bild 6.27.2 Stern-Dreieck-Anlaufdiagramm.

### 6.6.4.5 Warmstart

Die Wicklungen der Motoren dürfen kurzzeitig über die zulässige Grenztemperatur erwärmt werden. Dies gilt besonders für rotorkritische Motoren. Die kurzzeitig zulässige Temperatur des Rotors liegt mit ca. 250 °C wesentlich über seiner Dauerbetriebstemperatur von 100...150 °C. Daraus resultiert eine relativ lange zulässige Anlaufzeit des betriebswarmen Motors. Sie ist in der Regel nur wenig kürzer als beim Start des kalten Motors. Diese Eigenschaft der Motoren kann mit einem anspruchsvollen Motorschutzgerät ausgenutzt werden, ohne die korrekte Temperaturnachbildung zu beeinträchtigen. **Bild 6.28.1.**

Durch die zusätzliche „Begrenzung der Anzahl Starts“ können zu viele Warmstarts vermieden werden.

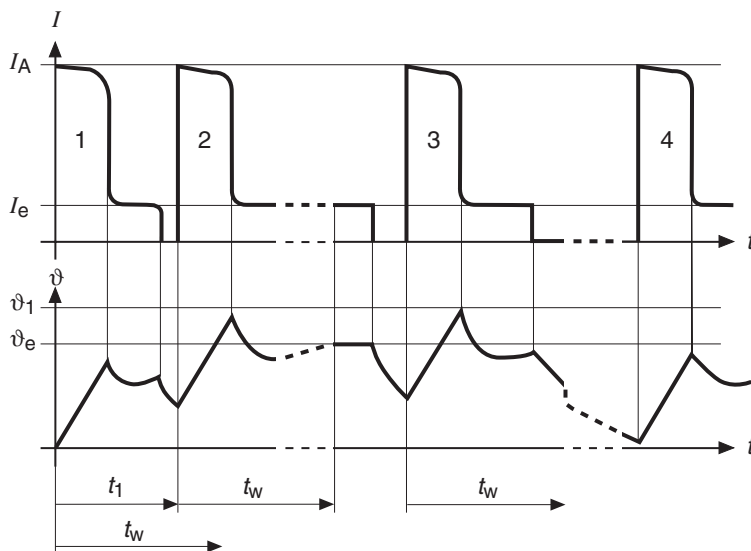


Bild 6.28.1 Strom- und Temperaturverlauf bei Kalt- und Warmstart von Motoren und Auslösegrenzen (z. B. CET 4/SMM 825).

$I_A$ Anlaufstrom	1 1. Start (Kaltstart)
$I_e$ Bemessungsstrom	2 1. Warmstart
$\vartheta_e$ Zulässige Dauerbetriebs-Temperatur des Motors und normale Auslösegrenze des Motorschutzgerätes für Dauerbetrieb	3 2. Warmstart
$\vartheta_1$ Kurzzeitig zulässige Motortemperatur und Auslösegrenze des Motorschutzgerätes mit modifizierter Auslösekennlinie für den Warmstart	4 Kaltstart (nachdem der Motor abgekühlt ist)
	$t_1$ Min. Zeit bis 1. Warmstart möglich ist ( $t_1 > 10 t_{\delta I_e}$ )
	$t_w$ Minimale Zeit zwischen 2 Warmstarts (4...60 min)

## **Anwendungen**

Alle Anlagen, die nach einem Spannungsunterbruch sofort wieder sicher anlaufen müssen.

