

Leitfaden

Das vorliegende Dokument dient der generellen technischen Information über die Auswahl und Anwendung von Niederspannungs-Schalt- und Steuergeräten und stellt keine umfassende und abschliessende Darstellung der behandelten Sachverhalte dar. Fehler oder Änderungen – z.B. als Folge geänderter Vorschriften oder technischen Fortschritts – können nicht ausgeschlossen werden.

Dieses Werk wurde mit grösster Sorgfalt erstellt. Dennoch übernehmen die Verfasser und Rockwell Automation keine Haftung für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können daher keine Ansprüche gegenüber den Verfassern und/oder Rockwell Automation gemacht werden. Rockwell Automation behält sich vor, jederzeit und ohne Benachrichtigung Änderungen nach eigenem Ermessen vorzunehmen. Dementsprechend ist im Vorfeld von Entscheidungen oder Handlungen, die Auswirkung auf technische Einrichtungen haben könnten, qualifizierte professionelle Beratung einzuholen.

Die Autoren danken der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) für die Erlaubnis, Informationen aus ihren Internationalen Standards zu reproduzieren:

IEC 60947-1 ed.5.0 (2007) / IEC 60947-4-1 Am2 (2005) / IEC 60947-2 ed.4.0 (2006) / IEC 60269-1 ed.4.0 (2006) / IEC 60947-8 ed.1.1 (2006) / IEC 60947-5-1 ed.3.0 (2003) / IEC 60038 ed.6.2 (2002) / IEC 60079-14 ed.4.0 (2007).

Alle Auszüge unterstehen dem Copyright von IEC, Genf, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten. Weiterführende Informationen über IEC sind auf www.iec.ch erhältlich. IEC übernimmt weder Verantwortung bezüglich der Platzierung und den inhaltlichen Zusammenhang, in dem die Auszüge und Inhalte von den Autoren wiedergegeben werden, noch ist IEC in irgendeiner Weise für den übrigen Inhalt oder dessen Richtigkeit verantwortlich.

Rockwell Automation dankt den Autoren des vorliegenden Dokumentes und deren Mitarbeitern für ihre wertvollen Beiträge.

Redaktion:

Dr. Werner Breer, Paul Hug, Urs Hunziker, Rey Kaltenrieder, Heinz Unterweger,
Dr. Hans Weichert. Unter Beizug weiterer Spezialisten.

Copyright © 2009 by Rockwell Automation, Milwaukee, USA

Allgemeine Vorbemerkungen

Das vorliegende Fachbuch ist ein Hilfsmittel zur Projektierung und den Einsatz von Niederspannungs-Schaltgeräten in Schaltgeräte-Kombinationen und Maschinensteuerungen. Den Schwerpunkt bilden elektromechanische Schaltgeräte, es werden jedoch auch elektronische Geräte der Niederspannungstechnik berücksichtigt, die in vielen Fällen vorteilhafte Alternativen zu mechanischen Geräten darstellen.

Die Ausführungen beziehen sich – soweit relevant – auf den Normenbereich der IEC, denen die europäischen CENELEC-Normen entsprechen. Wo Normen zitiert werden, wird jeweils die IEC-Bezeichnung angeführt. Die CENELEC-Normen (EN) haben weitgehend die gleiche Nummerierung. Nationale Normen (z.B. DIN/VDE oder BS) sind aus traditionellen Gründen zum Teil unterschiedlich nummeriert, inhaltlich mit den IEC- und EN-Normen abgesehen von seltenen nationalen Abweichungen aber identisch. Bezüglich der Anforderungen anderer Normenbereiche, insbesondere des nordamerikanischen Raumes, sei auf die spezifischen Publikationen verwiesen. Die physikalischen Gesetze gelten generell.

Für Schaltgerätekombinationen wird die Norm IEC 60439-1 angeführt, die zum Zeitpunkt der Ausgabe dieses Dokumentes in Kraft ist. IEC 61439-1 wird die IEC 60439-1 in Kürze ablösen. Die in der vorliegenden Dokumentation gemachten Aussagen für Schaltgerätekombinationen gelten auch für IEC 61439-1.

Die Darstellungen konzentrieren sich auf die grundlegenden Erkenntnisse und Fakten und vermeiden – soweit möglich - die Angabe technischer Daten zu konkreten Produkten, um ein rasches Veralten der Informationen zu vermeiden. Die aktuellen technischen Daten der Produkte sind den gültigen technischen Produktdokumentationen wie gedruckten und „elektronischen“ Katalogen und elektronischen Dokumentationen wie RALVET zu entnehmen.

0 Inhaltsverzeichnis

0	Inhaltsverzeichnis	0-5
1	Lastcharakteristiken und Gebrauchskategorien.....	1-1
1.1	<i>Gebrauchskategorien vereinfachen die Geräteauswahl.....</i>	1-1
1.2	<i>Elektrowärmegeräte.....</i>	1-4
1.3	<i>Lampen und Beleuchtungseinrichtungen.....</i>	1-4
1.3.1	Glühlampen.....	1-4
1.3.1.1	Halogenlampen.....	1-5
1.3.2	Entladungslampen.....	1-5
1.4	<i>Transformatoren.....</i>	1-6
1.5	<i>Blindleistungskompensation und Schalten von Kondensatoren.....</i>	1-7
1.5.1	Blindleistungskompensation.....	1-7
1.5.1.1	Einzelkompensation.....	1-8
1.5.1.2	Gruppenkompensation.....	1-8
1.5.1.3	Zentralkompensation.....	1-8
1.5.2	Schalten von Kondensatoren.....	1-9
1.5.2.1	Einschalten von Einzelkondensatoren.....	1-9
1.5.2.2	Schalten von langen geschirmten Leitungen.....	1-9
1.5.2.3	Einschalten von Kondensatoren bei Zentralkompensation.....	1-9
1.6	<i>Steuerstromkreise, Halbleiterlast und elektromagnetische Last.....</i>	1-10
1.7	<i>Drehstrom-Asynchron-Motoren.....</i>	1-10
1.7.1	Wirkungsweise.....	1-10
1.7.1.1	Schleifringläufer-Motoren.....	1-12
1.7.1.2	Kurzschlussläufer-Motoren.....	1-13
1.7.1.2.1	Motoren mit hohem Wirkungsgrad.....	1-15
1.7.1.3	Einfluss der an den Wicklungen liegenden Spannung.....	1-16
1.7.1.4	Verhalten des Kurzschlussläufer-Asynchronmotors bei Änderung der Frequenz.....	1-17
2	Schaltaufgaben und anwendungsgerechte Auswahl der Schaltgeräte.....	2-1
2.1	<i>Normenkonforme und applikationsgerechte Betriebsmittel.....</i>	2-1
2.2	<i>Grundsätzliche Schaltaufgaben und Kriterien für die Geräteauswahl.....</i>	2-2
2.2.1	Geräte-Arten.....	2-2
2.2.1.1	Trennschalter (Isolator).....	2-2
2.2.1.2	Lastschalter.....	2-3
2.2.1.3	Lasttrennschalter.....	2-3
2.2.1.4	Leistungsschalter.....	2-3
2.2.1.5	Hauptschalter.....	2-4
2.2.1.6	Haupt-NOT-AUS-Schalter.....	2-4
2.2.1.7	Zusammenfassung Haupt- und Haupt-NOT-AUS-Schalter.....	2-5
2.2.1.8	Sicherungen.....	2-5
2.2.1.9	Geräte für den thermischen Schutz.....	2-5
2.2.1.10	Schütze.....	2-5
2.3	<i>Parameter für die korrekte Auswahl und Bemessung.....</i>	2-5
2.3.1	Bemessungs-Isolationsspannung U_i	2-7
2.3.2	Bemessungs-Betriebsspannung U_e , Bemessungs-Betriebsstrom I_e und Gebrauchskategorie.....	2-7
2.3.3	Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit U_{imp}	2-7
2.3.4	Kurzschlussfestigkeit und Kurzschlusschutz.....	2-9
2.3.4.1	Joule-Integral I^2t	2-10
2.3.4.2	Durchlassstrom I_D	2-10

2.3.4.3	Bemessungs-Kurzzeitstrom I_{CW}	2-10
2.3.4.4	Strombegrenzende Schutzeinrichtungen	2-11
2.3.4.5	Koordination von Betriebsmitteln	2-12
2.3.4.5.1	Koordination hinsichtlich des Schaltvermögens des Schützes (Überstromselektivität)	2-12
2.3.4.5.2	Koordination hinsichtlich der Betriebsfähigkeit nach einem Kurzschluss.....	2-13
2.3.4.6	Kurzschluss-Schaltvermögen.....	2-14
2.3.4.6.1	Bemessungs-Kurzschluss-Einschaltvermögen I_{cm}	2-14
2.3.4.6.2	Bemessungs-Kurzschluss-Ausschaltvermögen I_{cu} und I_{cs}	2-14
2.3.5	Thermischer Schutz.....	2-15
2.3.5.1	Umgebungstemperatur	2-15
2.3.5.2	Betriebsmässige Überströme, Schweranlauf	2-16
2.3.6	Lebensdauer.....	2-16
2.3.6.1	Vorgesehene Einsatzdauer.....	2-17
2.3.6.2	Mechanische Lebensdauer	2-17
2.3.6.3	Elektrische Lebensdauer	2-17
2.3.7	Aussetz- und Kurzzeitbetrieb, zulässige Schalhäufigkeit.....	2-21
2.3.7.1	Aussetzbetrieb und relative Einschaltdauer	2-23
2.3.8	Bemessungsfrequenz und Oberschwingungen.....	2-25
2.3.9	Sicherheitsabstände	2-25
2.3.10	Einbaulage.....	2-26
2.3.11	Schutztrennung.....	2-26
2.3.12	Aufstellungshöhe	2-27
2.3.13	Schock und Vibration.....	2-27
2.4	Spezifische Einsatzbedingungen und Schaltaufgaben.....	2-28
2.4.1	Parallel- und Serieschaltung von Strombahnen	2-28
2.4.1.1	Parallelschalten	2-28
2.4.1.2	Serienschaltung.....	2-28
2.4.2	Wechselstromschaltgeräte in Gleichstromnetzen.....	2-29
2.4.3	Einsatz bei Netzfrequenzen < 50 Hz und > 60 Hz. Einfluss von Oberschwingungen.....	2-30
2.4.3.1	Einfluss der Netzfrequenz auf die thermische Belastung	2-31
2.4.3.2	Einfluss der Netzfrequenz auf das Schaltvermögen.....	2-32
2.4.3.3	Ansprechverhalten der Auslöser bei Netzfrequenzen < 50 Hz und > 60 Hz ...	2-33
2.4.3.4	Schaltgeräte im Einsatz mit Softstartern	2-33
2.4.3.5	Schaltgeräte im Einsatz mit Frequenzumrichtern (Invertern).....	2-34
2.4.4	Einsatz von vierpoligen Schaltgeräten	2-36
2.4.4.1	Applikationen von Schaltgeräten mit 4 Schliesskontakten.....	2-36
2.4.4.2	Applikationen von Schaltgeräten mit 2 Schliess- und 2 Öffnungskontakten	2-37
2.4.4.3	Applikationen von Schaltgeräten mit 3 Schliess- und 1 Öffnungskontakt	2-38
2.4.5	Einsatz von Leistungsschaltern in IT-Netzen	2-38
2.4.6	Schaltgeräte für Sicherheitsanwendungen.....	2-39
2.4.6.1	Zwangsgeführte Kontakte	2-39
2.4.6.2	Spiegelkontakte (Mirror Contacts).....	2-40
2.4.7	Explosionsgefährdete Bereiche	2-41
2.4.7.1	Geschichte, Richtlinien und Vorschriften.....	2-41
2.4.7.2	Klassierung explosionsgefährdeter Bereiche	2-42
2.4.7.3	Motoren für explosionsgefährdete Bereiche.....	2-44
2.4.7.4	Schutz von Motoren der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“	2-46
2.4.7.5	ATEX 100a (Richtlinie 94/9/EG).....	2-48
2.4.7.6	IECEx und andere Zulassungsverfahren für explosionsgefährdete Bereiche ..	2-48
3	Starten und Schalten von Motoren.....	3-1
3.1	Auswahlkriterien.....	3-1
3.2	Direktanlauf von Kurzschlussläufer-Motoren.....	3-3

3.2.1	Anlaufzeit	3-3
3.2.2	Wendestarter	3-4
3.3	<i>Stern-Dreieck-Anlauf</i>	3-4
3.3.1	Normaler Stern-Dreieck-Anlauf	3-5
3.3.2	Motoranschluss bei Rechts- und Linkslauf	3-8
3.3.3	Einfluss der dritten Oberschwingung auf Motorschutzrelais.....	3-10
3.3.4	Unterbrechungsloser Stern-Dreieck-Anlauf (closed transition)	3-11
3.3.5	Verstärkter Stern-Dreieck-Anlauf.....	3-12
3.3.6	Teilwicklungs-Stern-Dreieck-Anlauf.....	3-13
3.4	<i>Auto – Transformator – Anlauf</i>	3-14
3.4.1	Schaltung und Funktion.....	3-14
3.4.2	Dimensionierung des Starters	3-15
3.5	<i>Anlauf über Drosseln oder Widerstände</i>	3-15
3.5.1	Anlauf über Drosseln.....	3-15
3.5.2	Anlauf über Widerstände.....	3-16
3.6	<i>Kurzschluss – Sanftanlauf</i>	3-16
3.6.1	Schaltung und Funktion.....	3-16
3.7	<i>Polumschaltbare Motoren</i>	3-17
3.7.1	Drehzahländerung durch Polumschaltung.....	3-17
3.7.2	Dimensionierung des Starters bei Polumschaltung	3-18
3.7.3	Dimensionierung des Starters für Stufen mit Stern-Dreieck-Anlauf.....	3-19
3.8	<i>Starten von Schleifringmotoren</i>	3-20
3.9	<i>Elektronische Softstarter</i>	3-22
3.9.1	Spannungsrampe versus Strombegrenzung	3-23
3.9.2	Spannungsrampe.....	3-24
3.9.3	Kickstart	3-25
3.9.4	Strombegrenzung.....	3-25
3.9.5	Soft Stopp	3-25
3.9.6	Softstarter für Pumpensteuerungen.....	3-26
3.9.7	Motorbremsung.....	3-27
3.9.8	Positionierdrehzahlen und gesteuertes Bremsen	3-27
3.9.9	Lineare Beschleunigung und Abbremsung durch Drehzahl-Rückführung	3-28
3.9.10	Direktstart mit voller Spannung	3-29
3.10	<i>Frequenzumrichter</i>	3-29
3.10.1	Funktionsweise	3-29
3.10.1.1	Gleichrichter.....	3-30
3.10.1.2	Zwischenkreis	3-30
3.10.1.3	Wechselrichter	3-30
3.10.2	Betriebsverhalten	3-31
3.10.3	Drehrichtungswechsel und Bremsen	3-32
3.10.4	Motorschutz	3-32
4	Schutz	4-1
4.1	<i>Schutzanforderungen</i>	4-1
4.1.1	Schutz vor elektrischem Schlag	4-1
4.1.1.1	Schutz gegen direkte Berührung	4-1
4.1.1.2	Schutz bei indirekter Berührung	4-2
4.1.1.3	Zusatzschutz.....	4-3
4.1.2	Schutz vor Überlast und Übertemperatur	4-3
4.1.2.1	Unterschiedliche Belastungskurven verschiedener Betriebsmittel	4-3
4.1.2.2	Schutz im Dauerbetrieb und bei transienten Vorgängen.....	4-4
4.1.2.3	Überlast- und Übertemperaturschutz durch Messung des Stromes und durch Messung der Temperatur	4-7
4.1.2.4	Schutzfunktionen.....	4-8

4.1.2.4.1	Schutz beim Anlauf, Anlaufzeitüberwachung, Anlaufverriegelung	4-10
4.1.2.4.2	Asymmetrieschutz	4-10
4.1.2.4.3	Phasenausfallschutz	4-11
4.1.2.4.4	Blockierschutz	4-13
4.1.2.4.5	Unterlastschutz	4-14
4.1.2.4.6	Automatische Umschaltung beim Start	4-14
4.1.2.4.7	Erdschlussschutz	4-14
4.1.2.5	Anzeige, Warn- und Steuerungsfunktionen	4-15
4.1.3	Schutz vor hohen Überströmen, Kurzschlusschutz	4-16
4.1.3.1	Definition und Charakteristik eines Kurzschlusses	4-16
4.1.3.2	Wirkungen und Gefährdungen bei Kurzschlüssen	4-17
4.1.3.3	Schutzanforderungen	4-18
4.1.3.3.1	Schaltvermögen	4-18
4.1.3.3.2	Strombegrenzung	4-18
4.1.3.3.3	Selektivität	4-19
4.1.3.3.4	Kurzschluss-Koordination	4-22
4.2	Schutzgeräte	4-22
4.2.1	Sicherungen	4-22
4.2.1.1	Wirkungsweise	4-22
4.2.1.1.1	Strombegrenzung	4-23
4.2.1.1.2	Ausschaltvermögen	4-23
4.2.1.2	Vorschriften und Gebrauchskategorien	4-23
4.2.1.2.1	Klassifikation und Zeit/Strom-Bereiche	4-24
4.2.1.3	Bauarten	4-25
4.2.2	Leistungsschalter	4-26
4.2.2.1	Wirkungsweise und Bauart	4-26
4.2.2.2	Vorschriften, Funktionen und Gebrauchskategorien	4-26
4.2.2.2.1	Vorschriften	4-26
4.2.2.2.2	Funktionen und Gebrauchskategorien	4-26
4.2.2.3	Aufbau eines Leistungsschalters	4-28
4.2.2.3.1	Thermische Überstromauslöser	4-28
4.2.2.3.2	Elektromagnetische Überstromauslöser	4-29
4.2.2.3.3	Hauptkontaktsystem und Schaltvermögen	4-29
4.2.2.4	Einsatz von Leistungsschaltern	4-32
4.2.2.4.1	Einsatz als Leistungsschalter	4-32
4.2.2.5	Einbau von Leistungsschaltern, Sicherheitsabstände	4-34
4.2.3	Leitungsschutzschalter (Miniature Circuit Breaker MCB)	4-35
4.2.3.1	Wirkungsweise und Bauformen	4-35
4.2.3.2	Vorschriften, Auslösecharakteristiken und Bemessungsschaltvermögen	4-35
4.2.3.3	Einbau von Leitungsschutzschaltern, Sicherheitsabstände	4-36
4.2.4	Motorschutzrelais (Überlastrelais)	4-36
4.2.4.1	Thermische Motorschutzrelais	4-36
4.2.4.2	Elektronische Motorschutzrelais	4-40
4.2.4.2.1	Wirkungsweise	4-41
4.2.4.3	Thermistor-Schutzrelais	4-42
4.2.4.3.1	Relais für PTC-Fühler	4-42
4.2.4.3.2	Relais für NTC-Fühler	4-43
4.2.4.3.3	Metallwiderstands-Fühler	4-43
5	Steuerstromkreise	5-1
5.1	Gebrauchskategorien	5-1
5.2	Steuerspannungen	5-1
5.2.1	Wechselspannung	5-1
5.2.1.1	Steuertransformatoren für Steuerungen mit Schützen	5-2
5.2.1.2	Frequenzen <50 Hz und >60 Hz	5-2

5.2.2	Gleichspannung	5-2
5.3	Schalten von Schützen	5-3
5.3.1	Wechselstromantriebe	5-3
5.3.1.1	Konventionelle Wechselstromantriebe	5-3
5.3.1.2	Elektronische Spulenansteuerung	5-4
5.3.2	Gleichstromantriebe	5-4
5.3.2.1	„Konventionell“	5-4
5.3.2.2	Doppelwicklungs-Spulen	5-5
5.3.2.3	Elektronische Spulenansteuerung	5-5
5.3.3	Elektromagnetische Verträglichkeit und Schutzbeschaltung	5-5
5.3.3.1	Schutzbeschaltung in Spulenkreisen	5-6
5.3.4	Einfluss langer Steuerleitungen	5-7
5.3.4.1	Spannungsabfall	5-7
5.3.4.2	Einfluss der Kabelkapazität	5-8
5.3.5	Kontaktsicherheit	5-10
6	Spezielle Aspekte des Baus von Steuerungen und Schaltgerätekombinationen	6-1
6.1	Erwärmung	6-1
6.1.1	Erwärmungsgrenzwerte	6-1
6.1.2	Labor-Prüfbedingungen und reale Einsatzumgebung	6-2
6.1.3	Erwärmungsnachweis	6-3
6.1.4	Wichtige Aspekte bezüglich Geräte-Erwärmung; Empfehlungen	6-3
6.1.4.1	Bemessungsstrom	6-3
6.1.4.2	Thermische Schutzgeräte	6-4
6.1.4.3	Leiterquerschnitte	6-4
6.1.4.4	Leiterlänge	6-5
6.1.4.5	Anzugsdrehmomente	6-5
6.1.4.6	Leiterführung	6-5
6.1.4.7	Betriebsfrequenz und Oberschwingungen	6-6
6.1.4.8	Anreihung von Geräten	6-6
6.1.4.9	Einbaulage	6-6
6.1.5	Wärmebildkameras	6-6
6.2	Kurzschlussfestigkeit	6-7

1 Lastcharakteristiken und Gebrauchskategorien

Die Charakteristik der zu schaltenden oder zu steuernden Last bestimmt die Beanspruchung der Schaltgeräte und deren korrekte Auswahl für die jeweilige Anwendung. Insbesondere die Beanspruchung der Schaltstrecken durch Strom und Spannung beim Ein- und Ausschalten sind von Bedeutung. So entsprechen der Ein- und Ausschaltstrom bei Widerstandslast dem Dauerbetriebsstrom, während z.B. Kurzschlussläufermotoren beim Einschalten und in der Beschleunigungsphase ein Mehrfaches des Bemessungs-Betriebsstroms aufnehmen.