- Chemische Prozesse und Produktionsanlagen, z.B.:
  - Mixer
  - Zentrifugen
  - Pumpen
  - Transportanlagen
- Bergwerke und Tunnels, z.B.:
  - Frischluftventilatoren
  - Personenaufzüge
  - Wasserpumpen
- Wasserversorgungen
- Drainage

### **6.6.4.6 Kommunikationsmöglichkeiten**

Moderne elektronische Motorschutzgeräte auf der Basis von Mikrorechnern erlauben die Aufbereitung, Speicherung und Bereitstellung aller relevanten Betriebs- und statistischen Daten wie z.B.:

- Ströme, Leistung
- Asymmetrie
- Erdstrom
- Erwärmung
- Leistungsreserven
- Zeit bis zur Auslösung
- Betriebsdauer
- Aussagen über den Zustand des Schütz und Motors
- Ursache und Zeitpunkt vorangegangener Warnungen und Auslösungen

Alle diese Daten lassen sich über Steuer- oder Netzwerkverbindungen der zentralen Steuerung und der Bedienungswarte übermitteln. Andererseits können über das Netzwerk die im Motorschutzgerät gespeicherten Betriebsparameter laufend den veränderten Prozessanforderungen angepasst werden. Modular konzipierte Motorschutzgeräte bieten den Anschluss für die wichtigsten Busprotokolle.

## **6.6.5 Anwendungen elektronischer Motorschutzgeräte**

### **6.6.5.1 Motoren mit geringer thermischer Trägheit**

Zu diesen Motoren zählen z.B. Unterwasserpumpen-Motoren, hermetisch geschlossene Kältekompressoren u.s.w., die mehrheitlich eine sehr wirksame Kühlung haben. Ihre zulässige Blockierzeit ist meist sehr kurz, weil die Wicklungen für eine hohe spezifische Belastung ausgelegt sind.

Für diese Antriebe ist eine Einstellung der Auslösezeit von 2...4s erforderlich. Besonders bei Unterwasserpumpen-Motoren ist der Unterlastschutz nützlich, denn bei fehlendem Fördermedium werden sie nicht mehr gekühlt und sind daher rasch thermisch gefährdet.

### **6.6.5.2 Motoren mit hoher thermischer Trägheit**

Sind grosse Schwungmassen mit langen Anlaufzeiten anzutreiben wie z.B. Ventilatoren, Zentrifugen, Mischanlagen u.s.w., setzt man oft Motoren mit überdimensionierten Wicklungen und Käfigen ein.

Für solche Antriebe sind elektronische Motorschutzgeräte besonders geeignet, denn diese sind in der Lage, die Anlaufferwärmung richtig nachzubilden. Für die korrekte Einstellung sind die zulässige Blockierzeit und der dazugehörige Blockierstrom in Erfahrung zu bringen.

### **6.6.5.3 Rotorkritische Motoren**

Mittelspannungs- und grosse Niederspannungsmotoren sind meist rotorkritisch. Die zulässige Blockier- und Anlaufzeit ist durch die Wärmekapazität des Rotors begrenzt und wird vom Motorenhersteller angegeben. Wird die Auslösezeit des Motorschutzgerätes auf die zulässige Blockierzeit eingestellt, so entspricht das thermische Abbild den praktischen Bedürfnissen des Motors.

Kurzzeitig sind im Rotor hohe Temperaturen zulässig. Der Motor ist deshalb im Anlauf aus dem warmen Zustand überschützt.

Setzt man rotorkritische Motoren für Schweranlaufbedingungen ein, so ist zu beachten, dass sie beim Blockieren sehr schnell die kritische Temperatur erreichen. Oft muss deshalb bei Schweranlauf die Anlaufzeit bedeutend länger als die zulässige Blockierzeit eingestellt werden. Damit beim Anlauf der Blockierschutz trotzdem gewährleistet ist, muss während der Anlaufphase die Drehzahl mit einem Drehzahl- oder Stillstandsmesser überwacht werden. Im Betrieb muss das Schutzgerät ebenfalls auf eine Blockierung sofort reagieren.

### **6.6.5.4 Mittelspannungsmotoren**

Mittelspannungsmotoren werden ab einer Leistung von ca. 200 KW eingesetzt. Ihr Aufbau und die Funktionsweise unterscheiden sich nicht von den Niederspannungsmotoren. Sie sind in der Regel rotorkritisch und daher entsprechend zu schützen.

### 6.6.5.5 Schleifringläufermotoren

Schleifringläufermotoren sind auch bei mehrfach wiederholten Anläufen thermisch nicht gefährdet. Die Anlaufwärmeverluste werden an die Anlaufwiderstände ausserhalb des Motors abgegeben. Grundsätzlich sind eigenbelüftete Schleifringläufermotoren einfacher zu schützen als normale Käfigläufermotoren, weil bei ihnen keine Stromverdrängung auftritt und wenn sie nicht während längerer Zeit bei erhöhtem Schlupf betrieben werden.

Beim Schleifringmotor sind nicht nur im Stator, sondern auch im Rotor temperaturempfindliche Isolierstoffe vorhanden. Die Auslösezeit wird daher vom thermisch kritischen Teil bestimmt. Die zulässige Blockier- und Anlaufzeit wird vom Motorenhersteller definiert. Bei entsprechend richtiger Einstellung des Trägheitsgrades schützen moderne elektronische Motorschutzgeräte auch die Anlasswiderstände vor thermischer Überlast. Die genaue Stromerfassung ist im Rotorkreis wegen der tiefen Frequenz (Schlupffrequenz) nicht einfach.

Der Rotorstrom ist etwa proportional dem vom Motorschutzgerät gemessenen Statorstrom. Die Schutzwirkung ist deshalb auch bei der Energierückspeisung vom Rotor ans Netz, wie z.B. bei der untersynchronen Stromrichter-kaskade bei niedrigen Drehzahlen, möglich. Voraussetzung ist, dass die Kühlung, z.B. durch Fremdlüftung, gewährleistet ist.

### 6.6.5.6 Mehrstufenmotoren

Mehrstufenmotoren werden durch mehrteilige Wicklungen, beziehungsweise durch Umschalten von Wicklungsteilen wie bei der Dahlanderschaltung realisiert. Diese Wicklungsteile liegen zum Teil in den gleichen Nuten und sind damit thermisch sehr eng gekoppelt oder sie sind sogar identisch. Im Dauerbetrieb erwärmt deshalb die Wicklung der einen Stufe die andere ebenfalls. Beide erreichen nach längerer Betriebszeit die gleiche Temperatur.

Für den minimalen Schutz ist für jede Drehzahl ein separates Motorschutzgerät einzusetzen. Diese Methode hat jedoch den Nachteil, dass beim Umschalten von der einen auf die andere Drehzahlstufe das zweite Schutzgerät den thermischen Betriebszustand der vorhergehenden Stufe nicht erfasst. Erst nach einer bestimmten Betriebsdauer hat es sich erwärmt und schützt den Motor richtig.

Die korrekte Temperturnachbildung und damit sicherer Schutz ist möglich, falls das Schutzgerät zwei verschiedene Stromeinstellungen bietet und die Motorströme beider Stufen erfasst.

### 6.6.5.7 Frequenzgeregelte Motoren

Bei eigenventilierten Motoren ist zu beachten, dass bei niedriger Drehzahl die Kühlung nicht mehr voll gewährleistet ist. Die Motorerwärmung ist nicht nur vom Motorstrom abhängig. **Bild 6.32.1**. Zusätzliche Verluste von etwa 10 % entstehen durch Oberwellen.

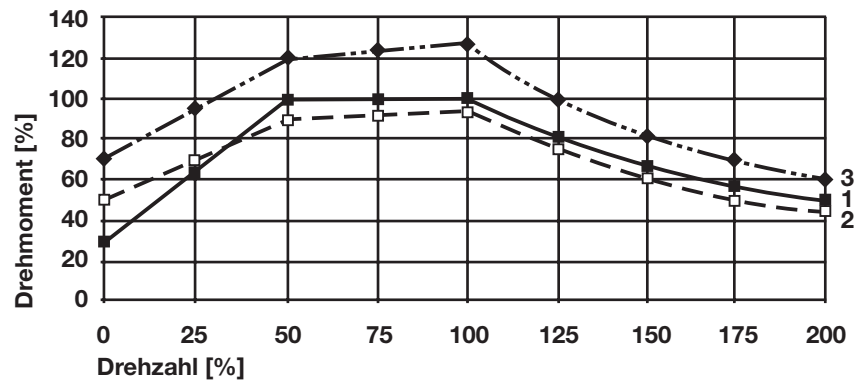


Bild 6.32.1 Zulässige thermische Dauerbelastung eines mit Frequenzumrichter geregelten Drehstrommotors.