1.1 Gebrauchskategorien vereinfachen die Geräteauswahl

Um dem Anwender die Geräteauswahl zu erleichtern werden in den Normen für Niederspannungs-Schaltgeräte (IEC 60947-1, -2, -3, -4, -5, -6) Gebrauchskategorien definiert, die den Verwendungszweck und die damit verbundene Beanspruchung der verschiedenen Arten von Niederspannungs-Schaltgeräten wie Schütze, Leistungsschalter, Trennschalter und Lastschalter berücksichtigen (**Tab. 1.1-1**). In den technischen Daten der Geräte werden zu den einzelnen Gebrauchskategorien jeweils die Bemessungs-Betriebsströme oder die Bemessungs-Betriebsleistungen – meist für verschiedene Bemessungs-Betriebsspannungen - aufgeführt. Für ein und dasselbe Schaltgerät werden entsprechend der universellen Verwendbarkeit meist die Daten für mehrere Gebrauchskategorien angegeben. Für den Projektierenden reduziert sich die Geräteauswahl im Wesentlichen auf den Vergleich der Leistungsdaten des Schaltgerätes für die jeweilige Gebrauchskategorie mit den Bemessungsdaten der Last und die Auswahl eines Gerätes, dessen Leistungsdaten die der Last erreichen oder übertreffen.

Mit der Angabe der Bemessungs-Betriebsspannung U_e und des Bemessungs-Betriebsstroms I_e für eine bestimmte Gebrauchskategorie ist für das Schaltgerät das erforderliche Ein- und Ausschaltvermögen festgelegt. Somit sind im Allgemeinen keine weiteren Vereinbarungen zwischen Anwendern und Herstellern nötig. Die Auswahl eines geeigneten Gerätes und auch der Vergleich verschiedener Produkte werden so erleichtert.

Die Prüfvorschriften in den IEC-Normen legen die Prüfparameter für die einzelnen Gebrauchskategorien fest. Die Hersteller sind verpflichtet nach diesen Vorschriften zu prüfen. Dies sichert die Eignung der so geprüften Geräte für die jeweilige Applikation und entlastet den Anwender von technischen Details.

Die Einsatzbedingungen in der Praxis können erheblich – im günstigen wie im ungünstigen Sinn – von diesen normierten Bedingungen abweichen. Beispiele sind Schweranlauf, hohe Schalthäufigkeit, besonders hohe Geräte-Lebensdauer. In solchen Fällen müssen Anwender und Hersteller die zulässigen Beanspruchungen vereinbaren. In den Katalogen sowie in der elektronischen Dokumentation RALVET sind für die häufigsten Sonderanwendungen die entsprechenden Leistungsdaten angegeben.

Wegen des sehr hohen und kostenintensiven Prüfaufwands werden in der Regel die Daten für die wichtigsten und häufigsten Gebrauchskategorien bereitgestellt. In darüber hinaus gehenden Fällen sind Rückfragen erforderlich.

Stromart	Gebrauchs-Kategorie	Typische Anwendung	Zutreffende IEC-Gerätenorm
Wechselspannung	AC-20A, AC-20B AC-21A, AC-21-B AC-22A, AC-22B AC-23A, AC-23B 3)	Ein- und Ausschalten bei Leerlast Schalten ohmscher Last einschliesslich mässiger Überlast Schalten gemischter ohmscher und induktiver Last einschliesslich mässiger Überlast Schalten von Motorlast oder anderen stark induktiven Lasten	60947-3
	AC-1 AC-2 AC-3 AC-4 AC-5a AC-5b AC-6a AC-6b AC-7a AC-7b AC-8a AC-8b	Nicht induktive oder schwach induktive Last. Widerstandsöfen Schleifringläufermotoren: Anlassen, Ausschalten Käfigläufermotoren: Anlassen. Ausschalten während des Laufes Käfigläufermotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen ¹⁾ oder Reversieren ¹⁾ , Tippen ²⁾ Schalten von Gasentladungslampen Schalten von Glühlampen Schalten von Transformatoren Schalten von Kondensatorbatterien Schwach induktive Last in Haushaltsgeräten u. ä. Anwendung Motorlast für Haushaltsgeräte Steuern von hermetisch abgeschlossenen Kühlkompressormotoren mit manueller Rückstellung der Überlastauslöser Steuern von hermetisch abgeschlossenen Kühlkompressormotoren mit automatischer Rückstellung der Überlastauslöser	60947-4-1
	AC-52a AC-52b AC-53a AC-53b AC-58a AC-58b	Steuern der Statorwicklung eines Schleifringläufermotors: 8-Stunden-Betrieb mit Anlaufströmen für Startvorgänge, Maneuvering, Betrieb Steuern der Statorwicklung eines Schleifringläufermotors: Aussetzbetrieb Steuern eines Käfigläufermotors: 8-Stunden-Betrieb mit Anlaufströmen für Startvorgänge, Maneuvering, Betrieb Steuern eines Käfigläufermotors: Aussetzbetrieb Steuern eines hermetisch gekapselten Kühlkompressormotors mit automatischer Rückstellung der Überlastauslösungen: 8-Stunden-Betrieb mit Anlaufströmen für Startvorgänge, Maneuvering, Betrieb Steuern eines hermetisch gekapselten Kühlkompressormotors mit automatischer Rückstellung der Überlastauslösungen: Aussetzbetrieb	60947-4-2
	AC-51 AC-55a AC-55b AC-56a AC-56b	Induktionsfreie oder leicht induktive Lasten, Widerstandsöfen Schalten von elektrischen Steuerungen von Entladungslampen Schalten von Glühlampen Schalten von Transformatoren Schalten von Kondensatorbatterien	60947-4-3
	AC-12 AC-13 AC-14 AC-15	Steuern von ohmscher Last und Halbleiterlast mit Trennung durch Optokoppler Steuern von Halbleiterlast mit Trenntransformatoren Steuern von kleiner elektromagnetischer Last Steuern von elektromagnetischer Last bei Wechselspannung	60947-5-1
	AC-12 AC-140	Steuern von ohmscher Last und Halbleiterlast mit Trennung durch Optokoppler Steuerung kleiner elektromagnetischer Lasten mit Haltestrom $\leq 0,2$ A; z. B. Hilfsschütze	60947-5-2

Stromart	Gebrauchs-Kategorie	Typische Anwendung	Zutreffende IEC-Gerätenorm
Wechselspannung	AC-31A, AC-31B AC-33A, AC33B AC-35A, AC-35B AC-36A, AC36B 3)	Nicht induktive oder schwach induktive Lasten Motorlasten oder gemischte Lasten einschliesslich Motoren, Widerständen und bis zu 30 % Glühlampenlast Gasentladungslampenlast Glühlampenlast	60947-6-1
	AC-40 AC-41 AC-42 AC-43 AC-44 AC-45a AC-45b	Verteilungsstromkreise aus gemischten ohmschen und induktiven Lasten Nicht induktive oder schwach induktive Lasten, Widerstandsöfen Schleifringläufermotoren: Anlassen, Ausschalten Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufs Käfigläufermotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen ¹⁾ oder Reversieren ¹⁾ , Tippen ²⁾ Schalten von Gasentladungslampen Schalten von Glühlampen	60947-6-2
	AC-7a AC-7b	Schwach induktive Last für Haushalts- und ähnliche Anwendungen Motorlasten für Haushaltsanwendungen	61095
	A B	Schutz von Stromkreisen ohne Bemessungs-Kurzzeitstromfestigkeit Schutz von Stromkreisen mit Bemessungs-Kurzzeitstromfestigkeit	60947-2
Gleichspannung	DC-20A, DC-20B DC-21A, DC21B DC-22A, DC22B DC-23A, DC23B 3)	Ein- und Ausschalten bei Leerlast Schalten ohmscher Last einschliesslich mässiger Überlast Schalten gemischter ohmscher und induktiver Last einschliesslich mässiger Überlast (z.B. Nebenschlussmotoren) Schalten stark induktiver Last (z.B. Reihenschlussmotoren)	60947-3
	DC-1 DC-3 DC-5 DC-6	Nicht induktive oder schwach induktive Last, Widerstandsöfen Nebenschlussmotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen ¹⁾ oder Reversieren ¹⁾ , Tippen ²⁾ Widerstandsbremung von Motoren Reihenschlussmotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen ¹⁾ , oder Reversieren ¹⁾ , Tippen ²⁾ Widerstandsbremung von Motoren Schalten von Glühlampen	60947-4-1
	DC-12 DC-13 DC-14	Steuern von ohmscher Last und Halbleiterlast mit Trennung durch Optokoppler Steuern von Elektromagneten bei Gleichspannung Steuern von elektromagnetischer Last bei Gleichspannung mit Sparwiderständen im Stromkreis	60947-5-1
	DC-12 DC-13	Steuerung von Widerstandslasten und Halbleiterlasten mit Trennung durch Optokoppler Steuerung von Elektromagneten	60947-5-2
	DC-31 DC-33 DC-36	Widerstandslasten Motorlasten oder gemischte Lasten einschliesslich Motoren Glühlampenlast	60947-6-1

Stromart	Gebrauchs-Kategorie	Typische Anwendung	Zutreffende IEC-Gerätenorm
Gleichspannung	DC-40	Verteilungsstromkreise aus gemischten ohmschen und induktiven Lasten	60947-6-2
	DC-41	Nicht induktive oder schwach induktive Lasten, Widerstandsöfen	
	DC43	Nebenschlussmotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen ¹⁾ , Tippen ²⁾ ,	
	DC-45	Widerstandsbremung von Gleichstrommotoren Reihenschlussmotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen ¹⁾ , Tippen ²⁾ ,	
	DC-46	Widerstandsbremung von Gleichstrommotoren Schalten von Glühlampen	
<p>1) Gegenstrombremsen oder Reversieren des Motors ist das schnelle Bremsen oder Umkehren der Drehrichtung durch Vertauschen von zwei Zuleitungen bei laufendem Motor</p> <p>2) Unter Tippen versteht man das einmalige oder wiederholte kurzzeitige Einschalten eines Motors, um kleine Bewegungen von Maschinen zu bewirken</p> <p>3) Die Gebrauchskategorien mit Endung A gelten für häufiges Schalten, jene mit Endung B für gelegentliches Schalten</p>			

Tab. 1.1-1

Beispiele von Gebrauchskategorien für Niederspannungs-Schaltgeräte gemäss IEC 60947-1 ed. 5.0 Anhang A.

Copyright © 2007 IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

1.2 Elektrowärmegeräte

Elektrowärmegeräte werden z.B. für Raumheizungen, industrielle Widerstandsöfen und Klimaanlage verwendet.

Bei Draht-Widerstandselementen kann der Einschaltstrom das 1.4-fache des Bemessungsstroms betragen. Bei der Auswahl der Schaltgeräte bezüglich des Bemessungs-Betriebsstroms ist zu beachten, dass (im Gegensatz zum Motor) bei Netzspannungserhöhung der aufgenommene Strom steigt. Beim Einsatz von Schützen ist als Gebrauchskategorie AC-1 bei Wechselstrom und DC-1 bei Gleichstrom zugrunde zu legen. Zum manuellen Schalten genügt ein Schalter mit entsprechendem Lastschaltvermögen (AC-21).

Ferner ist eine eventuell sehr hohe Umgebungstemperatur zu berücksichtigen.

Heizkreise werden vielfach einpolig betrieben. Dabei werden üblicherweise mehrpolige Schaltgeräte mit parallel geschalteten Strombahnen verwendet, womit der zulässige Belastungsstrom erhöht werden kann. Für die Belastbarkeit von Schaltgeräten mit parallel geschalteten Strombahnen siehe Abschnitt [2.4.1.1](#).

1.3 Lampen und Beleuchtungseinrichtungen

Die Geräte der Beleuchtungstechnik sind unter dem Einfluss der Energie-Effizienz und der Elektronik einem steten Wandel unterworfen. Bezüglich der Wahl der zugehörigen Schalt- (z.B. Schütze) und Schutzgeräte (z.B. Leitungsschutzschalter und Leistungsschalter) sind nicht nur die Art des Leuchtmittels selbst, sondern auch dessen Beschaltungsmittel zu berücksichtigen. Besonders die Einschaltstrombelastungen durch Kompensations-Kondensatoren und die Ladestossströme elektronischer Vorschaltgeräte sind zu beachten. Die dämpfende Wirkung langer Leitungen kann diese Beanspruchungen reduzieren.

Im Einzelfall sind die Einschalt- und Betriebsstrombelastung beim jeweiligen Hersteller zu erfragen. Die nachstehenden Ausführungen beschreiben die grundsätzlichen Charakteristiken. Siehe auch [Tab. 1.3-1](#).

Generell empfiehlt es sich, den Dauerstrom der Schaltgeräte zu max. 90 % auszunutzen, da die Stromaufnahme von Beleuchtungsmitteln typisch bei Spannungserhöhung steigt.

1.3.1 Glühlampen

Die Leuchtwendeln von Glühlampen haben kalt einen sehr kleinen ohmschen Widerstand. Dadurch entsteht beim Einschalten eine hohe Stromspitze (bis $15 \cdot I_e$). Das Einschaltvermögen

der Schaltgeräte muss also mindestens diesen Wert haben (Gebrauchskategorie AC-5b). Beim Ausschalten ist der Nennstrom abzuschalten (hoher Widerstand der heissen Leuchtwendel).

1.3.1.1 Halogenlampen

Halogenlampen als Varianten der Glühlampe haben grundsätzlich dasselbe Verhalten wie diese. Vielfach sind die Lampen selbst für Kleinspannung ausgelegt und werden via Transformator oder elektronisches Netzteil gespeist. Beim Schalten sind deren Einschaltstossströme zu berücksichtigen.

1.3.2 Entladungslampen

Entladungslampen wie Leuchtstoffröhren, Energiesparlampen, Quecksilberdampflampen, Halogen-Metallampfen oder Natriumdampflampen bedürfen jeweils einer Start- und einer Strombegrenzungs-Vorrichtung. Diese können konventionell oder elektronisch ausgeführt sein. Entladungslampen mit elektromagnetischem Vorschaltgerät weisen einen niedrigen Leistungsfaktor auf und werden deshalb in der Regel kompensiert. Die Kompensationskapazität führt zu hohen Einschaltstromstößen, die bei der Auswahl der Schaltgeräte zu berücksichtigen sind.

Elektronische Vorschaltgeräte haben meist einen hohen Leistungsfaktor (z.B. $\cos\phi \approx 0.95$), beim Einschalten entsteht jedoch ein Ladestromstoss, der das Schaltgerät entsprechend beansprucht.

Für die Auswahl der Schaltgeräte bei hohen Einschaltstromstößen ist die zulässige Bemessungsleistung für das Schalten von Kondensatoren gemäss Gebrauchskategorie AC-6b zu berücksichtigen. Um ein ungewolltes Ansprechen von Leitungsschutzschaltern beim gleichzeitigen Einschalten einer Anzahl von Leuchtstoffröhren zu vermeiden, finden sich in den Katalogen der Leuchtmittelhersteller Hinweise bezüglich der maximalen Zahl von Leuchtstoffröhren (mit Vorschaltgerät), die über einen Schutzschalter betrieben werden kann.

Lampenart, (Schaltung)	Einschalt- strom- spitze	Anlauf- zeit [min]	Anlaufstrom	cos φ	Berechnungs- grundlage für I_e
Glühlampen	$15 \cdot I_e$	-	-	1	$\leq I_{eAC-5b}$
Halogen-Lampen - Trafo-Betrieb - EVG ¹⁾ -Betrieb	$10 \cdot I_e$	-	-	0.95	siehe Abschnitt 1.4 $\leq 0.7 \cdot I_{eAC-3}$
Leuchtstofflampen (Drosselbetrieb) - unkompensiert - parallelkompensiert - DUO-Schaltung	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 20 \cdot I_e$ $\approx 2 \cdot I_e$	- - -	- - -	0.5 0.9 0.9	$\leq I_{eAC-5a}$ $\leq I_{eAC-1}, \leq I_{eAC-6b}$ $\leq I_{eAC-1}$
Leuchtstofflampen - EVG ¹⁾ -Betrieb, AC	$10 \cdot I_e$	-	-	0.9	$\leq 0.7 \cdot I_{eAC-3}$
Quecksilberdampf- Hochdrucklampen - unkompensiert - parallelkompensiert	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 20 \cdot I_e$	3 - 5 3 - 5	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 2 \cdot I_e$	0.4 - 0.6 0.9	$\leq 0.5 \cdot I_{eAC-1}$ $\leq 0.5 \cdot I_{eAC-1}, \leq I_{eAC-6b}$
Halogen- Metallampfen - unkompensiert - parallelkompensiert	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 20 \cdot I_e$	5 - 10 5 - 10	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 2 \cdot I_e$	0.4 - 0.5 0.9	$\leq 0.5 \cdot I_{eAC-1}$ $\leq 0.5 \cdot I_{eAC-1}, \leq I_{eAC-6b}$
Natriumdampf- Hochdrucklampen - unkompensiert - parallelkompensiert	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 20 \cdot I_e$	5 - 10 5 - 10	$\approx 2 \cdot I_e$ $\approx 2 \cdot I_e$	0.4 - 0.5 0.9	$\leq 0.5 \cdot I_{eAC-1}$ $\leq 0.5 \cdot I_{eAC-1}, \leq I_{eAC-6b}$
Mischlichtlampen	$\approx 1.3 \cdot I_e$	≈ 3	$\approx 1.3 \cdot I_e$	1	$\leq 0.9 \cdot I_{eAC-1}$

Tab. 1.3-1

Einschaltströme von Lampen und Auswahl-Hinweise für Schaltgeräte

¹⁾ EVG ... Elektronisches Vorschaltgerät

1.4 Transformatoren

Wird ein Niederspannungstransformator eingeschaltet, so tritt kurzfristig eine hohe Stromspitze (Rush) auf. Die durch den Felddaufbau hervorgerufenen Stossströme können bis zum 30-fachen des Transformator-Bemessungsstroms betragen. Die Einschaltstromspitzen variieren je nach Transformatortyp. Sie hängen von der Lage der Wicklung, von den Kennwerten des magnetischen Kreises und besonders vom Phasenwinkel der Spannung beim Einschalten ab. Die Schaltgeräte müssen ein entsprechend hohes Einschaltvermögen aufweisen, um ein Verschweissen der Kontakte zu verhindern.