- 1 Lastdrehmoment
- 2 Drehmoment eines Normmotors bei zulässiger Dauerbelastung
- 3 Drehmoment eines Normmotors der nächstgrössten Normleistung

Solche Motoren sollten deshalb zusätzlich mit Temperaturfühlern, z.B. PTC-Fühlern, geschützt werden.

Der stromabhängige Schutz kann schon im Stromrichter enthalten sein oder frequenzunabhängig mit externen Geräten erfolgen:

- Thermorelais auf Bimetallbasis
- Leistungsschalter
- Elektronische Motorschutzgeräte mit integriertem PTC-Schutz

Der zulässig Frequenzbereich, sowie der Einfluss der hohen Schaltfrequenzen im Frequenzumrichter, sind bei der Wahl des Schutzgerätes zu berücksichtigen.

### 6.6.5.8 Sanftstart, Sanftstop

Für den Schutz von Motoren, die mit Sanftanlaufgeräten auf der Basis des Phasenanschnittes angesteuert werden, sind nicht alle Motorschutzgeräte geeignet. Beim Anlauf ergeben sich stark von der Sinusform abweichende Ströme, die gewisse Schutzfunktionen beeinträchtigen können. Bei einfacheren Schutzgeräten müssen deshalb die betroffenen Funktionen während der Start- und Sanftstop-Phase ausgeschaltet werden.

Falls der Sanftstarter auch eine Bremsfunktion bietet, so muss das Schutzgerät die während der Bremsphase auftretende Asymmetrie ignorieren.

Werden Motoren während längerer Zeit mit reduzierter Spannung betrieben, so müssen sie zusätzlich mit Temperaturfühler (z.B. PTC) geschützt werden.

### **6.6.5.9 Fremdbelüftete Motoren**

Die Kühlung fremdbelüfteter Motoren ist unabhängig von der Motordrehzahl. Nach dem Ausschalten werden solche Antriebe meist noch eine gewisse Zeit weitergekühlt. Die schnellere Abkühlung des Motors kann mit einem elektronischen Schutzgerät berücksichtigt werden.

### **6.6.5.10 Erhöhte Umgebungstemperatur**

Liegt die Kühlmitteltemperatur über 40 °C, darf die Maschine nur noch mit reduzierter Leistung betrieben werden. Dieses Problem kann auch bei normaler Umgebungstemperatur entstehen, wenn sich z.B. durch Sonneneinstrahlung oder andere Wärmequellen, die Umgebungstemperatur stark erhöht.

Grundsätzlich ist dieses Problem schon bei der Planung zu beachten. Der Antrieb ist entsprechend zu dimensionieren oder es ist eine höhere Isolationsklasse zu wählen und der Motorschutz diesen Verhältnissen anzupassen. Für bestimmte Anwendungen wird bewusst eine entsprechende Reduktion der Lebensdauer in Kauf genommen.

Bei erhöhter Umgebungstemperatur sind folgende Lösungen üblich:

- Auslösecharakteristik beim Motorschutzgerät und Belastung der Anlage gemäss der Umgebungstemperatur korrigieren. Anspruchsvolle Schutzgeräte berücksichtigen die Umgebungstemperatur im Temperatursimulationsmodell automatisch mit Hilfe von Temperaturfühler z.B. PT100.
- Stromeinstellung korrigieren: Ein Thermostat schaltet die Stromeinstellung im Motorschutzgerät, entsprechend der Umgebungstemperatur, auf vorgeählte Werte. Dies ist möglich bei Schutzgeräten, die z.B. für den Schutz von Zwei-Stufen- Motoren mit zwei ansteuerbaren Stromeinstellungen, ausgelegt sind. Der Thermostat kann gleichzeitig auch die Belastung des Antriebs steuern.