IEC 60947-4-1 sieht für das Schalten von Transformatoren die Gebrauchskategorie AC-6a vor. Der zulässige Bemessungsbetriebsstrom I_{eT} (AC-6a) für Schalten von Transformatoren mit einem Einschalt-Rushfaktor von $n \leq 30$ kann nach IEC 60947-4-1 (Tab.7b) aus den Daten des AC-3-Schaltvermögens wie folgt bestimmt werden:

$$I_{eT30} = 0.45 \cdot I_{eAC-3}$$

Für $n \leq 30$

n = Scheitelwert des Einschaltstroms / Scheitelwert des Bemessungsbetriebsstroms

Bei grösseren Rushfaktoren gilt:

$$I_{eTn} = I_{eT30} \cdot 30 / n$$

Der Faktor « n » ist vom Transformator-Lieferanten anzugeben. Falls keine Angaben erhältlich sind, gelten für « n » folgende Richtwerte:

Transformatoren bis ca. 1 kVA	bei 230 V	$n \approx 20$
	bei 400 V	$n \approx 15$
grössere Transformatoren	bei 400 V	$n \approx 15 \dots 30$

Hinweis

Der thermische Dauerstrom $I_{th(e)}$ darf nicht überschritten werden.

Transformatoren in Schweißmaschinen sind meist so gebaut, dass sowohl die Einschaltstromspitze als auch der Kurzschlussstrom bei Elektroden-Kurzschluss begrenzt werden ($n \approx 10$). Das Schütz wird so dimensioniert, dass es diese Ströme betriebsmässig schalten kann.

Werden die einzelnen Schweiß-Stromstösse nicht durch Leistungs-Halbleiterelemente sondern ebenfalls durch das primärseitige Schütz geschaltet, ergibt sich für dieses eine hohe Schalthäufigkeit und eine sehr hohe Schaltzahl. Die Wahl des Schützes muss dann unbedingt hinsichtlich der zulässigen Schalthäufigkeit und der elektrischen Lebensdauer überprüft werden. Für die Lebensdauer kann bei begrenzter Einschaltstromspitze mit ca. 70 % der Werte bei AC-1 gerechnet werden.

1.5 Blindleistungskompensation und Schalten von Kondensatoren

1.5.1 Blindleistungskompensation

In elektrischen Netzen, in denen induktive Verbraucher (z.B. Motoren) zu- und abgeschaltet werden, verändert sich mit jeder Schaltung der Leistungsfaktor $\cos \varphi$. Die Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen (EVU) verlangen von ihren Abnehmern, dass das Verhältnis von abgenommener Wirkleistung P zu abgenommener Scheinleistung S einen bestimmten Wert nicht unterschreitet, da der Transport von Scheinleistung unwirtschaftlich ist.

Die Blindleistung von Motoren, Leuchtstofflampen mit Vorschaltgeräten und anderen induktiven Lasten wird deshalb häufig durch Zuschalten von Kondensatoren kompensiert, um die zusätzliche Belastung von Transformatoren und Leitungen durch den Blindstrom zu reduzieren.

Für die Entscheidung, ob die einzelnen Verbraucher am günstigsten individuell mit fixen Kondensatoren kompensiert werden oder ob zentrale Regeleinheiten eingesetzt werden, sind wirtschaftliche und anlagentechnische Überlegungen bestimmend. Regeleinheiten zur Zentralkompensation haben einen höheren Preis je Leistungseinheit. Berücksichtigt man jedoch, dass in den meisten Betrieben nie alle Verbraucher gleichzeitig eingeschaltet sind, kann bei Zentralkompensation oft eine geringere installierte Kondensatorleistung ausreichen.

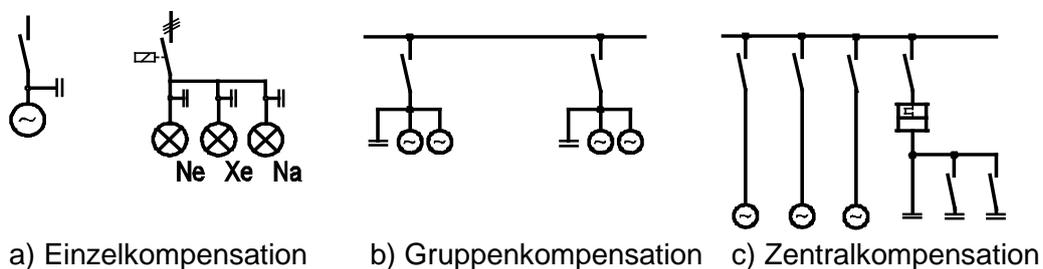


Fig. 1.5-1
Kompensationsarten

1.5.1.1 Einzelkompensation

Bei der Einzelkompensation (Fig. 1.5-1 a)) werden die Kondensatoren direkt an den Klemmen der einzelnen Verbraucher (z. B. Motor, Transformator, Induktionsheizung, Leuchtstofflampe) angeschlossen und zusammen mit diesen über ein gemeinsames Schaltgerät eingeschaltet. Einzelkompensation ist bei grossen Verbrauchern mit konstantem Leistungsbedarf und langer Einschaltdauer empfehlenswert. Sie hat den Vorteil, dass auch die Zuleitungen zu den Verbrauchern entlastet werden. Die Kondensatoren können häufig direkt an den Klemmen der einzelnen Verbraucher angeschlossen und mit einem gemeinsamen Schaltgerät ein- und ausgeschaltet werden.

Hierbei können bei Motoren die Kondensatoren vor oder hinter dem Motorschutzgerät (Fig. 1.5-2) angeschlossen werden. In der Regel wird der Kondensator unmittelbar parallel zum Motor liegen (Fall 1). In diesem Fall ist das Motorschutzgerät auf einen kleineren Einstellstrom I_e als den Motornennstrom I_N einzustellen, da die Höhe des Zuleitungsstroms dank der Kompensation sinkt:

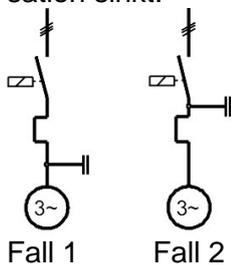


Fig. 1.5-2

Einzelkompensation von Motoren

$$I_e = (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2) \cdot I_N$$

$\cos \varphi_1$ = Leistungsfaktor des unkompensierten Motors

$\cos \varphi_2$ = Leistungsfaktor des kompensierten Motors

1.5.1.2 Gruppenkompensation

Bei der Gruppenkompensation wird die Kompensationseinrichtung jeweils einer Verbrauchergruppe zugeordnet. Diese kann aus Motoren oder auch z.B. aus Leuchtstofflampen bestehen, die gemeinsam über ein Schütz oder einen Leistungsschalter ans Netz geschaltet werden (Fig. 1.5-1 b)).

1.5.1.3 Zentralkompensation

Zur Zentralkompensation werden überwiegend Blindleistungs-Regeleinheiten eingesetzt, die direkt einem Haupt- oder Unterverteiler zugeordnet sind (Fig. 1.5-1 c)). Dies ist vor allem dann günstig, wenn viele Verbraucher mit unterschiedlichem Leistungsbedarf und wechselnder Einschaltdauer am Netz installiert sind.

Eine Zentralkompensation hat weiterhin den Vorteil, dass

- die Kompensationseinrichtung infolge ihrer zentralen Anordnung leicht überprüfbar ist,
- eine nachträgliche Installation oder Erweiterung relativ einfach ist,
- die Kondensatorleistung dem Blindleistungsbedarf der Verbrauchsmittel stets angepasst wird und
- unter Berücksichtigung eines Gleichzeitigkeitsfaktors oft eine geringere Kondensatorleistung installiert werden muss als bei der Einzelkompensation.

Siehe IEC 61921; Leistungskondensatoren - Kondensatorbatterien zur Korrektur des Niederspannungsleistungsfaktors.

1.5.2 Schalten von Kondensatoren

Kondensatoren bilden mit den Induktivitäten der Leitungen und Transformatoren Schwingkreise. Während des Einschaltens können sehr hohe Ausgleichsströme mit höheren Frequenzen fließen. Typische Werte sind 10...30-facher Kondensatornennstrom bei Frequenzen von 2... 6 kHz. Aus diesem Grund stellt das Einschalten von Kondensatoren eine sehr starke Beanspruchung für die Schaltgeräte dar und kann zu erhöhtem Kontaktabbrand oder unter ungünstigen Bedingungen sogar zum Verschweissen der Kontakte führen. Besonders beim Schalten von Kondensatoren mit Schützen ist darauf zu achten, dass sie vor dem Einschalten entladen sind, um noch höhere Ausgleichsströme und Verschweissen der Schaltkontakte bei ungünstiger Phasenlage zu vermeiden.

Ein Oberschwingungsgehalt der Netzspannung führt zu erhöhter Stromaufnahme der Kondensatoren und in der Folge zu zusätzlichen Erwärmungen der Strombahnen. Um eine allfällige unzulässige Erwärmung zu vermeiden, soll der Dauerstrom der Schütze, Lastschalter und Leistungsschalter höher liegen als der Kondensatornennstrom. Er sollte im Allgemeinen nur 70 ... 75 % des Bemessungsstromes des Leistungsschalters betragen.

Unter Berücksichtigung der oben erwähnten Tatsachen sollen die Schaltgeräte so dimensioniert werden, dass

- sie bei den hohen Einschaltströmen nicht verschweissen und
- keine unzulässige Erwärmung bei Dauerbetrieb auftritt.

1.5.2.1 Einschalten von Einzelkondensatoren

Schaltet man einen Kondensator einer bestimmten Leistung ans Netz, dann wird der Einschaltstrom hauptsächlich von der Transformatorgrösse und von der Netzimpedanz bis zu den Kondensatoren, d.h. vom prospektiven Kurzschlussstrom am Einbauort des Kondensators, bestimmt.

Die Beanspruchung der Schaltgeräte steigt mit

- grösser werdender Leistung der Kondensatoren,
- zunehmender Nennleistung und damit kleiner werdender Kurzschlussimpedanz des einspeisenden Transformators,
- abnehmender Impedanz der Anschlussleitungen.

Tabelle 7 in IEC 60947-4-1 gibt nachstehende Ableitung des Kondensatorschaltvermögens I_{eAC-6b} vom Bemessungsbetriebsstrom I_{eAC-3} in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom i_k an:

$$I_{e(AC-6b)} = i_k \cdot \frac{x^2}{(x-1)^2}$$

bei

$$x = 13.3 \cdot \frac{I_{e(AC-3)}}{i_k}$$

gültig für

$$i_k > 205 \cdot I_{e(AC-3)}$$

1.5.2.2 Schalten von langen geschirmten Leitungen

Lange geschirmte Leitungen weisen vergleichsweise grosse Kapazitäten auf und führen folglich zu Spitzenstrombelastungen bei Schaltvorgängen. Typische Anwendungen sind frequenzvariable Antriebe. Die zu erwartenden Spitzenströme sind bei der Auswahl der Schaltgeräte in gleichem Mass zu berücksichtigen wie beim Schalten von Einzelkondensatoren.

1.5.2.3 Einschalten von Kondensatoren bei Zentralkompensation

Werden einzelne Kondensatoren von Kondensatorbatterien - z.B. in Blindleistungs-Regelheiten - geschaltet, ergeben sich beim Einschalten für die Schaltgeräte besonders

ungünstige Bedingungen, da die bereits am Netz liegenden Kondensatoren eine zusätzliche Energiequelle darstellen.

Begrenzt werden die Einschaltstromspitzen durch die Impedanz im Stromkreis (Leitungen, Kondensatorinduktivität, Induktivitäten zwischen den einzelnen Kondensatorabzweigen).

Die Beanspruchung der Schaltgeräte wird deshalb bestimmt durch

- das Leistungsverhältnis der geschalteten zu den sich bereits am Netz befindlichen Kondensatoren und
- die Impedanz in den einzelnen Stromzweigen

Die schaltbare Kapazität kann zur Vermeidung allfälligen Verschweissens der Schaltkontakte von Schützen z.B. durch Zusatzinduktivitäten in den Kondensatorabzweigen (z.B. einige Windungen der Anschlussleiter) erhöht werden.

Mit speziellen Kondensatorschützen oder Kondensator-Schütz-Kombinationen, die Kapazitäten über Vorladewiderstände ans Netz schalten, erreicht man eine hohe schaltbare Kapazität und eine minimale Rückwirkung auf das speisende Drehstromnetz, da die Einschaltströme durch die Widerstände definiert begrenzt und sehr stark verringert werden.

Als Gebrauchskategorie ist in IEC 60947-4-1 AC-6b für das Schalten von Kondensatorbänken festgelegt.

1.6 Steuerstromkreise, Halbleiterlast und elektromagnetische Last

Bezüglich spezifischer Aspekte des Schaltens von Steuerstromkreisen siehe auch Abschnitt 5.

Die Gebrauchskategorien AC-12 bis AC-15 für Wechselstrom und DC-12 bis DC-14 für Gleichstrom (siehe Tab. 1.1-1) berücksichtigen die spezifische Beanspruchung der Schaltgeräte beim Schalten von Steuerstromkreisen mit Halbleiter- oder elektromagnetischer Last. Beim Schalten von Elektromagneten wie z.B. Schützspulen werden insbesondere die erhöhte Einschaltbelastung wegen des Anzugsstroms der Magnete und die erhöhte Ausschaltbelastung aufgrund der hohen Induktivität der Last berücksichtigt.

Neben dem Schaltvermögen der Kontakte im Sinne einer maximal zulässigen Belastung ist beim Schalten von Steuerstromkreisen vielfach die Kontaktsicherheit das massgebende Kriterium, d.h. die Fähigkeit eines Kontaktes oder einer Kette von Kontakten, kleine Signale sicher zu schalten. Dies ist besonders beim Zusammenwirken von Kontakten mit elektronischen Steuerungen und im Signalbereich $\leq 24 \text{ V} / \leq 20 \text{ mA}$ zu beachten (siehe auch Abschnitt 5.3.5).

1.7 Drehstrom-Asynchron-Motoren

Der Drehstrom-Asynchron-Motor - auch als Induktionsmotor bezeichnet - ist bei industriellen Antrieben der überwiegend verwendete Motortyp. Besonders in seiner Ausführung als Kurzschlussläufer-Motor dominiert er die industrielle elektrische Antriebstechnik.

1.7.1 Wirkungsweise

Die wesentlichen Funktionselemente des Drehstrom-Asynchron-Motors (siehe Fig. 1.7-1) sind der feststehende Stator oder Ständer mit einer aus dem Drehstromnetz gespeisten Dreiphasenwicklung und der umlaufende Rotor. Zwischen Stator und Rotor besteht keine elektrische Verbindung. Die Ströme im Rotor werden von der Statorseite her über den Luftspalt induziert. Stator und Rotor sind aus hochmagnetisierbarem Dynamoblech mit geringen Wirbelstrom- und Hystereseverlusten zusammengesetzt.



Fig. 1.7-1
Einblick in einen Käfigläufer-Drehstrommotor geschlossener Bauart

Schliesst man die Statorwicklung an das speisende Netz, so dient der Strom zunächst der Magnetisierung des Blechkörpers. Dieser Magnetisierungsstrom erzeugt ein Drehfeld, das mit der synchronen Drehzahl n_s umläuft.

$$n_s = 60 \cdot f / p$$

n_s = synchrone Drehzahl in min^{-1}
 f = Frequenz in s^{-1}
 p = Polpaarzahl (Polzahl/2)

Bei der kleinsten Polzahl von $2p = 2$ ergibt sich im 50 Hz-Netz die synchrone Drehzahl von $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$. Für die synchronen Drehzahlen bei anderen Polzahlen und für 50- und 60-Hz-Netze siehe [Tab. 1.7-1](#)

Polzahl	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48
$n_{s \text{ 50Hz}}$	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	188	125
$n_{s \text{ 60Hz}}$	3600	1800	1200	900	720	600	450	300	225	150

Tab. 1.7-1
Synchrone Drehzahlen im 50 - und 60 Hz – Netz

Das Drehfeld des Stators induziert in der Wicklung des Rotors eine Spannung, die darin einen Stromfluss bewirkt. Im Zusammenwirken des Drehfeldes des Stators mit den stromdurchflossenen Leitern im Rotor entsteht ein Drehmoment im Sinne der Umlaufrichtung des Drehfeldes.

Die Drehzahl des Rotors ist stets um den so genannten Schlupf s kleiner als die synchrone Drehzahl.

$$s = (n_s - n) / n_s$$

s Schlupf
 n_s synchrone Drehzahl
 n Betriebsdrehzahl

Nur aufgrund dieser Drehzahldifferenz kann im Rotor eine Spannung und damit ein Rotorstrom induziert werden, der Voraussetzung für die Entstehung des Motor-Drehmomentes ist. Der Schlupf nimmt mit dem Lastmoment zu. Sein Nennwert bei Bemessungsbelastung des Motors hängt von Rotor-Widerstand und damit von der Energie-Effizienz des Motors ab.

Die Drehmomentcharakteristik von Induktionsmotoren ist durch das Kippmoment gekennzeichnet. Das heisst, dass das Drehmoment des Motors mit zunehmender Drehzahl bis zu einem Maximalwert steigt und dann steil bis zum Wert Null bei der synchronen Drehzahl abfällt. Wird

ein Motor aus dem Nennbetrieb mechanisch über das Kippmoment hinaus belastet, so „kippt“ er, d.h. er bleibt stehen. Die Höhe des Kippmomentes ist durch den elektrischen Blindwiderstand des Motors bestimmt und damit konstruktionsbedingt. Der Schlupf, bei dem das Kippmoment auftritt, kann durch den Rotorwiderstand beeinflusst werden. Dies wird bei Schleifringläufern durch Einschalten externer Widerstände (Fig. 1.7-2 und Fig. 1.7-3) genutzt.

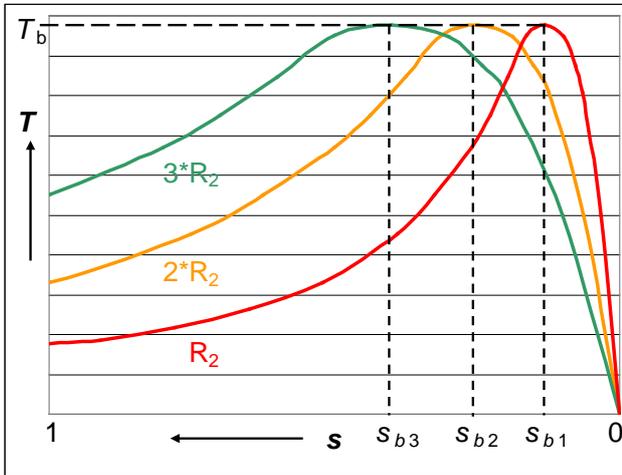


Fig. 1.7-2
Die Momentenkennlinie von Asynchron-Motoren lässt sich durch Einschalten von Widerständen in den Rotorkreis quasi strecken.

T_b Kippmoment
 s Schlupf
 s_b Kippschlupf
 R_2 Rotorwiderstand

Asynchron-Motoren verhalten sich elektrisch wie Transformatoren. Sekundärwicklung ist der Rotor und die mechanische Leistungsabgabe des Motors wirkt auf die Primärseite wie ein – variabler – Belastungswiderstand. Wird im Stillstand (zu Beginn des Anlaufs) keine mechanische Leistung abgegeben, ist dieser Belastungswiderstand Null, d.h. der Transformator quasi sekundär kurzgeschlossen. Dies führt – abhängig vom Rotor-Innenwiderstand – zu hoher bis sehr hoher Stromaufnahme des Motors beim Anlauf. Beim Schleifringläufer-Motor wird die Stromaufnahme durch Einschalten externer Widerstände reduziert und damit gleichzeitig die Momentencharakteristik der Arbeitsmaschine angepasst. Beim Kurzschlussläufermotor (Abschnitt 1.7.1.2) werden die Stromaufnahme und damit die Momentencharakteristik durch die konstruktive Gestaltung des Rotorkäfigs beeinflusst.

1.7.1.1 Schleifringläufer-Motoren

Bei Schleifringläufer-Motoren wird die Rotorwicklung auf Schleifringe geführt und mit externen Widerständen abgeschlossen. Der Widerstandswert der externen Widerstände beeinflusst die Höhe des im Rotor fließenden Stromes und den Verlauf des Drehmomentes über die Motordrehzahl.

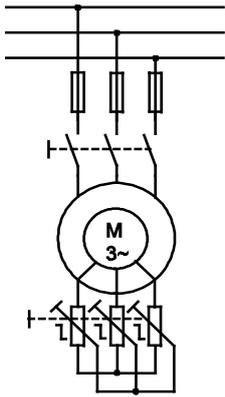


Fig. 1.7-3

Prinzipschema eines Schleifringläufer-Motors mit externen Rotorwiderständen

Schleifringläufer-Motoren stellen die konventionelle Möglichkeit dar, das Anlaufmoment (und die Stromaufnahme) durch die Wahl der Rotorwiderstände zu beeinflussen. Das höchste erzielbare Anlaufmoment entspricht dem Kippmoment des Motors. Dieses ist unabhängig von der Grösse der Rotorwiderstände. Die primäre Stromaufnahme von Schleifringläufer-Motoren ist proportional dem Rotorstrom. Dank dieser Charakteristik kann mit Schleifringläufer-Motoren ein hohes Anlaufmoment bei relativ geringer Stromaufnahme erzielt werden.

Die externen Widerstände werden für den Motoranlauf in der Regel in Stufen verändert. Im normalen Dauerbetrieb werden die Rotorwicklungen kurzgeschlossen. Bei Dimensionierung der Rotorwiderstände für Dauerbetrieb ist selbst eine dauernde Drehzahlbeeinflussung möglich, allerdings auf Kosten hoher Verlustwärme.

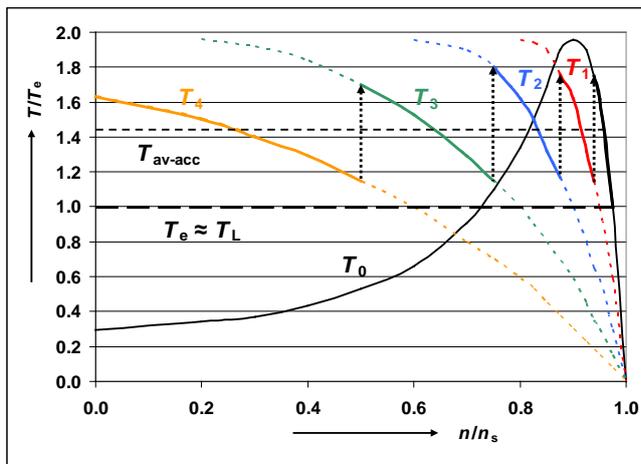


Fig. 1.7-4

Momentenverlauf eines Schleifringläufer-Motors bei Vollast-Anlauf mit stufenweiser Veränderung der Rotorwiderstände während des Anlaufs

$T_4 \dots T_1$ Motormoment beim Vorschalten der Widerstandsstufen ($R_4 > R_3 > R_2 > R_1$)

T_0 Motormoment bei kurzgeschlossenen Rotorwicklungen

T_{av-acc} Mittleres Anlaufmoment

$T_e \approx T_L$ Nennmoment entspricht Lastmoment

1.7.1.2 Kurzschlussläufer-Motoren

Der Rotor oder Läufer besteht bei Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufer aus einem genuteten zylindrischen Läuferblechpaket mit Stäben aus gut leitendem Metall (bevorzugt Aluminium), die stirnseitig durch Ringe zu einem geschlossenen Käfig verbunden sind. Der Käfig ist – zumindest bei kleineren Motoren - meist in den Rotor eingegossen.

Zur Reduktion des Anlaufstroms und Beeinflussung der Anlaufmoment-Charakteristik sind die Wicklungsstäbe speziell geformt, um im Stillstand und bei geringer Drehzahl durch Stromverdrängung einen hohen Läuferwiderstand zu bewirken. Sie sind in der Regel im Winkel zur

Drehachse geschränkt angeordnet, um Drehmomentschwankungen zu vermeiden und einen ruhigen Lauf zu erzielen.

Fig. 1.7-5 zeigt den typischen Verlauf des Momentes und des Stroms eines Kurzschlussläufer-Motors im Drehzahlbereich vom Stillstand bis zur synchronen Drehzahl. Material und konstruktive Formgebung des Käfigs beeinflussen den Verlauf der Kennlinien.

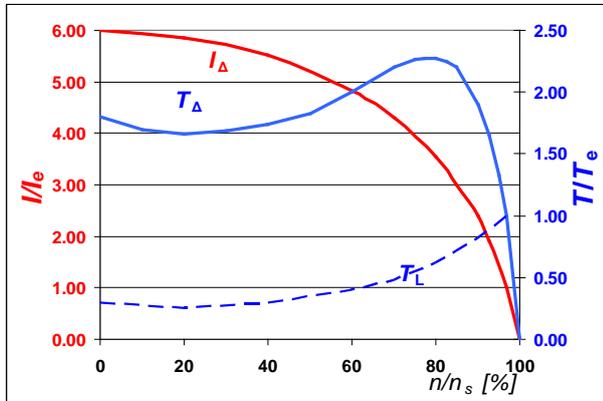


Fig. 1.7-5

Typischer Strom und Momentenverlauf eines Kurzschlussläufer-Motors zwischen Stillstand und synchroner Drehzahl.

- I_{Δ} Stromverlauf in Dreieckschaltung
- T_{Δ} Momentenverlauf in Dreieckschaltung
- T_L Lastmoment (Beispiel)

Die Betriebskennlinien (**Fig. 1.7-6**) zeigen, dass der Asynchronmotor ein so genanntes „hartes“ Drehzahlverhalten hat, d.h. die Drehzahl ändert sich nur wenig mit der Belastung. Die Stromaufnahme nähert sich bei geringer Belastung dem Wert des Leerlaufstroms, der im Wesentlichen dem Magnetisierungsstrom des Motors entspricht.

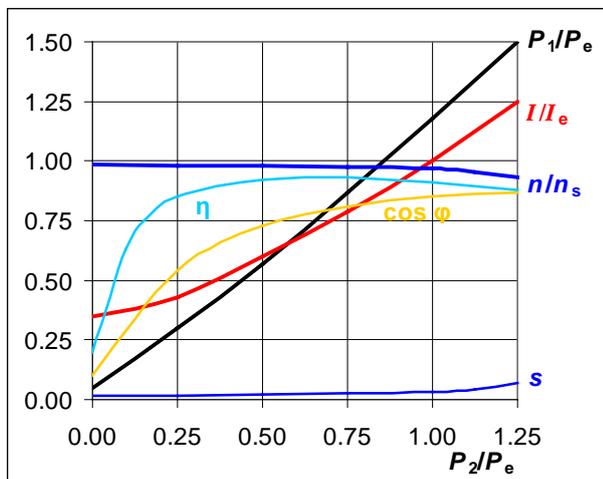


Fig. 1.7-6

Betriebsdiagramm eines Asynchronmotors in Abhängigkeit von der Belastung

- n = Drehzahl
- n_s = synchrone Drehzahl
- s = Schlupf
- P_1 = aufgenommene Leistung
- P_2 = abgegebene Leistung
- P_e = Bemessungsbetriebsleistung
- η = Wirkungsgrad
- $\cos \varphi$ = Leistungsfaktor
- I = aufgenommener Strom
- I_e = Bemessungsbetriebsstrom

- n Die Drehzahl n nimmt mit zunehmender Belastung nur leicht ab. Normale Käfiganker-motoren haben somit ein "hartes" Drehzahlverhalten.
- s Der Schlupf s nimmt mit steigender Belastung etwa proportional zu.
- $\cos \varphi$ Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ist stark von der Belastung abhängig und erreicht seinen Höchstwert erst bei Überlast. Im Teillastbereich ist er relativ ungünstig, weil die Magnetisierung praktisch konstant ist.
- η Der Wirkungsgrad η verläuft relativ flach und ist oberhalb der Halblast fast konstant. Seinen Höchstwert erreicht er im Allgemeinen unterhalb der Bemessungsbetriebsleistung P_e .
- I Der Strom I nimmt ab etwa der Halblast proportional zu. Darunter reduziert er sich weniger stark und geht dann in den Leerlaufstrom I_0 über (konstante Magnetisierung)
- P_1 Die aufgenommene Leistung P_1 nimmt ausgehend von der Leerlaufleistung etwa proportional mit der Belastung zu. Im Überlastbereich steigt sie etwas stärker an, weil die Verluste stärker zunehmen.
- T Das Drehmoment im Betriebsbereich berechnet sich wie folgt:

$$T = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \cdot 9.55}{n} [Nm]$$

U Spannung am Motor [V]

I Strom [A]

$\cos \varphi$ Leistungsfaktor

η Wirkungsgrad des Motors

n Drehzahl [min^{-1}]

Die Bemessungsbetriebsströme, Anlaufströme und der Momentenverlauf von Kurzschlussläufer-Motoren hängen u.a. von deren konstruktiver Ausführung, insbesondere vom Material und der Formgebung des Käfigs, sowie von der Polzahl ab. Im Einzelfall gelten die Angaben des Motorherstellers. Richtwerte für Motordaten finden sich in der elektronischen Dokumentation RALVET.

Für das Schalten von Asynchronmotoren sind gemäss IEC 60947 u.a. die Gebrauchskategorien AC-2 bis AC-4 definiert, um dem Anwender die Auswahl des geeigneten Schützes zu erleichtern (**Tab. 1.1-1**). Diese Gebrauchskategorien berücksichtigen die Beanspruchung der Schaltgeräte durch die erhöhten Einschaltströme beim Schalten stehender Motoren und z.B. die Tatsache, dass die effektive Abschaltspannung eines hochgelaufenen Motors nur etwa 17 % der Bemessungsbetriebsspannung beträgt, weil der Motor im Lauf eine Gegen-Elektromotorische-Kraft (Gegenspannung zur Netzspannung) entwickelt.

1.7.1.2.1 Motoren mit hohem Wirkungsgrad

Im Zuge der Anstrengungen zur Einsparung von Energie und des Umweltschutzes wurde der Wirkungsgrad von Elektromotoren zunehmend ein Thema. Dies vor dem Hintergrund, dass etwa 40% des globalen Verbrauchs an Elektrizität für den Betrieb von Elektromotoren aufgewendet wird. IEC 60034-30 (2008) definiert Klassen für den Wirkungsgrad von Universalmotoren im Leistungsbereich 0.75 ... 375 kW und mit 2, 4 oder 6 Polen (**Tab. 1.1-1**). Im englischen Sprachraum wird in diesem Zusammenhang der Begriff MEPS (Minimum Energy Performance Standards) verwendet [25]. Es wird erwartet, dass die Europäische Union für ihren Bereich die Klasse IE2 als minimale Anforderung für neue Motoren vorschreiben wird, IE3 könnte in einem weiteren Schritt folgen (allfällige Minimalvorschriften unterstehen der nationalen Gesetzgebung).

IEC Klassierung	IEC Code	EFF Code 1)	NEMA
Super Premium Efficiency	IE4		
Premium Efficiency	IE3		NEMA Premium
High Efficiency	IE2	EFF1	EPAct
Standard Efficiency	IE1	EFF2	
Below stand Efficiency	'---	EFF3	
1) CEMEP Klassierung (CEMEP = Europäisches Komitee der Hersteller von Elektromaschinen)			

Tab. 1.7-2

Wirkungsgrad-Klassen für Universalmotoren gemäss IEC 60034-30 (2008) im Vergleich zu den EFF-Codes von CEMEP und der NEMA-Klassierung. IE4 ist noch nicht definiert und für die Zukunft reserviert.

Motoren mit hohem Wirkungsgrad können erhöhte Anlaufströme entwickeln und erhöhte Schaltstromspitzen verursachen. Das Anlaufdrehmoment kann im Verhältnis zum Anlaufstrom kleiner sein, während das Kippmoment vergleichsweise höher sein kann.

Bei der Auswahl von Schaltgeräten für Motoren mit hohem Wirkungsgrad sollte bei Überlastrelais auf die Wahl der richtigen Auslöseklasse geachtet werden, da die Anlaufzeit bei gleichzeitig erhöhtem Anlaufstrom vergleichsweise länger sein kann. Beim Einsatz von (strombegrenzenden) Leistungsschaltern kann die Wahl von Schaltern mit erhöhtem Ansprechwert des magnetischen Auslösers (Leistungsschalter für Transformatorschutz) erforderlich sein, um Fehlauflösungen wegen der hohen Einschaltstromspitzen zu vermeiden.

Diese Faktoren sind insbesondere auch beim Ersatz älterer Motoren durch Motoren mit hohem Wirkungsgrad zu beachten.

Auch beim Einsatz von Softstartern kann der Anlaufstrom für ein gegebenes Anlaufmoment höher sein, so dass sich eine Überprüfung der Auslegung und Einstellung des Softstarters empfiehlt. Auch eine Überprüfung des verfügbaren Anlaufmoments in Bezug auf die Lastcharakteristik kann erforderlich sein.

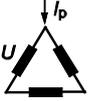
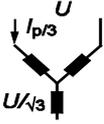
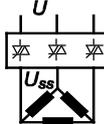
1.7.1.3 Einfluss der an den Wicklungen liegenden Spannung

Um sowohl die hohe Stromaufnahme von Kurzschlussläufer-Motoren beim Anlauf und die damit verbundene oft störende Netzbelastung zu vermindern, als auch zur Reduktion des hohen Anlaufmomentes beim Antrieb empfindlicher Maschinen, gibt es eine Anzahl von Methoden, die auf einer Reduktion der an den Motorwicklungen angelegten Spannung basieren. Eine reduzierte Spannung an einer Motorwicklung führt zu einer proportionalen Reduktion des Stroms durch die Wicklung und in Folge zu einer Reduktion des entwickelten Drehmomentes im Quadrat zur Verringerung der anliegenden Spannung. $\frac{1}{2}$ Spannung z.B. heisst also $\frac{1}{4}$ Drehmoment.

Eine Reduktion der an den Motorwicklungen liegenden Spannung kann grundsätzlich auf zweierlei Art bewirkt werden:

- Herabsetzen der Spannung am Motor bei unveränderter interner Verbindung der einzelnen Wicklungen (normal im Dreieck geschaltet). Beispiel: elektronische Sanftanlaufgeräte.
- Änderung der Verbindungen der Motorwicklungen, so dass die Spannung an den Wicklungen reduziert wird. Beispiel: Stern-Dreieck-Schaltung.

Das Verhältnis des verfügbaren Motordrehmomentes zum dabei fliessenden Motorstrom ist dabei unterschiedlich. Dies sei am Beispiel der konventionellen Stern-Dreieck-Schaltung im Vergleich zum elektronischen Sanftanlaufgerät dargestellt (Fig. 1.7-7):

				
Anlaufmethode	Direkt (Dreieck, Δ)	Y (Stern)	Sanftanlauf	
Strom im Polleiter	100 %	33 %	33 %	57 %
Drehmoment	100%	33 %	11 %	33 %
Wicklungsspannung	100%	57 %	33 %	57 %

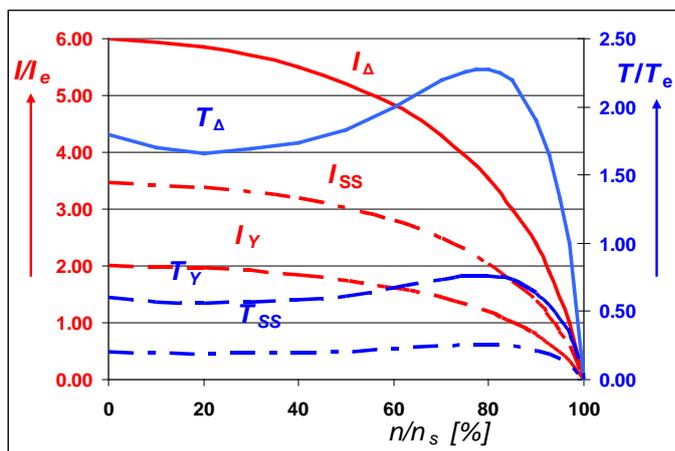


Fig. 1.7-7

Stromaufnahme und Drehmomente bei Direktanlauf (in Dreieck-Schaltung), Anlauf in Stern-Schaltung und Anlauf mithilfe eines Sanftanlauf-Gerätes durch Reduktion der Spannung an den Motorklemmen.

I_{Δ} Stromaufnahme bei Direktanlauf in Dreieck-Schaltung

T_{Δ} Drehmoment bei Direktanlauf in Dreieck-Schaltung

I_Y Stromaufnahme bei Anlauf in Stern-Schaltung

T_Y Drehmoment bei Anlauf in Stern-Schaltung

I_{SS} Stromaufnahme bei Anlauf mittels Sanftanlaufgerät bei Moment T_Y

T_{SS} Drehmoment bei Anlauf mittels Sanftanlaufgerät und gleicher Stromaufnahme wie bei Anlauf in Stern-Schaltung

Der Anlauf in Stern-Schaltung entwickelt bei gleicher Netzbelastung ein höheres Drehmoment, weil die Reduktion der Spannung an den Motorwicklungen durch eine Schaltungsänderung erfolgt. Der Wicklungsstrom ist gleichzeitig Phasenstrom, während sich beim Motor in Dreieck-Schaltung jeweils zwei Wicklungsströme (vektoriell; Faktor $\sqrt{3}$) zum Strom der speisenden Phase addieren.

Bezüglich der Belastung der Schaltgeräte und deren korrekter Auswahl beim Start und Betrieb von Kurzschlussläufer-Motoren mit Spannungsabsenkung siehe die Abschnitte 3.3, 3.4 und 3.9, die die Lösungsvarianten im Detail beschreiben.