### **6.6.5.11 Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen**

Der Betrieb elektrischer Betriebsmittel für die Zonen 1 und 2 ist zulassungspflichtig. Die Zone 2 ist die weniger anspruchsvolle Umgebung, da hier der mögliche Störfall nur für kurze Zeit auftreten darf. Eine explosionsfähige Atmosphäre darf hier nur für kurze Zeit und nicht betriebsmässig vorhanden sein.

Gemäss der entsprechenden Zündklasse benötigt der Motor die Zeit  $t_E$ , um sich vom betriebswarmen Zustand auf die kritische Temperatur zu erwärmen. Die Auslösezeit des Motorschutzgerätes muss deshalb der Zeit  $t_E$  entsprechen oder kürzer sein.

Im Gegensatz zu Bimetall-Thermorelais berücksichtigen elektronische Motorschutzrelais auch die Abkühlzeit, so dass sich eine erhöhte Schutzreserve gegenüber dem Bimetall-Thermorelais ergibt.

### 6.6.5.12 Schutz von kompensierten Drehstrommotoren

Bei Einzelkompensation werden die zur Blindleistungskompensation notwendigen Kondensatoren direkt an den Motorklemmen angeschlossen. (Ausnahme: Beim Einsatz von Sanftstarten gemäss 6.6.5.8 müssen die Kondensatoren vor dem Sanftstarter montiert werden) So werden Motor und Kondensatoren gleichzeitig ein- und ausgeschaltet. Die Zuleitungen vom Netz und die Schalt- und Schutzgeräte führen lediglich den kompensierten Strom, da der Blindstrom überwiegend nur zwischen Kondensator und Motor fliesst.

Der kompensierte Strom ist die geometrische Summe von Motorblindstrom, vermindert um den Kondensatorblindstrom, und Motorwirkstrom. Am Schutzgerät muss anstelle des Bemessungsbetriebsstromes des Motors, der entsprechende kompensierte Strom eingestellt werden. Letzterer kann nur bei voll belastetem Motor gemessen werden und wird deshalb meist nach der folgenden Faustformel berechnet:

$$I_{eF} \approx I_e \frac{\cos\varphi_N}{\cos\varphi_2}$$

$I_{eF}$  Einstellstrom in Ampere

$I_e$  Bemessungsbetriebsstrom des Motors in Ampere

$\cos\varphi_N$  Leistungsfaktor des Motors bei  $I_e$

$\cos\varphi_2$  Leistungsfaktor kompensiert

Während  $I_e$  und  $\cos\varphi_N$  den Herstellerangaben oder dem Leistungsschild entnommen werden können, ist  $\cos\varphi_2$  nur aufwendig zu messen beziehungsweise zu berechnen. Wird bei richtig bemessenen Kondensatoren für  $\cos\varphi_2 = 0.95$  eingesetzt, ist der Motorschutz gewährleistet.

Bei Gruppen- und Zentralkompensation führt das Schutzgerät den gleichen (unkompensierten) Strom wie der Motor und ist deshalb auf dessen Bemessungsbetriebsstrom einzustellen.

## 7 Auswahl des richtigen Motorschutzgerätes

Ein wirtschaftliches Motorschutzkonzept erfordert, dass die Schutzeinrichtung an die Bedürfnisse des Motors und der zu betreibenden Anlage angepasst sein muss.

Es ist nicht sinnvoll, eine unkritische Anlage mit höchstklassigen Geräten zu schützen. Andererseits kann der Schaden beträchtlich sein, falls ein wichtiger Teil einer Produktionsanlage mit anspruchsvollen Anlauf- und Betriebsbedingungen, nicht entsprechend überwacht und geschützt ist.