Beim Einsatz von Sanftanlaufgeräten ist zu beachten, dass das netzseitige Schaltgerät den Eingang des Sanftanlaufgerätes schaltet, d.h. in der Regel stromlos. Der Motorstrom ist während des Anlaufs überschwingungsbehaftet, was speziell beim Einsatz elektronischer Schutzrelais zu ungewollten Auslösungen führen kann.

1.7.1.4 Verhalten des Kurzschlussläufer-Asynchronmotors bei Änderung der Frequenz

Die grundsätzliche Form der Strom- und Momentencharakteristik ist unabhängig von der Frequenz. Im untersynchronen Drehzahlbereich ($n = 0 \dots n_s$) muss die Spannung proportional zur Frequenz reduziert werden, um den magnetischen Fluss konstant zu halten und Sättigung der Eisenkreise zu vermeiden. Damit bleibt in diesem Bereich die Höhe des Kippmomentes in etwa konstant. Motoren, die länger mit niedrigen Drehzahlen betrieben werden, müssen wegen der abnehmenden Wirkung der Eigenbelüftung fremdbelüftet werden.

Wird die Frequenz über die Netzfrequenz erhöht, so steht in der Regel seitens des Frequenzumformers eine konstante Spannung zur Verfügung. Damit ergibt sich eine Schwächung des magnetischen Feldes mit zunehmender Frequenz und als Folge eine Reduktion des Kippmomentes mit dem Quadrat der Frequenz. Bis zur maximalen Drehzahl können solche Antriebe typisch mit konstanter Leistungsabgabe betrieben werden.

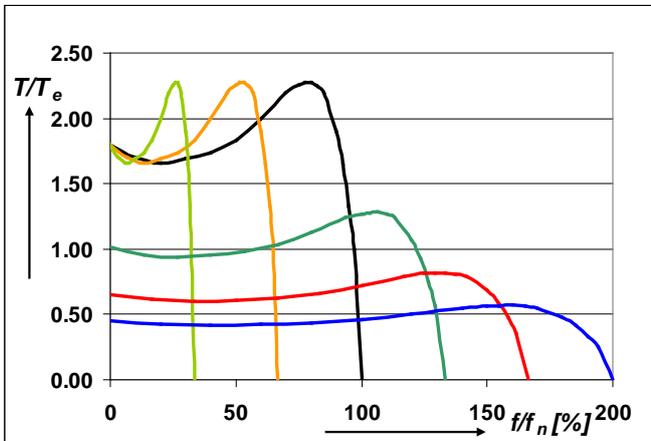


Fig. 1.7-8
 Typischer Momentenverlauf bei Variation der Frequenz.
 Spannung proportional zur Frequenz im Bereich $0 \dots f_n$
 Spannung konstant im Bereich $> f_n$

Bei der Auswahl von netzseitigen Schalt- und Schutzgeräten ist zu beachten, dass Frequenzumrichter eingangsseitig gesteuerte oder ungesteuerte Gleichrichter-Schaltungen mit grossen Speicherkapazitäten aufweisen. Dies führt zu hohen Ladestromstössen und zu einem hohen Oberschwingungsgehalt des Stromes.

2 Schaltaufgaben und anwendungsgerechte Auswahl der Schaltgeräte

Die Auswahl und der Einsatz elektrischer Betriebsmittel für Schaltgerätekombinationen und Maschinensteuerungen sind jeweils durch die lokale Gesetzgebung geregelt. Für den Bereich der Europäischen Union (EU) stützen sich die Regelungen auf die Normen der CENELEC (EN-Normen), die weitgehend mit den IEC-Normen identisch sind. Die Normen der IEC sind auch Basis der gültigen Vorschriften in einer Grosszahl weiterer Länder. Im nordamerikanischen Raum sind die Standards von UL bzw. CSA sowie die Richtlinien von NEMA, NEC etc. anzuwenden. Alle diese Normen und Vorschriften haben das gemeinsame Ziel, die Sicherheit elektrischer Einrichtungen zu gewährleisten.

2.1 Normenkonforme und applikationsgerechte Betriebsmittel

Die Vorschriften IEC 60439-1 (Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen) und IEC 60204-1 (Elektrische Ausrüstung von Maschinen) fordern unter anderem, dass die Betriebsmittel den für sie geltenden Normen entsprechen müssen. Das heisst, dass Niederspannungs-Schaltgeräte gemäss den Forderungen von IEC 60947 gebaut und geprüft sein müssen. Weiter müssen die Betriebsmittel bezüglich der äusseren Bauform, der Bemessungs-Spannungen, der Bemessungs-Ströme, der Lebensdauer, des Ein- und Ausschaltvermögens, der Kurzschlussfestigkeit usw. für den betreffenden Anwendungsfall geeignet sein. Allenfalls sind strombegrenzende Schutzeinrichtungen zum Schutz von Betriebsmitteln einzusetzen. Die Zuordnung von Betriebsmitteln, z.B. die Zuordnung von Motorstartern zu Kurzschlusschutzeinrichtungen muss den dafür gültigen Normen entsprechen. Bei der Auswahl von Betriebsmitteln müssen die Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit und die erzeugten Schaltüberspannungen berücksichtigt werden.

Entsprechend diesen Regelungen müssen alle Geräte, die in Verkehr gebracht werden, die für sie gültigen Normen erfüllen. Für den Raum der EU und des EWR wird dies mit einer Konformitätserklärung des Herstellers und dem CE-Zeichen auf den Geräten bestätigt. Die gleiche Regelung gilt auch für die Schweiz, ausgenommen, dass dort das CE-Zeichen nicht vorgeschrieben (aber zugelassen) ist. Andere Länder führen eigene Zulassungsverfahren und Approbations-Zeichen (z.B. China: CCC; Australien und Neuseeland: C-tick für EMV-Kompatibilität elektronischer Produkte).

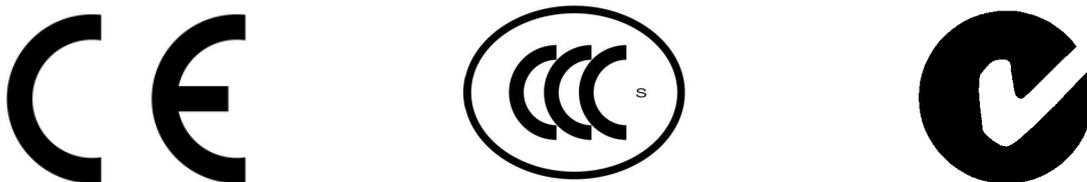


Fig. 2.1-1

CE-Zeichen für den Markt der Europäischen Union EU (links), CCC-Zeichen für China (Mitte) und C-tick-Zeichen für Australien und Neuseeland

Für spezielle Anwendungsbereiche wie z.B. Schifffahrt, Bahnen oder Anwendungen in explosionsgefährdeter Umgebung gelten vielfach spezifische Vorschriften, die in der Regel Zusatzforderungen zu den Basis-IEC-Vorschriften enthalten.

Im Übrigen finden sich in den Katalogen Angaben, nach welchen Normen und Vorschriften die Geräte gebaut und geprüft sind. Für Niederspannungs-Schaltgeräte (Schütze, Motorstarter, Leistungsschalter, Lastschalter etc.) sind dies für den Raum ausserhalb Nordamerikas im Wesentlichen die verschiedenen Teile der IEC 60947.

Ein Gerät erfüllt nach IEC 60947-1 die Trenneigenschaft, wenn es in der Stellung "Offen" eine Trennstrecke sicherstellt, mit der die festgelegte Spannungsfestigkeit zwischen den offenen Kontakten des Hauptstromkreises des Schaltgerätes erfüllt ist. Es muss ferner mit einer Anzeigevorrichtung bezüglich der Stellung der beweglichen Schaltstücke ausgestattet sein. Diese Schaltstellungsanzeige muss auf sichere Art und Weise mit dem Betätigungselement verbunden sein, wobei das Betätigungselement als Schaltstellungsanzeige dienen kann, vorausgesetzt, es kann in "AUS"-Stellung nur dann die Position "Offen" anzeigen, wenn alle beweglichen Schaltstücke in der Position "Offen" sind. Dies wird durch eine spezielle Prüfung sichergestellt.

Ein Trennschalter muss gemäss IEC 60947-3 einen Stromkreis nur öffnen und schliessen können, wenn entweder nur ein Strom von vernachlässigbarer Grösse aus- oder eingeschaltet wird oder wenn beim Schalten keine merkliche Spannungsdifferenz zwischen den beiden Anschlüssen jeder Strombahn auftritt. Er kann unter normalen Bedingungen Betriebsströme sowie unter aussergewöhnlichen Bedingungen grössere Ströme (z.B. Kurzschlussströme) während einer bestimmten Dauer führen.

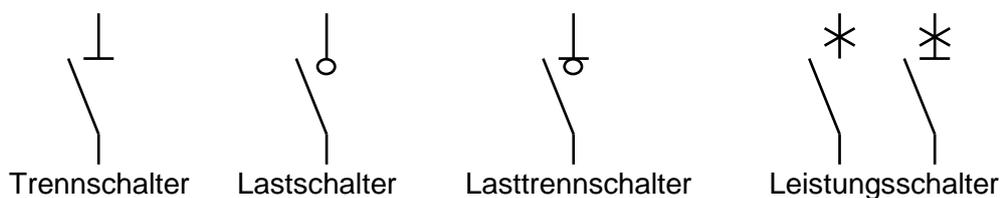


Fig. 2.2-2

Schaltsymbole

Der waagrechte Strich im Schaltsymbol der Kontakte weist auf die Trenneigenschaft hin

Die Trennerfunktion kann in verschiedenen Geräten realisiert werden wie z.B. in Trennschaltern, Sicherungstrennschaltern, Lasttrennschaltern, Sicherungslasttrennschaltern und Leistungsschaltern mit Trennfunktion.

2.2.1.2 Lastschalter

Lastschalter sind mechanische Schaltgeräte, die Ströme unter normalen Bedingungen im Stromkreis einschliesslich einer angegebenen betriebsmässigen Überlast einschalten, führen und ausschalten und auch unter angegebenen aussergewöhnlichen Bedingungen, wie Kurzschluss, während einer festgelegten Zeit führen können.

Ein Lastschalter kann ein Kurzschluss-Einschaltvermögen, jedoch kein Kurzschluss-Ausschaltvermögen haben (IEC 60947-1 und -3). Kurzschlussströme können geführt (hohe Kurzschlussfestigkeit), nicht aber abgeschaltet werden.

Für Lastschalter gilt eine ähnliche Vielfalt der Ausführung wie für Trennschalter, z.B. „normale“ Lastschalter, Sicherungslastschalter, Leistungsschalter. Sicherungslastschalter sind nicht in allen Ländern zugelassen.

2.2.1.3 Lasttrennschalter

Lasttrennschalter vereinigen die Eigenschaften von Lastschaltern und Trennschaltern.

Auch hier gibt es verschiedene Ausführungsformen wie „normale“ Lasttrennschalter, Sicherungslasttrennschalter und Leistungsschalter. Sicherungslasttrennschalter sind nicht in allen Ländern zugelassen.

2.2.1.4 Leistungsschalter

Siehe auch Abschnitt 4.2.2. Leistungsschalter sind mechanische Schaltgeräte, die Ströme unter Betriebsbedingungen im Stromkreis einschalten, führen, ausschalten und auch unter festgelegten aussergewöhnlichen Bedingungen, wie Kurzschluss, einschalten, während einer festgelegten Zeit führen und ausschalten können (IEC 60947-2). Sie erfüllen damit auch die Anforderungen an Lastschalter. Vielfach sind Leistungsschalter so ausgelegt, dass sie auch die Anforderungen an Trennschalter erfüllen.

2.2.1.5 Hauptschalter

IEC 60204-1 (Maschinensicherheit – Elektrische Ausrüstung von Maschinen) schreibt einen Hauptschalter für jeden Einspeisepunkt vor, der die Maschine oder das Gerät vollständig vom Netz oder von maschinen-internen Stromversorgungen trennt, damit Reinigungs-, Unterhalts- oder Reparaturarbeiten durchgeführt werden können oder wenn die Maschine für längere Zeit ausser Betrieb gesetzt wird.

- Ein Hauptschalter muss als Lasttrennschalter nach IEC 60947-3 ausgelegt sein (Lastschalter mit Trennfunktion) und mindestens die Forderungen der Anwendungskategorie AC-23B oder DC-23B erfüllen. Trennschalter sind zulässig, wenn über Hilfsschalter Lastabwurf vor dem Trennen sichergestellt ist. Auch Leistungsschalter mit Trennfunktion oder andere Schaltgeräte mit Trennfunktion und Motorschaltvermögen können als Hauptschalter eingesetzt werden, soweit sie den zutreffenden IEC-Standards entsprechen.
- Ein Hauptschalter muss manuell betätigt werden und eindeutige "AUS"- und "EIN"-Stellungen haben, die deutlich mit „O“ bzw. „I“ markiert sind.
- Ein Hauptschalter muss entweder eine sichtbare Trennstelle oder eine deutliche Anzeige der Schalterstellung haben, die nur "AUS" anzeigen kann, nachdem die Kontaktabstände gemäss IEC 60947-3 erreicht worden sind.
- Sofern der Hauptschalter nicht gleichzeitig als NOT-AUS-Schalter dient, darf er keinen roten Griff haben (Vorzugsfarben schwarz oder grau).
- Es muss möglich sein, die Handhabe in der "AUS"-Stellung mit einem Schloss (z.B. Vorhängeschloss) zu verriegeln.
- Die speiseseitigen Klemmen von Hauptschaltern müssen mit einer Berührungsschutz-Abdeckung mit einem Warnschild versehen sein.

Falls erforderlich dürfen Hauptschalter mit einer Vorrichtung zur Verriegelung einer Tür versehen sein.

Die Versorgung der nachstehenden Stromkreise muss nicht unbedingt über den Hauptschalter geschaltet sein:

- Lichtkreise, die bei Unterhaltsarbeiten benötigt werden
- Steckdosen, die ausschliesslich für Servicegeräte wie Bohrmaschinen benutzt werden.

Die Anforderungen an Hauptschalter können von Lasttrennschaltern, Sicherungslasttrennschaltern und Leistungsschaltern erfüllt werden.

2.2.1.6 Haupt-NOT-AUS-Schalter

Bei Gefahr für Mensch oder Maschine müssen gefährliche Teile der Maschine oder die ganze Maschine durch Betätigung einer NOT-AUS-Vorrichtung möglichst rasch vom Netz getrennt und zum Stillstand gebracht werden. Gemäss IEC 60204-1 sind Hauptschalter als lokale NOT-AUS-Vorrichtung zugelassen, wenn sie für das Bedienungspersonal gut zugänglich sind. Nachstehende Bedingungen müssen zusätzlich erfüllt sein:

- Für die Funktion als NOT-AUS-Schalter muss die Handhabe rot auf gelbem Hintergrund sein.
- Der Schalter muss imstande sein, den Blockierstrom des grössten angeschlossenen Motors plus die Summe der Nennströme der übrigen Lasten gleichzeitig zu unterbrechen.
- Er muss imstande sein, den totalen Nennbetriebsstrom sämtlicher angeschlossener Geräte zu führen.
- Der NOT-AUS-Schalter darf diejenigen Stromkreise nicht unterbrechen, die zu einer Gefährdung des Personals oder der Maschine führen könnten, wenn sie unterbrochen würden.

2.2.1.7 Zusammenfassung Haupt- und Haupt-NOT-AUS-Schalter

Anforderungen an Hauptschalter (nach IEC 60204-1)	Haupt- schalter	Haupt-NOT- AUS- Schalter
Betätigungselemente:		
- Schwarze oder graue Handhabe	ja	nein
- Rote Handhabe und gelber Hintergrund	nein	ja
- Abschliessbar	ja	ja
Handbetätigung von aussen	ja	ja
Leicht zugänglich	ja	ja
Nur eine "EIN" und "AUS" Position	ja	ja
Stellungsanzeige nur "O" und "I"	ja	ja
Abschliessbar in "O"-Stellung von aussen	ja	ja
Berührungsgeschützte Eingangsklemme mit Warn-Symbol	ja	ja

Tab. 2.2-1

Übersicht über die Anforderungen an Lastschalter für die Verwendung als Hauptschalter und Haupt-NOT-AUS-Schalter

2.2.1.8 Sicherungen

Sicherungen haben ein Kurzschluss-Ausschaltvermögen und sind in Form von Ganzbereichs-Sicherungen auch für den Überlastschutz von Leitungen und gewisser Lasten geeignet. Für Details siehe Abschnitt 4.2.1.

2.2.1.9 Geräte für den thermischen Schutz

Siehe Abschnitte 4.1.2, 4.2 und 4.2.4.

Geräte für den thermischen Schutz teilen sich in zwei Gruppen:

- Geräte, die die Evaluation der thermischen Gefährdung des Schutzobjektes und die Schutzabschaltung in einer Baueinheit umfassen (z.B. Ganzbereichssicherungen, Leitungsschutzschalter, Leistungsschalter, Motorschutzschalter, elektronische Motorsteuergeräte mit integriertem Motorschutz) und
- Geräte, die ausschliesslich der Evaluation der thermischen Gefährdung des Schutzobjektes dienen, zur Schutzabschaltung aber ein Leistungsschaltgerät (meist ein Schütz) ansteuern. Dies sind z.B. Überlastrelais und Thermistor (PTC)-Auslösegeräte.

2.2.1.10 Schütze

Schütze sind für betriebsmässiges Schalten konzipiert und haben entsprechend der Forderung nach hoher mechanischer und elektrischer Lebensdauer relativ geringe Kontaktkräfte. Demgemäss haben sie kein Kurzschluss-Schaltvermögen und müssen gegen die Auswirkungen von Kurzschlussströmen durch vorgeschaltete Kurzschlusschutz-Einrichtungen geschützt werden. Siehe Abschnitt 2.3.4.5.

2.3 Parameter für die korrekte Auswahl und Bemessung

Für den spezifischen Einsatz von Niederspannungs-Geräten sind weitere Parameter zu berücksichtigen wie z.B. die Einsatz-Umgebungstemperatur, die erwartete Geräte-Lebensdauer, allfällige Einflüsse von Feuchtigkeit, Schock und Vibration etc, um nur einige zu nennen. Tab. 2.3-1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Parameter, die bei der Geräteauswahl zu beachten sind. Nachstehend wird auf die einzelnen Merkmale näher eingegangen.