Die folgenden Tabellen sollen die richtige Auswahl des Schutzgerätes oder der Kombination von verschiedenen Schutzgeräten erleichtern. Für jede Anwendung ist die Gewichtung und Berücksichtigung aller relevanten Kriterien neu vorzunehmen.

Die wesentlichen Auswahlkriterien sind:

- Anwendung
- Art des Antriebs und Grösse des Motors
- Umgebungsbedingungen
- Motormanagementanforderungen

7.1 Auswahl des Schutzes nach Anwendung

Anwendung	Scheren	Pressen	Brecher	Mühlen	Liffts	Krane	Förderbänder	Ventilatoren	Kältekompressoren	Kompressoren	Hydraulikpumpen	Unterwasserpumpen	Pumpen	
														<b>Typische Betriebsverhalten</b>
	●	●				●	●	●		●	●	●	●	Normaler Anlauf
			●	●			○	●						Schweranlauf
									●			●		Kurzer Anlauf
				○		●	○	●	●	●	●	●	●	Kontinuierliche Belastung
			●	●			●							Wechselnde Belastung
	●	●			●	●	○		○	○	○	○	○	Start - Stop Betrieb
	●	●	●	○		○								Kurzzeitig erlaubte Überlast
														<b>Typische Fehler / Schutzbedarf</b>
	○	○	○	○		○	●	○	●	●	●	●	○	Zu lange Anlaufzeit
	○	○	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	●	Blockierung während Anlauf
	●	●	●	●		○	●							Hohe Überlast während Betrieb
	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	●	Blockierung während Betrieb
			○		○	○	●	●				●		Unterlast
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Erdschluss mit "Holmgreen" Methode
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Erdschluss mit Summenstromwandler
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	Phasenausfall
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Asymmetrie
	○	○	○	○			○	○						Asymmetrie thermisch berücksichtigt
	○	○	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	Temperaturfühler PTC in Wicklung
	○	○	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	Temperaturfühler PT 100 in Wicklung
														<b>Motorschutz</b>
														<b>Anforderungen, mögliche Geräte</b>
										◇	◇		◆	<b>Niedrig:</b> Bul. 140/KTA 3 (+ Bul. 817/RT 3)
										◇	◇		◆	<b>Niedrig:</b> CTB; 193-EA (+ Bul. 817/RT 3)
	◇	◇			◇	◇	◇	◇	◇	◆	◆	◇	◇	<b>Mittel:</b> CEFB 1; 193-EB (+ Bul. 817)
	◆	◆			◇	◇	◇	◇	◇	◆	◆	◇	◇	<b>Mittel:</b> SMP 3 (+ Bul. 817/RT 3)
	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	<b>Hoch:</b> SMM 825/CET 4

Typische Betriebsverhalten / typische Fehler / Schutzbedarf

○ = Möglich  
● = Typisch

Motorschutz  
◇ = Mögliche Lösung  
◆ = Optimale Lösung



7.3 Auswahl des Schutzes nach Umgebungsbedingung

Umgebungsbedingung					
Feuchtigkeit	Staub	Hohe Temperaturen	Grosse Temperaturschwankungen	Keine speziellen Anforderungen	
					<b>Schutzfunktion</b>
	●	●	●		Temperaturfühler PTC in Wicklung
	●	●	●		Temperaturfühler PT 100 in Wicklung
	○	●	●		Umgebungstemp. therm. berücksichtigt
●	○				Erdschluss mit "Holmgreen" Methode
●	○				Erdschluss mit Summenstromwandler
					<b>Motorschutz</b>
					<b>Anforderungen, mögliche Geräte</b>
	◆	◆	◇	◆	<b>Niedrig:</b> Bul. 140/KTA 3 (+ Bul. 817/RT 3)
	◆	◇	◇	◆	<b>Niedrig:</b> CTB; 193-EA (+ Bul. 817/RT 3)
	◆	◇	◇	◆	<b>Mittel:</b> CEFB 1; 193-EB (+ Bul. 817)
◇	◆	◇	◇	◆	<b>Mittel:</b> SMP 3 (+ Bul. 817/RT 3)
◆	◆	◆	◆	◆	<b>Hoch:</b> SMM 825/CET 4