Parameter	Details Kapitel	Trennschalter	Sicherung	Leistungsschalter	Lastschalter	Schutz Starter
Bemessungs-Isolationsspannung U_i	2.3.1	P	P	P	P	P
Bemessungs-Betriebsspannung $U_e (<U_i)$	2.3.2	P	P	P	P	P
Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit U_{imp}	2.3.3	P		P	P	P
Bemessungs-Betriebsstrom I_e	2.3.2	P	P	P	P	P
Gebrauchskategorie	2.3.2	P		P	P	P
Kurzschlussfestigkeit / Kurzschluss-Schutz	2.3.4	P			P	P
Bemessungs-Kurzschlusseinschaltvermögen I_{cm}	2.3.4.6.1			P	P	
Bemessungs-Kurzschlussausschaltvermögen I_{cu}, I_{cs}	2.3.4.6.2		P	P		
Durchlassstrom	2.3.4.2 2.3.4.4		K	K		
Durchlassenergie (Joule-Integral)	2.3.4.1 2.3.4.4		K	K		
Bemessungs- Kurzzeitstrom I_{cw}	2.3.4.3	K		K	K	
Kurzschlusskoordination (Typ1, Typ2) mit Sicherung oder Leistungsschalter	2.3.4.5.2					P
Thermische Belastung	2.3.5	P		P	P	P
Umgebungstemperatur	2.3.5.1	K	K	K	K	K
Betriebsmässige Überströme (z.B. Schweranlauf)	2.3.5.2	K	K	K	K	K
Lebensdauer	2.3.6				K	K
Schalhäufigkeit	2.3.7				K	K
Bemessungs-Frequenz / Oberschwingungen	2.3.8 2.4.3	K	K	K	K	K
Sicherheitsabstände	2.3.9			P	P	P
Einbaulage	2.3.10			K		K
Verschmutzungsgrad	2.3.3	Z	Z	Z	Z	Z
Überspannungskategorie	2.3.3	Z	Z	Z	Z	Z
Schutztrennung	2.3.11	Z	Z	Z	Z	Z
Aufstellungshöhe	2.3.12	Z	Z	Z	Z	Z
Schock und Vibration	2.3.13	Z	Z	Z	Z	Z
Feuchte / klimatische Beanspruchung		Z	Z	Z	Z	Z
Chemische Umgebungseinflüsse		Z	Z	Z	Z	Z
Radioaktive Strahlung		Z	Z	Z	Z	Z
UV-Strahlung		Z	Z	Z	Z	Z
Äussere Bauform / IP-Schutzgrad		Z	Z	Z	Z	Z

Tab. 2.3-1

Auswahlkriterien von Niederspannungs-Schaltgeräten für Hauptstromkreise

P ... Primäre Auswahlfaktoren

K ... Komplementäre Auswahlfaktoren

Z ... Zusatzkriterien

2.3.1 Bemessungs-Isolationsspannung U_i

U_i ist die Spannung, nach der die Kriechstrecken elektrischer Betriebsmittel bemessen sind und auf die sich die dielektrischen Tests beziehen. U_i muss stets grösser als (oder mindestens gleich gross wie) die Spannung sein, die an die Stromkreise der Betriebsmittel angelegt wird und ist damit stets grösser als oder gleich gross wie die Bemessungs-Betriebsspannung U_e . Mit der Wahl von U_e ist damit U_i (in der Verantwortung des Geräteherstellers) korrekt gewählt, wobei Verschmutzungsgrad und Überspannungskategorie zu berücksichtigen sind.

2.3.2 Bemessungs-Betriebsspannung U_e , Bemessungs-Betriebsstrom I_e und Gebrauchskategorie

Die Bemessungs-Betriebsspannung U_e ist stets im Zusammenhang mit einem zugehörigen Bemessungs-Betriebsstrom I_e und einer zugehörigen Gebrauchskategorie zu verstehen. Diese drei Grössen bestimmen die Eignung eines Betriebsmittels für eine bestimmte Anwendung. Für Gebrauchskategorien siehe Abschnitt 1.1.

Entsprechend der universellen Einsetzbarkeit kann einem Betriebsmittel eine Mehrzahl von Datensätzen zugeordnet sein (z.B. I_{eAC-3} für verschiedene Betriebsspannungen oder I_{eAC-3} und I_{eAC-4} für eine bestimmte Betriebsspannung). Gebräuchliche Werte von Bemessungs-Betriebsspannungen für Schaltgeräte sind aus Tab. 2.3-2 ersichtlich. Bei Drehstromsystemen gilt hierbei die Dreiecksspannung des Netzes.

Steuerspannungen		Versorgungsspannungen für Lastkreise in 4- oder 3-Leiter Drehstrom-Systemen	
Gleich-Spannung V	Wechsel-Spannung V	50 Hz V	60 Hz V
6	6		
12	12		
24	24		
36			
48	48		
60			
72			
96			
110	110		120/208
220	230	230/400	240
			277/480
440		400/690	347/600
			600
		1000	

Tab. 2.3-2

Bevorzugte Nennspannungen für Versorgungssysteme gemäss IEC 60038 ed. 6.2 und industrieller Praxis (L-N/L-L). Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

2.3.3 Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit U_{imp}

Die Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit U_{imp} ist ein Mass für die dielektrische Festigkeit. Aus Sicht des Anwenders ist sie von Bedeutung, weil die erforderliche dielektrische Festigkeit u.a. vom Verschmutzungsgrad des Einsatzortes und der Überspannungskategorie, d.h. der Nähe zum speisenden Netz abhängt. Bezüglich Verschmutzungsgrad siehe Tab. 2.3-3.

Tab. 2.3-4 zeigt auszugsweise aus Tabelle H.1 von IEC 60947-1 Anhang H den Einfluss der Überspannungskategorie auf die anzuwendende Stossspannungsfestigkeit U_{imp} . Die Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit ist u.a. bei Leistungsschaltern von Bedeutung, die vielfach auf dem Verteilniveau oder auch dem Einspeisungs-Niveau eingesetzt sind.

6.1.3.2 Verschmutzungsgrad

Der Verschmutzungsgrad bezieht sich auf die Umgebungsbedingungen, unter denen das Gerät arbeiten soll.

Anmerkung: Die Mikroumgebung der Kriech- oder Luftstrecken, und nicht die Umgebung des Gerätes, bestimmt die Auswirkungen auf die Isolierung. Die Mikroumgebung kann besser oder schlechter als die Umgebung des Gerätes sein. Sie umfasst alle Einflüsse auf die Isolierung, wie z.B. Klima, elektromagnetische Felder, Entstehung von Verschmutzung usw.

Für Geräte, die für die Verwendung in einem Gehäuse vorgesehen sind oder die ein integriertes Gehäuse haben, gilt der Verschmutzungsgrad der Umgebung im Gehäuse.

Zur Bewertung von Luftstrecken und Kriechstrecken dienen folgende vier Verschmutzungsgrade in der Mikroumgebung. (Den verschiedenen Verschmutzungsgraden entsprechende Luft- und Kriechstrecken sind in den Tabellen 13 und 15 (von IEC 60947-1) angegeben.)

Verschmutzungsgrad 1:

Keine oder nur trockene, nichtleitende Verschmutzung.

Verschmutzungsgrad 2:

Üblicherweise nur nichtleitende Verschmutzung. Es muss jedoch gelegentlich mit einer zeitweiligen Leitfähigkeit durch Betauung gerechnet werden.

Verschmutzungsgrad 3:

Leitende Verschmutzung oder trockene, nichtleitende Verschmutzung, die durch Betauung leitfähig wird.

Verschmutzungsgrad 4:

Verschmutzung, die dauernde Leitfähigkeit, z.B. aufgrund von leitendem Staub, Regen oder Schnee, hervorruft.

Norm-Verschmutzungsgrad für in der Industrie verwendete Geräte:

Wenn in der jeweiligen Gerätenorm nichts anderes angegeben ist, gilt für in der Industrie verwendete Geräte der **Verschmutzungsgrad 3**. Es dürfen jedoch auch andere Verschmutzungsgrade entsprechend dem einzelnen Einsatz oder der Mikroumgebung angewendet werden.

Anmerkung: Der Verschmutzungsgrad der Mikroumgebung des Gerätes kann durch Einbau des Gerätes in ein Gehäuse beeinflusst werden.

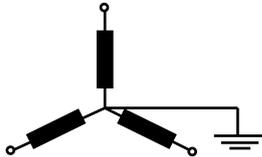
Norm-Verschmutzungsgrad für Geräte im Hausgebrauch und ähnliche Zwecke verwendete Geräte:

Wenn in der jeweiligen Gerätenorm nichts anderes angegeben ist, gilt für Geräte im Hausgebrauch und ähnliche Zwecke verwendete Geräte der **Verschmutzungsgrad 2**.

Tab. 2.3-3

Verschmutzungsgrad nach IEC 60947-1 ed.5.0.

Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Grösste Bemessungs-Betriebsspannung gegen Erde	Nennspannung des Systems (\leq der Bemessungs-Isolationsspannung der Betriebsmittel) Effektivwert Wechselspannung V	Vorzugswerte der Bemessungs-Stossspannung (1.2/50 μ s) auf 2000 m Seehöhe kV			
		Überspannungskategorie			
Effektivwert Wechselspannung oder Gleichspannung V		IV	III	II	I
		Versorgungssystemniveau (Einspeisung)	Verteilungssystemniveau	Lastniveau (Installationsbereich)	besonders geschütztes Niveau
300	220/380, 230/400, 240/415, 260/440, 277/480	6	4	2.5	1.5
600	347/600, 380/660, 400/690, 415/720, 480/830	8	6	4	2.5
1000	-	12	8	6	4

Tab. 2.3-4

Zusammenhang zwischen Nennspannung des Versorgungssystems und Bemessungs-Stossspannungsfestigkeit des Gerätes bei Schutz durch Überspannungsableiter nach IEC 60099-1
Auszug aus Tabelle H.1 von IEC 60947-1 ed. 5.0 Anhang H
Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

2.3.4 Kurzschlussfestigkeit und Kurzschlusschutz

Siehe auch Abschnitt 4.1.3.

Ein ausreichender Schutz gegen die Folgen eines Kurzschlusses zählt zu den grundlegenden Sicherheitsmassnahmen in elektrischen Anlagen. Dies betrifft sowohl den Schutz von Personen wie auch den Schutz von Sachwerten. Aus betrieblichen Gründen ist oft erwünscht, dass Geräte Kurzschlüsse weitgehend unbeschadet überstehen, um eine rasche Wieder-Inbetriebnahme zu ermöglichen. Darauf bezieht sich auch die Festlegung von Zuordnungsarten für Starter.

Die Kurzschlussfestigkeit von Betriebsmitteln wird in der Regel durch Angabe des grössten zulässigen Kurzschlusschutzorgans definiert (z.B. zulässige Sicherung oder zulässiger Leistungsschalter). Strombegrenzende Sicherungen und moderne strombegrenzende Leistungsschalter tragen wesentlich zu einer wirtschaftlichen Gerätedimensionierung bei, da sie die Beanspruchung nachgeschalteter Geräte und Einrichtungen thermisch und dynamisch stark reduzieren.

Die Beanspruchung im Kurzschlussfall wird durch das Joule-Integral (I^2t -Wert), den Durchlassstrom (I_D) und den Kurzzeitstrom (I_{cw}) beschrieben.

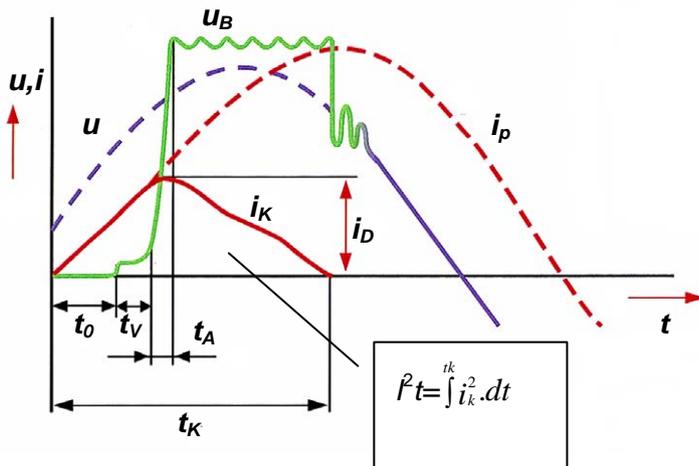


Fig. 2.3-1

Grundsätzlicher Verlauf von Strom und Spannung bei einer Kurzschluss-Abschaltung mit einem strombegrenzenden Leistungsschalter

u	Systemspannung
u_B	Lichtbogenspannung
i_p	prospektiver Stosskurzschlussstrom
i_K	begrenzter Kurzschlussstrom
i_D	Durchlassstrom
t_0	Eigenzeit
t_V	Lichtbogenverharrzeit
t_A	Anstiegszeit
t_K	Gesamt-Abschaltzeit

2.3.4.1 Joule-Integral $\int i^2 \cdot t$

Der $\int i^2 \cdot t$ -Wert ist ein Mass für die thermische Beanspruchung der im Kurzschlusskreis liegenden Betriebsmittel. Sicherungen und strombegrenzende Leistungsschalter begrenzen den Kurzschlussstrom auf Werte wesentlich unterhalb des unbeeinflussten Stroms und reduzieren damit die thermische Beanspruchung der im Kurzschlusskreis liegenden Geräte, z.B. des Kontaktsystems eines nachgeschalteten Schützes. Es gilt die Regel, dass das Joule-Integral des Kurzschlusschutzorgans kleiner sein muss als der zulässige $\int i^2 \cdot t$ -Wert der Leitung und des zu schützenden Betriebsmittels.

2.3.4.2 Durchlassstrom I_D

Der Durchlassstrom ist der grösste Augenblickswert des Stromes, den ein strombegrenzendes Kurzschlusschutzorgan durchlässt. Da die Kraftwirkung des elektrischen Stromes von dessen Quadrat abhängt, ist der Durchlassstrom entscheidend für die erforderliche mechanische Robustheit nachgeschalteter Betriebsmittel. Dies ist besonders für die Dimensionierung von Sammelschienensystemen (Anzahl und Robustheit der Abstützungen) von Bedeutung. IEC 60439 trägt diesem Umstand Rechnung, in dem sie für Durchlassströme ≤ 17 kA auf den Nachweis der Kurzschlussfestigkeit verzichtet.

2.3.4.3 Bemessungs-Kurzzeitstrom I_{cw}

Wie das Joule-Integral ist der Bemessungs-Kurzzeitstrom I_{cw} ein Mass für die thermische Belastbarkeit. Er ist für Leistungsschalter der Kategorie B (geeignet für Selektivität) wichtig und wird in der Regel als 1s-Strom (Vorzugswerte nach IEC 60947-2 sind 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 und 1s) angegeben. Eine Umrechnung von I_{cw} -Strömen für andere Zeiten ist nach der Beziehung

$$I_{cw1}^2 \cdot t_1 = I_{cw2}^2 \cdot t_2 = \text{const.}$$

zulässig.

Der I_{cw} -Wert kommt zur Anwendung, wenn aus Selektivitätsgründen die Ausschaltung von Leistungsschaltern verzögert wird. Die im Kurzschlusskreis liegenden Leistungsschalter müssen

den Kurzschlussstrom bis zum Ablauf der Verzögerungszeit führen können und anschliessend allenfalls den Kurzschluss abschalten. Für Leistungsschalter mit $I_n \leq 2500 \text{ A}$ verlangt IEC 60947-2 ein $I_{CW} \geq 12 \cdot I_n$, mindestens 5 kA. Für $I_n > 2500 \text{ A}$ werden $I_{CW} \geq 30 \text{ kA}$ vorgeschrieben.

2.3.4.4 Strombegrenzende Schutzeinrichtungen

Falls die Kurzschlussfestigkeit elektrischer Betriebsmittel geringer ist als der unbeeinflusste Kurzschlussstrom am Einbauort, muss ihre Beanspruchung im Fall eines Kurzschlusses durch vorgeschaltete strombegrenzende Schutzeinrichtungen auf das zulässige Mass reduziert werden. Als solche kommen Sicherungen oder strombegrenzende Leistungsschalter in Frage.

Die I^2t - und i_D -Werte dieser Schutzeinrichtungen werden - üblicherweise in Diagrammen - als Funktion des unbeeinflussten Kurzschlussstroms I_{cp} angegeben (siehe Beispiel Fig. 2.3-2). Es ist zu beachten, dass diese Grössen von der Betriebsspannung abhängen. Für Sicherungen findet man in den Diagrammen Grenzlinien für den Durchlassstrom bei grösstem und bei fehlendem Gleichstromglied (siehe Beispiel Fig. 2.3-3). Da der Zeitpunkt des Eintretens eines Kurzschlusses zufällig ist, ist für die Dimensionierung der Durchlassstrom bei grösstem Gleichstromglied (d.h. ungünstigster Zeitpunkt des Eintretens des Kurzschlusses) massgebend.

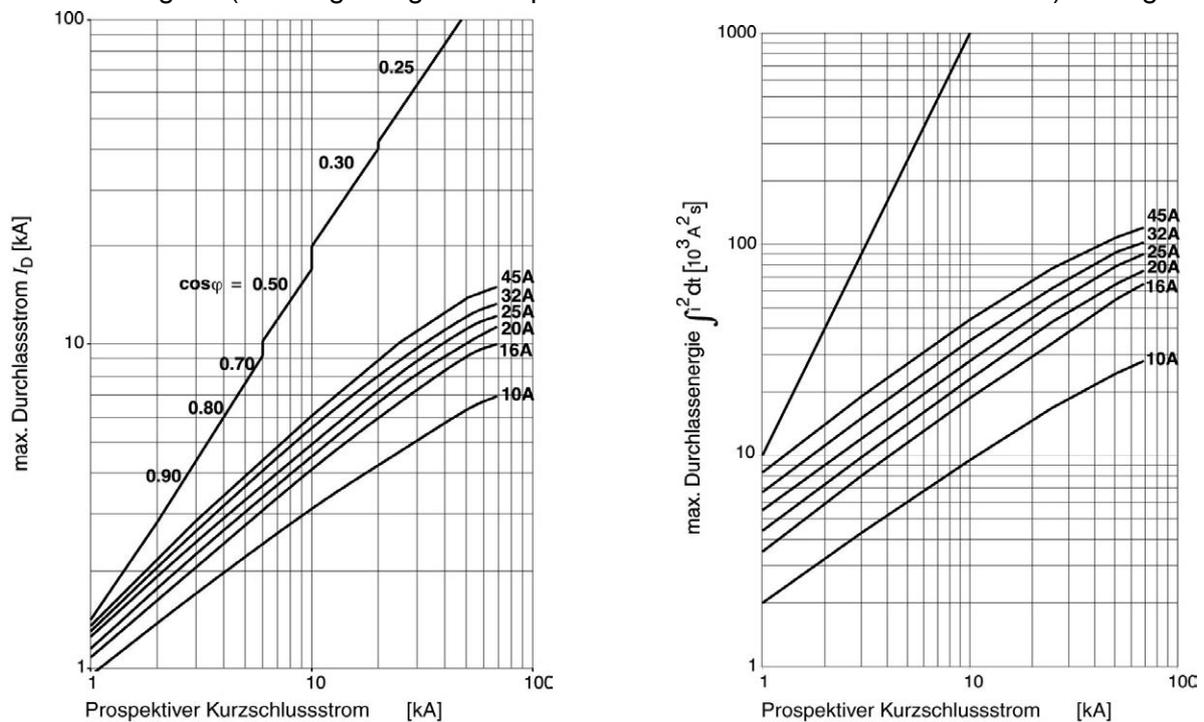


Fig. 2.3-2
 i_D -Werte und I^2t -Werte in Funktion des unbeeinflussten Kurzschlussstroms I_{cp}

Bei einer Begrenzung des Durchlassstroms auf $\leq 17 \text{ kA}$ entfällt gemäss IEC 60439-1 der Nachweis der Kurzschlussfestigkeit für die nachgeschalteten Stromkreise. Dies bezieht sich insbesondere auf die mechanische Festigkeit der Leitungen. Für den Schutz von Geräten (z.B. von Motorstartern) können auch kleinere Durchlassströme erforderlich sein.

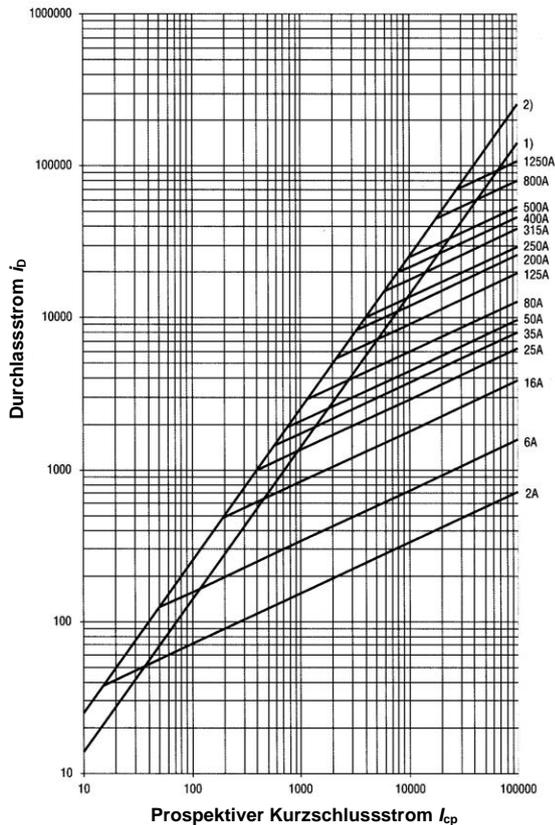


Fig. 2.3-3

Beispiel eines i_D -Diagrammes für Sicherungen als Funktion des unbeeinflussten Kurzschlussstroms I_{cp}

1) Stosskurzschlussstrom ohne Gleichstromglied

2) Stosskurzschlussstrom mit maximalem Gleichstromglied

2.3.4.5 Koordination von Betriebsmitteln

Mit der Koordination von Betriebsmitteln ist die Zuordnung des Kurzschlussschutzorganes zu Schützen oder Startern in Hinblick auf die Auswirkungen eines Kurzschlusses auf diese Geräte angesprochen. Es werden zweierlei Arten von Koordination unterschieden:

- Die Koordination der Auslösekennlinie des Überlastrelais (falls vorhanden) zur Ansprech-kennlinie des Kurzschlussschutzorganes in Hinblick auf das Schaltvermögen des Schützes
- Die Koordination des Kurzschlussschutzorganes zum Schütz und Überlastrelais in Hinblick auf die Zerstörung bei einem Kurzschluss und die Betriebsfähigkeit danach.

2.3.4.5.1 Koordination hinsichtlich des Schaltvermögens des Schützes (Überstromselektivität)

Die Koordination der Auslösekennlinie des Überlastrelais zum Kurzschlussschutzorgan erfolgt in Hinblick auf das Schaltvermögen des Schützes. Schütze sind für betriebsmässiges Schalten von Lasten konzipiert und nicht in der Lage, Ströme von Kurzschlussniveau abzuschalten. Die Koordination der Geräte muss sicherstellen, dass bei Strömen über dem Schaltvermögen des Schützes das Kurzschlussschutzorgan abschaltet, bevor das Überlastrelais anspricht und damit eine Abschaltung durch das Schütz einleitet (Fig. 2.3-4 und Fig. 2.3-5).

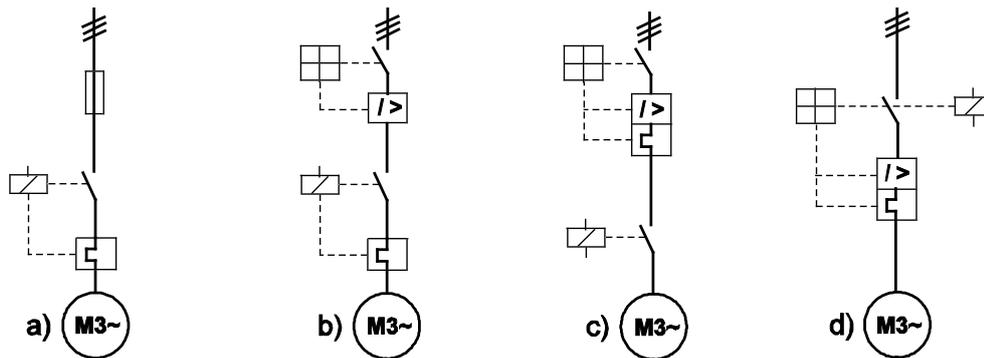


Fig. 2.3-4

Arten von Leistungsabgängen (mit elektromechanischen Schaltgeräten)

a) Sicherung, Schütz, Motorschutzrelais

b) Leistungsschalter mit Magnetauslöser, Schütz, Motorschutzrelais

c) Leistungsschalter mit Motorschutz-Charakteristik, Schütz

d) Betriebsmässiges Schalten und Leistungsschalterfunktion in einem Kontaktsystem vereinigt

Bei Startern, die von Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik geschützt werden, ist keine Koordination bezüglich Überstromselektivität erforderlich, da der Leistungsschalter bei Überlast und Kurzschluss abschaltet.

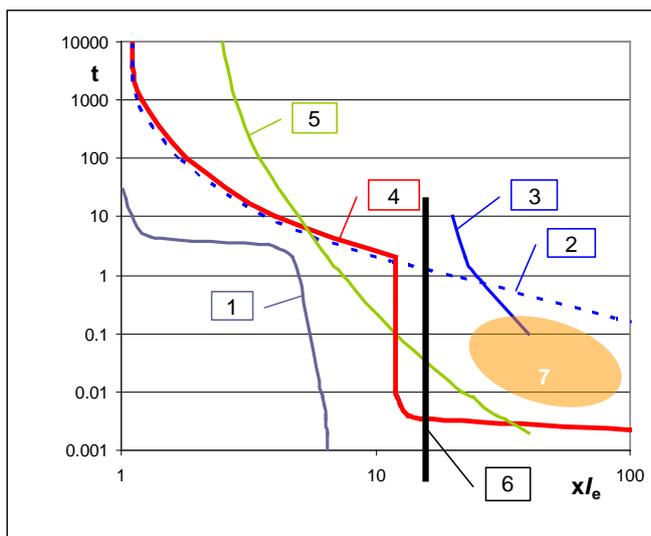


Fig. 2.3-5

Kurzschluss-Koordination von Schalt- und Schutzgeräten. Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik werden alternativ zu Sicherung/Thermorelais eingesetzt.

1 Motoranlaufstrom

2 Auslösekennlinie Thermorelais

3 Zerstörungskennlinie Thermorelais

4 Auslösekennlinie Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik

5 Zeit/Strom-Kennlinie Sicherung (alternativ zu Leistungsschalter)

6 Nennauschaltvermögen des Schützes

7 Schweissbereich des Schützes

2.3.4.5.2 Koordination hinsichtlich der Betriebsfähigkeit nach einem Kurzschluss

Die Koordination von Schütz und gegebenenfalls Überlastrelais zum Kurzschlussschutzorgan hinsichtlich der Betriebsfähigkeit von Startern nach einem Kurzschluss bezieht sich auf die zerstörende oder beschädigende Wirkung des Kurzschlussstromes auf die Starterkomponenten. Grundsatzforderung – unabhängig vom Koordinationstyp - ist, dass weder Personen noch Anlage gefährdet werden dürfen.

- **Koordinationsstyp 1** lässt Beschädigungen am Starter zu, so dass ein weiterer Betrieb erst nach Reparatur oder Ersatz möglich sein kann.
- Bei **Koordinationsstyp 2** müssen Schütz oder Starter nach dem Kurzschluss für den weiteren Gebrauch geeignet sein. Leichte Kontaktverschweissungen sind zulässig. Ein vorzeitiger Austausch der Starterkomponenten ist in der Regel (abhängig von der Schwere des Kurzschlusses) wegen des Abbrands von Kontaktmaterial unter dem Einfluss des Kurzschlussstroms erforderlich, kann aber zu einem betriebsgünstigen Zeitpunkt erfolgen.
- **Koordinationsstyp „CPS“** sieht gemäss IEC 60947-6-2 vor, dass ein Lastabgang nach einem Kurzschluss weiter verwendbar ist, um eine möglichst hohe Betriebskontinuität zu erreichen. Die garantierte elektrische Restlebensdauer ausgehend vom Neuzustand beträgt 6000 Schaltungen. Auch hier ist ein Austausch der Starterkomponenten wie bei Koordinationsstyp 2 zu einem betriebsgünstigen Zeitpunkt erforderlich. Leistungsabgänge nach Koordinationsstyp „CPS“ können in beliebiger Bauart (siehe auch **Fig. 2.3-4**) realisiert werden.

	Typ „1“	Typ „2“	Typ „CPS“
Kurzschluss suchen und beheben	X	X	X
Starter überprüfen	X	X	
Geräte austauschen	X	1)	1)
Allfällig verschweisste Kontakte trennen		X	
Wiederinbetriebnahme	X	X	X
Geplanter Unterhalt (Geräte-Austausch)		X	X

Tab. 2.3-5

Die Wahl des Koordinationsstyps aus Sicht der Dauer der Betriebsunterbrechung

1) Ersatz von Sicherungen, falls verwendet

2.3.4.6 Kurzschluss-Schaltvermögen

Das Schaltvermögen ist der Effektivwert eines Stroms bei einem bestimmten $\cos \varphi$ sowie einer bestimmten Bemessungs-Spannung, den ein Schaltgerät oder eine Sicherung noch betriebssicher unter vorgeschriebenen Bedingungen abschalten kann. Sowohl das Kurzschluss-Einschaltvermögen wie auch das Kurzschluss-Ausschaltvermögen von Leistungsschaltern müssen grösser oder gleich dem prospektiven Kurzschlussstrom am Einbauort sein. Ist dies nicht der Fall, so ist ein entsprechender Backup-Schutz (z.B. Sicherung) vorzusehen, um in der Kombination der Geräte das erforderliche Schaltvermögen sicher zu stellen. Angaben zu allfälligen Geräten für den Backup-Schutz finden sich in den technischen Unterlagen.

2.3.4.6.1 Bemessungs-Kurzschluss-Einschaltvermögen I_{cm}

Das Bemessungs-Kurzschlusseinschaltvermögen I_{cm} ist eine Grösse, die gemäss Vorschrift in einem bestimmten Verhältnis zum Bemessungs-Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen I_{cu} steht und vom Gerätehersteller in dieser Höhe sicher zu stellen ist. Es ist keine Auswahlgrösse, mit der sich der Anwender auseinandersetzen muss, stellt aber sicher, dass ein Leistungsschalter auch in der Lage ist, auf einen Kurzschluss einzuschalten – und ihn anschliessend abzuschalten.

2.3.4.6.2 Bemessungs-Kurzschluss-Ausschaltvermögen I_{cu} und I_{cs}

IEC 60947-2 unterscheidet das Bemessungs-Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen I_{CU} und das Bemessungs-Betriebs-Kurzschlussausschaltvermögen I_{CS} :

- Bemessungs-Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen I_{CU}
("Ultimate" short circuit breaking capacity):

I_{CU} ist das maximale Ausschaltvermögen eines Leistungsschalters bei einer zugehörigen Bemessungs-Betriebsspannung und unter spezifizierten Bedingungen. I_{CU} wird in kA ausgedrückt und muss mindestens so gross wie der prospektive Kurzschlussstrom am Einbauort sein.

Leistungsschalter, die auf das Grenzkurzschlussausschaltvermögen beansprucht wurden,

sind danach reduziert einsatzfähig und sollten mindestens auf weitere Funktionsfähigkeit überprüft werden. Es kann zu Veränderungen der Überlastauslösecharakteristik kommen und zu erhöhter Erwärmung infolge Verlustes von Kontaktmaterial.

- Bemessungs-Betriebs-Kurzschlussausschaltvermögen I_{CS} ("Service" short circuit breaking capacity):

I_{CS} -Werte sind in der Regel niedriger als die Werte für I_{CU} . Leistungsschalter, die auf das Betriebs-Kurzschluss-Ausschaltvermögen beansprucht wurden, sind danach weiter einsatzfähig. In Anlagen, in denen Betriebsunterbrechungen möglichst kurz gehalten werden müssen, ist nach I_{CS} zu dimensionieren.

- Ausschaltvermögen von Sicherungen

Für Sicherungen gilt sinngemäss das Gleiche wie für Leistungsschalter bezüglich I_{CU} : das Bemessungs-Ausschaltvermögen muss bei der zugehörigen Bemessungs-Betriebsspannung mindestens so gross wie der prospektive Kurzschlussstrom am Einbauort sein.

2.3.5 Thermischer Schutz

Die Einhaltung der zulässigen Betriebstemperaturen elektrischer Betriebsmittel ist sowohl ein wesentlicher Sicherheitsfaktor als auch entscheidend für deren Lebensdauer. Die Alterung von Kunststoffen beschleunigt sich exponentiell mit deren Betriebstemperatur.

Für alle elektrischen Betriebsmittel sind Grenzwerte für die strommässige Belastung definiert, deren Einhaltung durch entsprechende Schutzgeräte und –massnahmen (Sicherungen, Überlastrelais, Temperaturfühler) sicherzustellen sind.

2.3.5.1 Umgebungstemperatur

Elektrische Betriebsmittel sind für den Betrieb in begrenzten Temperaturbereichen konzipiert. Im Besonderen die obere Temperaturgrenze ist von Bedeutung, weil praktisch alle elektrischen Betriebsmittel Verlustleistung erzeugen und damit Wärme abgeben. Die Auswahl der Geräte muss die Geräte-Umgebungstemperatur und die dabei zulässige Belastung berücksichtigen.

Als normaler Umgebungstemperaturbereich gelten nach IEC 60947, IEC 60439 und IEC 60204 -5°C bis +40°C bei einem 24-Stunden-Mittel, das +35°C nicht übersteigt. Es ist zu beachten, dass die Bemessungswerte der Strombelastbarkeit ohne besondere Angabe auf +40°C Umgebungstemperatur bezogen sind. Bei abweichenden (höheren) Temperaturen sind die Belastungen gemäss Herstellerangaben zu reduzieren oder grössere Geräte zu wählen. Für Industrie-Schaltgeräte finden sich vielfach Belastungsangaben für +55 bzw. +60 °C Umgebungstemperatur.

Die untere Grenze der Betriebstemperatur kann bei elektronischen Geräten kritisch sein und muss allenfalls durch Beheizung gesichert werden. Im Zusammenhang mit Feuchtigkeit (Einfrieren) können tiefe Temperaturen auch die Funktionstüchtigkeit elektromechanischer Geräte beeinträchtigen.

Bemessungsbetriebswerte mit der Kennzeichnung „offen“ gelten für Geräte in freier Luft, während die Werte mit Kennzeichnung „gekapselt“ für Geräte gelten, wenn sie in ein vom Hersteller spezifiziertes Gehäuse mit minimaler Grösse eingebaut sind. Die Referenz-Umgebungstemperatur für „offen“ ist die Temperatur der umgebenden Luft des Gerätes, auch wenn es in einen Schrank oder Kasten eingebaut ist. Die Referenz-Umgebungstemperatur für „gekapselt“ ist die Temperatur der Luft der Gehäuse-Umgebung. Die Umgebungstemperatur des Gerätes im Gehäuse ist wegen der zusätzlichen Eigenerwärmung höher. In der Praxis bedeutet dies, dass z.B. für ein Schütz „offen“ bei 60°C $I_{th}=20$ A angegeben wird und „gekapselt“ bei 40°C derselbe Wert, weil wegen der Erwärmung im Gehäuse das Schütz die gleiche unmittelbare Umgebungstemperatur von 60°C erfährt. Bei 40°C „offen“ kann das gleiche Schütz z.B. 25 A führen.

In Schaltanlagen, bei denen die Temperatur im Schrank (siehe Software TRCS) berechnet oder gemessen wird, sind bei der Geräteauswahl die Daten für „offen“, also in unmittelbarer Geräteumgebung (Mikroklima) zu berücksichtigen und mit der Erwärmungskontrolle und allfälligen Kühlmassnahmen sicherzustellen, dass die Bezugstemperatur für diese Werte nicht überschritten wird.

2.3.5.2 Betriebsmässige Überströme, Schweranlauf

Betriebsmässige Überströme treten insbesondere beim Starten von Motoren auf. Schaltgeräte wie Schütze oder Lastschalter sind so dimensioniert, dass sie die üblicherweise auftretenden Überströme problemlos verkraften, soweit sie gemäss der entsprechenden Gebrauchskategorie ausgewählt sind. Motoranläufe, die normale Motorschutzrelais der Auslöseklasse 10 (Auslösung zwischen 4 und 10 s bei $7.2 I_e$) zur Auslösung veranlassen, werden als Schweranläufe bezeichnet. In diesen Fällen sind Überlastschutzrelais mit trägerer Auslösecharakteristik zu wählen. Siehe auch Abschnitt 1.7.1.2.1.

Zusätzlich ist die Belastbarkeit des Schaltgerätes zu überprüfen.

Die Belastbarkeit von Schützen und Leistungsschaltern ohne thermischem Auslöser hängt im Wesentlichen von der Baugrösse ab (Querschnitt/Masse der Strombahnen). Sie ist deshalb bei den verschiedenen Geräten verschieden hoch. Bis zu einer Anlaufzeit von etwa 10 s bei Direktanlauf muss die Belastung der Geräte während des Anlaufes nicht überprüft werden. Darüber kann die zulässige Belastbarkeit den technischen Unterlagen (Katalog, RALVET) entnommen werden (Beispiel siehe Fig. 2.3-6). Zwischen Schweranläufen sind Pausenzeiten vorzusehen, die dem Schaltgerät (siehe RALVET) und dem Motor eine ausreichende Abkühlung bis zur nächsten Belastung ermöglichen.

Schweranlauf und regelmässiger Kurzzeitbetrieb

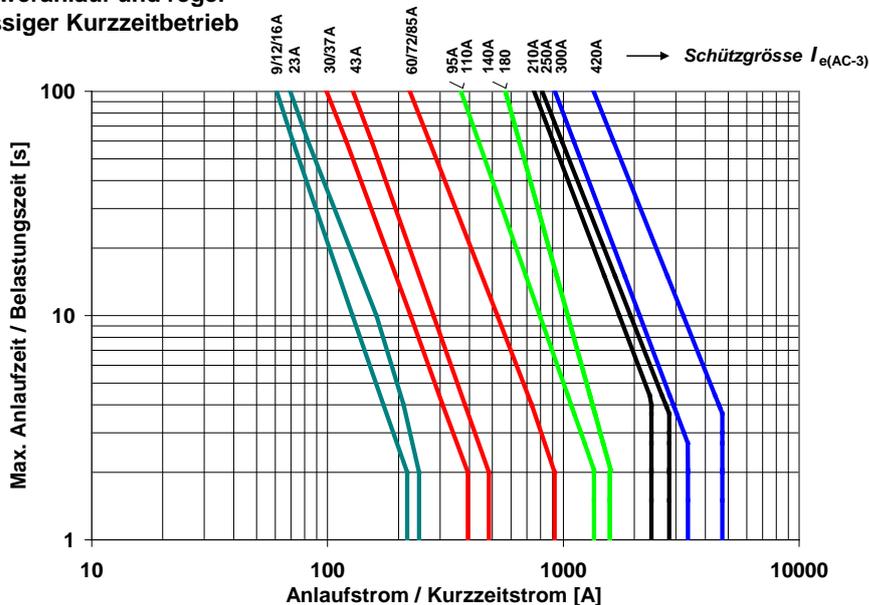


Fig. 2.3-6

Beispiel eines Belastungsdiagramms für Schütze bei Schweranlauf von Kurzschlussläufermotoren

2.3.6 Lebensdauer

Die Lebensdauer von Schaltgeräten hängt im Wesentlichen von der Höhe der Belastung und der Anzahl der Schaltungen ab. Statt auf eine Zeitspanne bezieht man sich bei elektromechanischen Schaltgeräten normalerweise auf die Schaltzahl, denn die Beanspruchung hängt hauptsächlich mit dem Schaltvorgang zusammen und weniger mit den dazwischenliegenden Ein- und Ausschalt-Phasen. Die maximale Schaltzahl wird in der Regel durch den Verschleiss hoch beanspruchter Funktionsteile - bei Schützen, Last- und Leistungsschaltern vor allem des Kontaktsystems - bestimmt.