**Schutzfunktionen**

○ = Möglich

● = Typisch

**Motorschutz**

◇ = Mögliche Lösung

◆ = Optimale Lösung

7.4 Auswahl des Schutzes nach Motormanagement-Kriterien

MCC Funktionen	Rückmeldungen	Motor Ein/Aus	Diagnose	Kommunikation	Anzeige, Gerät	Statistik	Kommunikation	Anzeige, Gerät	Warnen	Kommunikation	Anzeige auf Gerät	Betriebsdaten	Mit Kommunikation	Mit Meldereis	
															<b>Nützliche Warnfunktionen</b>
										●	●			●	Zu lange Anlaufzeit
										●	●			●	Hohe Überlast während Betrieb
										●	●			●	Erdschluss mit Summenstromwandler
										●	●			●	Asymmetrie
										●	●			●	Temperaturfühler PT 100 in Wicklung
															<b>Nützliche Betriebsdaten</b>
										●	●			●	Motorstrom
										●	●			●	Asymmetrie
										●	●			●	Erdstrom
										●	●			●	Erwärmung
										●	●			●	Statortemperatur
															<b>Motormanagement</b>
															<b>Anforderungen, mögliche Geräte</b>
	◆	◆													<b>Niedrig:</b> Bul. 140/KTA 3 + I/O Interface
	◆	◆													<b>Niedrig:</b> CTB; 193-EA/EB, + I/O Interface
		◆		◇			◇			◇			◇		<b>Mittel:</b> SMP 3
	◆	◆		◇			◇			◇			◇		<b>Mittel:</b> SMP 3 + I/O Interface
			◆	◆		◆	◆		◆	◆			◆	◆	<b>Hoch:</b> SMM 825/CET 4
	◆	◆	◆	◆		◆	◆		◆	◆			◆	◆	<b>Hoch:</b> SMM 825/CET 4 + I/O Interface

Nützliche Warnfunktionen und Betriebsdaten

○ = Möglich  
● = Typisch

Motormanagement

◇ = Mögliche Lösung  
◆ = Optimale Lösung





# Mehr als 500'000 Möglichkeiten, um Ihr Automatisierungssystem zu verbessern

<b>Leistungsgeräte</b>	Leistungsschütze und Motorstarter Motorschutz Motor-Control-Center Leistungsüberwachung Steuer- und Lastschalter Relais	<b>Automatisierung</b>	Programmierbare Steuerungen Digital- und Analog-E / A Intelligente Peripheriebaugruppen
<b>Sensorik</b>	End-, Photoelektrik- und Näherungsschalter Druck- und Temperatursensoren Identifikationssysteme (HF) Strichcode-Lesesysteme Encoder Bildverarbeitungssysteme	<b>Kommunikation</b>	Netzwerke und Feldbussysteme Offene Kommunikationsnetzwerke (MAP)
<b>Bediengeräte</b>	Befehls- und Meldegeräte Text- und LCD-Anzeigen Bedienkonsolen Industrierechner Visualisierungs-Software	<b>Systemlösungen</b>	Kundenspezifische Entwicklungen Prozess- / Batch-Steuerungen Brennersteuerungen Spritzgiess- und Pressen-Steuerungen SCADA
<b>Antriebstechnik</b>	Sanftanlaufgeräte Frequenzumrichter Gleich- und Wechselspannungsantriebe Achsensteuerungen und Servoantriebe CNC-Steuerungen	<b>Qualitätssicherung</b>	Statistische Datenerfassung und Analyse
		<b>Dienstleistungen</b>	Weltweiter Service und Support Kundenschulung Reparatur und Ersatzteil-Service Technische Beratung

## Deutschland

Rockwell Automation  
Zweigniederlassung der  
Rockwell International GmbH  
Düsselberger Straße 15  
**D-42781 Haan-Gruiten**  
Telefon 02104-960-0  
Fax 02104-960-121

**D-40599 Düsseldorf**  
Telefon 0211-74835-0

**D-70794 Filderstadt**  
Telefon 0711-7779-0

Vertriebsbüros  
Rockwell Automation

**D-21079 Hamburg**  
Telefon 040-766 162-0

**D-10709 Berlin**  
Telefon 030-893 641-0

**D-09648 Mittweida**  
Telefon 03727-922 21

**D-63303 Dreieich**  
Telefon 06103-3797-0

**D-81829 München**  
Telefon 089-427 443-0

## Österreich

Rockwell Automation GmbH  
Bäckermühlweg 1  
**A-4030 Linz**  
Telefon 0732-38909-0  
Fax 0732-38909-61

Vertriebsbüros

**A-1234 Wien**  
Telefon 01-892 8880-0

**A-6020 Innsbruck**  
Telefon 0512-341 362-0

**A-8020 Graz**  
Telefon 0316-287 300-0

## Schweiz

Rockwell Automation AG  
Verkaufszentrum  
Gewerbepark  
Postfach 64  
**CH-5506 Mägenwil**  
Telefon 062 889 77 77  
Fax 062 889 77 66

Verkaufsstützpunkte

**CH-5506 Mägenwil**  
Telefon 062 889 77 77

**CH-3027 Bern**  
Telefon 031 992 98 00

**CH-6036 Dierikon**  
Telefon 041 445 22 22

**CH-6814 Lamone**  
Telefon 091 604 62 62

**CH-9501 Wil**  
Telefon 071 929 92 25

**CH-1020 Renens**  
Telefon 021 631 32 32



Rockwell Automation vereint führende Marken der industriellen Automation und hilft seinen Kunden, den größtmöglichen Gewinn aus ihren Investitionen zu ziehen. Wir bieten ein umfassendes Sortiment an leicht integrierbaren Produkten. Unsere Produkte werden durch Kundendienstmitarbeiter vor Ort und weltweit, über ein globales Netzwerk von Systemanbietern und die Forschungs- und Entwicklungszentren von Rockwell umfassend unterstützt.



## Weltweite Niederlassungen.

Ägypten • Argentinien • Australien • Bahrain • Belgien • Bolivien • Brasilien • Bulgarien • Chile • Costa Rica • Dänemark • Deutschland • Dominikanische Republik • Ecuador  
El Salvador • Finnland • Frankreich • Ghana • Griechenland • Großbritannien • Guatemala • Honduras • Hongkong • Indien • Indonesien • Irland • Island • Israel • Italien  
Jamaika • Japan • Jordanien • Kanada • Kolumbien • Korea • Kroatien • Kuwait • Libanon • Macao • Malaysia • Malta • Marokko • Mexiko • Niederlande • Neuseeland • Nigeria  
Norwegen • Österreich • Oman • Pakistan • Panama • Peru • Philippinen • Polen • Portugal • Puerto Rico • Qatar • Republik Südafrika • Rumänien • Rußland • Saudi-Arabien  
Singapur • Slowakei • Slowenien • Spanien • Schweden • Schweiz • Taiwan • Thailand • Trinidad • Tschechien • Türkei • Tunesien • Ungarn • Uruguay • Venezuela • Vereinigte  
Arabische Emirate • Vereinigte Staaten • Volksrepublik China • Zypern

Hauptverwaltung weltweit: 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204, USA, Tel.: +1 414 382 2000, Fax: +1 414 382 4444  
Hauptverwaltung Europa: Avenue Herrmann Debroux, 46, 1160 Brüssel, Belgien, Tel.: +32 2 663 0600, Fax: +32 2 663 0640  
Hauptverwaltung Asien/Pazifik: 27/F Citicorp Centre, 18 Whitfield Road, Causeway Bay, Hong Kong, Tel.: +852 2887 4788, Fax: +852 2510 9436  
World Wide Web: <http://www.ab.com>