Für Schaltgeräte werden jeweils eine mechanische und eine elektrische Lebensdauer angegeben. Die mechanische Lebensdauer gibt die Anzahl der möglichen Schaltungen ohne elektrische Schaltbelastung an, während die elektrische Lebensdauer die Anzahl Schaltungen für eine bestimmte Höhe der elektrischen Schaltbelastung und eine bestimmte Gebrauchskategorie angibt.

Bei elektronischen Geräten ist die Lebensdauer meist weniger von der Anzahl Schaltungen, sondern vor allem von der Betriebstemperatur abhängig. So altern z.B. Elektrolytkondensatoren (z.B. in Netzteilen eingesetzt) rascher bei höherer Temperatur. Daraus ergibt sich die Empfehlung, elektronische Geräte im kühleren Teil von Schaltschränken anzuordnen.

Alterung ist auch bei Sicherungen ein Thema, insbesondere beim Schalten von Motoren. Ganzbereichssicherungen (gL, gG) verfügen für die Auslösung im Überstrombereich über eine Lotstelle, die u.a. durch wiederholtes kurzzeitiges Anschmelzen altern kann. Für den Betrieb mit Motoren mit ihren hohen Anlaufströmen ist daher darauf zu achten, dass der Anlaufstrom diese Lotstelle nicht unzulässig erwärmt. Sicherungshersteller geben für die sichere Dimensionierung hinsichtlich dieses Alterungseffektes die kleinsten Sicherungen in Abhängigkeit von Motorstrom und Anlaufzeit an.

2.3.6.1 Vorgesehene Einsatzdauer

Die vorgesehene Einsatzdauer eines Schaltgeräts ist die Anzahl Jahre, Monate oder Wochen, die es unter vorgegebenen Betriebsbedingungen im 1-, 2- oder 3-Schicht-Betrieb ohne Austausch von Ersatzteilen erreichen soll. Sie hängt von der Schalzhäufigkeit und der totalen Anzahl Schaltspiele ab. Für letztere muss neben der mechanischen auch die elektrische Lebensdauer des Gerätes (siehe Abschnitt 2.3.6.3) ausgelegt werden. Die Ermittlung der gesuchten Parameter kann mittels der nachstehenden Formeln erfolgen:

$$n_{ges} = f_s * h_D * d_Y * n_Y$$

$$n_Y = \frac{n_{ges}}{f_s * h_D * d_Y}$$

$$f_s = \frac{n_{ges}}{n_Y * h_D * d_Y}$$

n_{ges}	gesamte Schaltzahl (Lebensdauer)
f_s	Schaltungen pro Stunde
h_D	Betriebsstunden pro Tag
d_Y	Betriebstage pro Jahr
n_Y	Anzahl Jahre (Lebensdauer)

2.3.6.2 Mechanische Lebensdauer

Die mechanische Lebensdauer bei Schaltgeräten ist die totale Anzahl möglicher Schaltspiele ohne elektrische Schaltbelastung. Sie ist von der Konstruktion abhängig, den bewegten Massen, den auftretenden Kräften und Beschleunigungen. Grosse Lastschalter und Leistungsschalter arbeiten mit hoher Kontaktkraft und grossen Massen und haben daher eine vergleichsweise geringe mechanische Lebensdauer. Schütze dagegen arbeiten mit verhältnismässig kleiner Kontaktkraft und erreichen daher eine grössere mechanische Lebensdauer.

Nach Erreichen der mechanischen Lebensdauer müssen die Geräte ausgetauscht werden. Sie wird während der vorgesehenen Einsatzdauer nur sehr selten erreicht. In den wenigen Fällen, wo die mechanische Lebensdauer tatsächlich ausgenutzt werden muss, ist dafür zu sorgen, dass sie nicht durch ungünstige Umgebungseinflüsse, Montagelage und – bei Schützen - durch zu hohe Steuerspannung herabgesetzt wird.

2.3.6.3 Elektrische Lebensdauer

Die elektrische Lebensdauer bei Schaltgeräten ist die Anzahl möglicher Schaltspiele unter Betriebsbedingungen. Nach Erreichen dieser Grösse müssen die dem Verschleiss unterworfenen Teile - soweit möglich - ersetzt bzw. revidiert werden. Bei kleinen Geräten ist der Ersatz der gesamten Geräte erforderlich.

Je nach Anwendung ist die Beanspruchung und der daraus resultierende Abbrand der Kontakte sehr unterschiedlich. Dieser wird von folgenden Bedingungen beeinflusst, wobei die erstgenannten dominieren:

- Ausschaltstrom
- Einschaltstrom
- Spannung
- Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bei Wechselstrom
- Zeitkonstante τ bei Gleichstrom
- Schalthäufigkeit
- Störungen in der Anlage und an anderen Geräten (Flatterschaltungen)
- Umgebungseinflüsse (Klima, Temperatur, Vibrationen)

Meistens wird die unter den Prüfbedingungen ermittelte elektrische Lebensdauer für die verschiedenen Gebrauchskategorien als Diagramm in Funktion des Bemessungsbetriebsstroms angegeben. Diese Werte dürfen im Allgemeinen ohne Bedenken der Schütz-Auswahl zugrunde gelegt werden. Im praktischen Betrieb liegen die Beanspruchungen in der Regel tiefer, da der hochgelaufene Motor meist einen kleineren Strom als den Nennbetriebsstrom führt. Bei längeren Tippschaltungen sinkt der Anlaufstrom bis zum Abschaltzeitpunkt bereits etwas ab. Damit wird der Einfluss eventuell nicht beachteter ungünstiger Bedingungen meist ausgeglichen.

Für die häufigsten Anwendungen von Schützen ist die elektrische Lebensdauer in den Produkt-Dokumentationen in verschiedenen Diagrammen angegeben:

- **AC-1** nicht induktive oder schwach induktive Last, z.B. Widerstandsöfen (Einschaltstrom kleiner und $\cos \varphi$ grösser als bei AC-3, jedoch volle wiederkehrende Spannung beim Ausschalten)
- **AC-3** Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufes (Hoher Einschaltstrom, Ausschalten des Motornennstroms)
- **AC-2** Schleifringläufermotoren: Anlassen, Ausschalten
- **AC-4** Käfigläufermotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen oder Reversieren, Tippen (hoher Ein- und Ausschaltstrom bei voller Spannung)
- **Gemischter Betrieb** von Käfigläufermotoren, z.B.
 - AC-3 90%
 - AC-4 10%

Mit den Diagrammen **Fig. 2.3-7** für AC-3 und **Fig. 2.3-8** für AC-4 kann für spezifische Anwendungsfälle die zu erwartende elektrische Lebensdauer bestimmt werden. Zugleich kann mit diesen Diagrammen die elektrische Lebensdauer für jede beliebige Anwendung (z.B. Tippen von Motoren mit sehr hohem oder speziell niedrigem Anlaufstrom und jeden beliebigen Mischbetrieb) ermittelt werden.

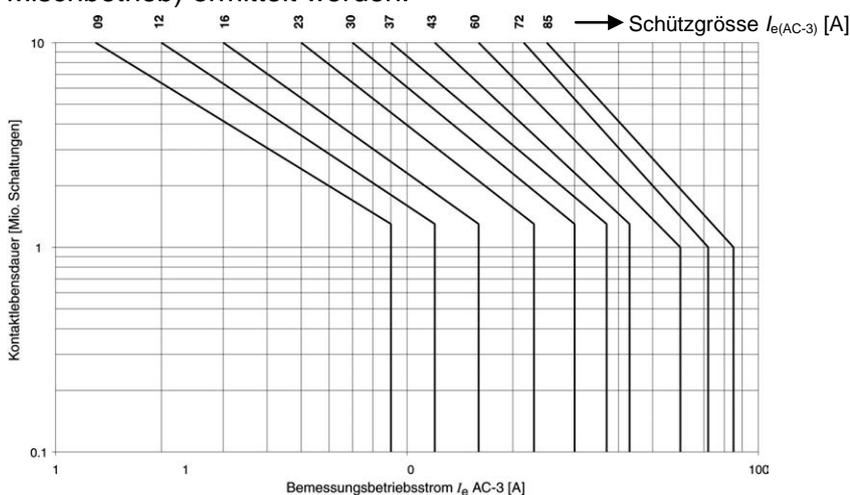


Fig. 2.3-7
 Beispiel eines Diagramms für die Ermittlung der elektrischen Lebensdauer von Schützen in Funktion des Bemessungsbetriebsstromes I_e für Gebrauchskategorie AC-3.
 Das Diagramm gilt bis zu 460 V, 50/60 Hz.

Beispiel

Gegeben:

Kurzschlussläufermotor 7.5 kW, 400 V, 15.5 A, AC-3 (Ausschalten nur während des Laufs), Arbeitszyklus 2 Minuten EIN / 2 Minuten AUS, 3-Schicht-Betrieb, vorgesehene Einsatzdauer 8 Jahre.

Gesucht:

Auswahl des Schützes

Lösung:

2 min EIN + 2 min. AUS = 15 Schaltspiele / h. Dies ergibt bei 3-Schicht-Betrieb in 8 Jahren etwa 1 Mio Schaltspiele.

Aus Diagramm **Fig. 2.3-7** ergibt sich für einen Bemessungs-Betriebsstrom von 15.5 A und 1 Mio geforderte Schaltspiele das Schütz C16 (elektrische Lebensdauer ca. 1.3 Mio. Schaltspiele).

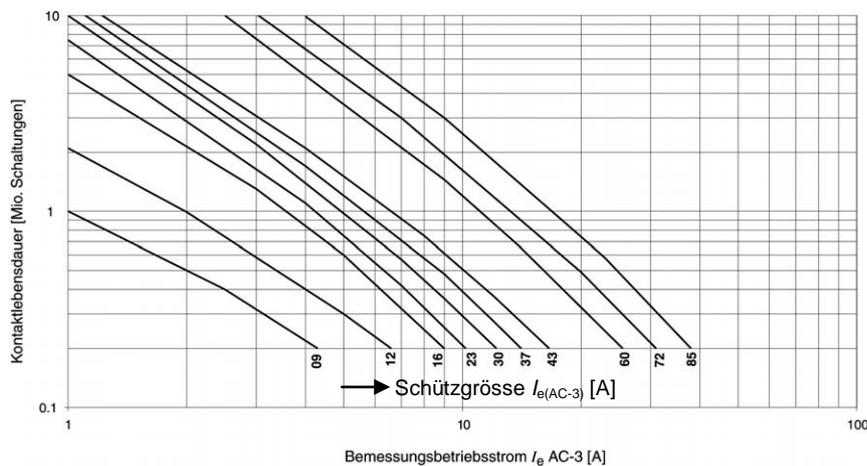


Fig. 2.3-8

Beispiel eines Diagramms für die Ermittlung der elektrischen Lebensdauer von Schützen in Funktion des Bemessungsbetriebsstromes I_e für Gebrauchskategorie AC-4.

Das Diagramm gilt bis zu $U_e=690$ V, 50/60 Hz.

Beispiel

Gegeben:

Kurzschlussläufermotor 15 kW, 400 V, 29 A, Gegenstrombremsung, Ausschalten bei Rotorstillstand bei $I_A = 6 \cdot I_e$, erwartete Lebensdauer = 0,2 Mio. Schaltspiele.

Gesucht:

Dimensionierung von Anlauf- und Bremsschütz.

Lösung:

Das Anlaufschütz (nur Einschalten) wird nach der maximal zulässigen Nennleistung bei AC-3 dimensioniert (siehe **Fig. 2.3-7**): C30.

Das Bremsschütz wird nach der maximal zulässigen Nennleistung bei AC-4 und 0,2 Mio Schaltspielen nach Diagramm **Fig. 2.3-8** ausgewählt: C72.

Bei Mischbetrieb, d.h. einem Betrieb des Schützes mit AC-3- und AC-4-Schaltungen, ergibt sich die resultierende Lebensdauer aus der Summe der Beanspruchungen. In den Katalogen finden sich Diagramme für bestimmte %-Sätze von AC-4-Schaltungen, z.B. 10%. Für die Ermittlung der Lebensdauer bei anderen Prozentsätzen steht die elektronische Dokumentation RALVET zur Verfügung oder ist Rückfrage erforderlich.

Sollte in der Praxis die elektrische Lebensdauer erheblich kürzer sein als vorgesehen, kommen dafür unter anderem folgende Gründe in Frage:

- Mehr Schaltspiele als angenommen, z. B. Steuerung durch zu empfindliche Regler.
- Häufigeres Tippen als angenommen, z. B. ungeschickte Bedienung.
- Zulässige Schalthäufigkeit überschritten, z. B. Flatterschaltungen
- Kurzschlüsse, z. B. zu kurze Umschaltpause bei Wende- oder Stern-Dreieck-Startern.
- Synchronisierung mit der Netzspannung. Halbleiter als Befehlsgeber können z.B. Ausschalten stets im gleichen Phasenwinkel und in der gleichen Stromrichtung bewirken (ergibt einseitige Materialwanderung an den Kontakten wie bei Gleichstromsteuerung).

Beurteilung der Kontaktstücke

In Zusammenhang mit der elektrischen Lebensdauer stellt sich oft die Frage der Beurteilung von Kontakten nach einer gewissen Betriebszeit auf weitere Betriebstauglichkeit. Zumindest bei grossen Schützen können die Kontakte inspiziert werden.

Bereits die ersten Schaltungen hinterlassen auf der Kontaktoberfläche deutlich sichtbare Abbrandspuren. Nach einer relativ kleinen Anzahl Schaltungen ist die ganze Kontaktoberfläche rau und geschwärzt. Auch die umgebenden Teile zeigen schwarze Ablagerungen und Gebrauchsspuren von der Lichtbogenlöschung. Ausgezackte Ränder und schräger Abbrand gegen die Löschkammer sind ebenfalls normale Erscheinungen.

Das Lebensdauerende der Kontakte ist erst dann erreicht, wenn grössere Teile aus der Kontaktauflage ausgebrochen sind oder die Gefahr der Kontaktberührung mit dem Trägermaterial besteht. Die nachstehenden Abbildungen sollen als Hilfe zur Beurteilung von Kontakten dienen.

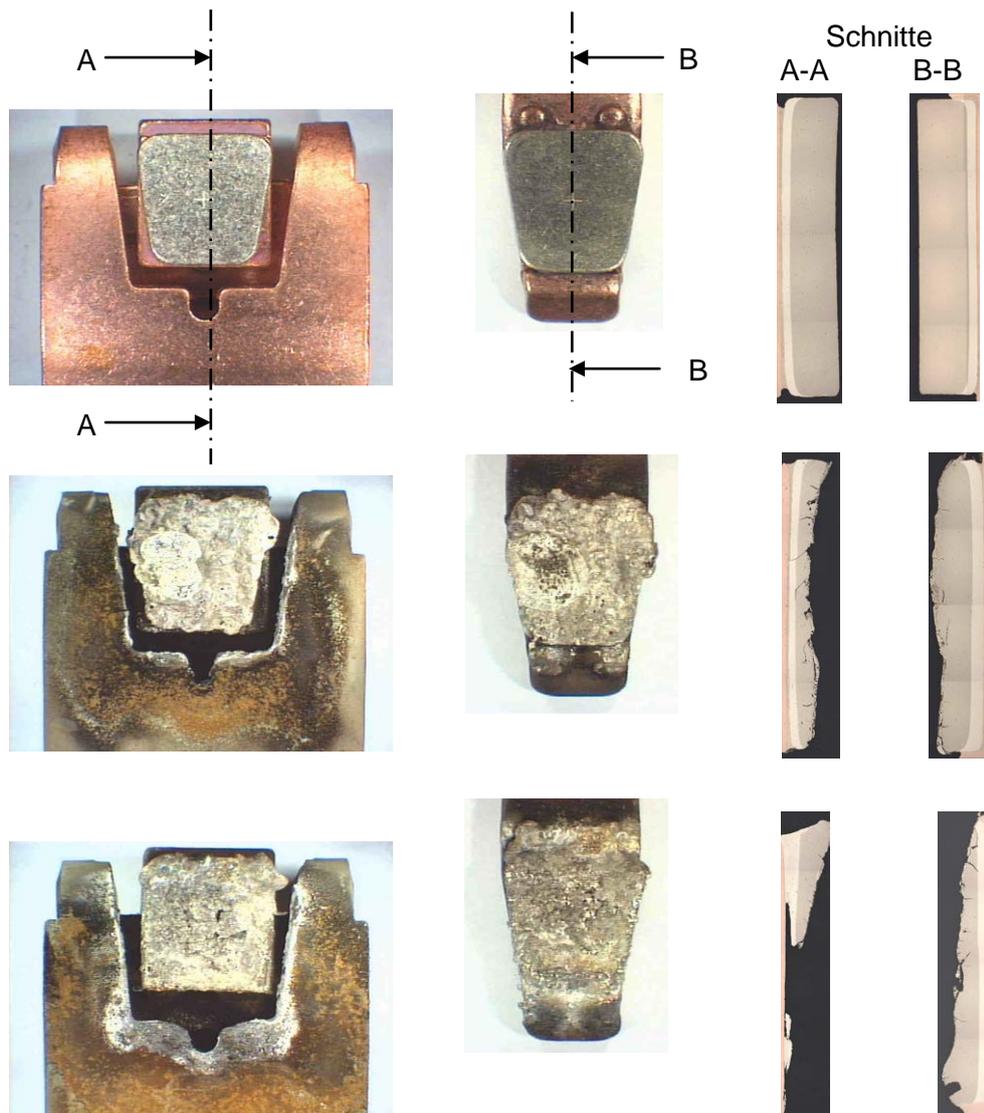


Fig. 2.3-9

Kontakte eines Leistungsschützes in verschiedenen Stadien der Lebensdauer bei AC-3-Belastung

Bilder oben: Kontakte im Neuzustand

Bilder Mitte: Kontakte nach ca. 75% der elektrischen Lebensdauer; Kontaktmaterial teilweise abgebrannt; Kontakte weiter funktionsfähig

Bilder unten: Kontakte am Ende der Lebensdauer; Trägermaterial sichtbar, Kontaktmaterial bis auf das Trägermaterial abgebrannt; weitere Verwendung würde zu Kontaktverschweißungen und unzulässiger Erwärmung führen.

Die Schliffbilder rechts zeigen den Kontaktzustand in einem Längsschnitt. Die Bilder der einzelnen Phasen der Lebensdauer stammen von verschiedenen Kontakten, da die Kontakte nach Erstellung der Schliffbilder nicht weiter verwendbar sind.

2.3.7 Aussetz- und Kurzzeitbetrieb, zulässige Schalthäufigkeit

Bei Dauerbetrieb, d.h. bei gleich bleibender Belastung über Stunden, Tage und länger, erreichen die Schaltgeräte ihr thermisches Gleichgewicht. Die einzelnen Teile erreichen ihre Beharrungstemperatur. Die Bemessungswerte beziehen sich aus thermischer Sicht auf den Dauerbetrieb bei einer bestimmten Umgebungstemperatur (siehe Abschnitt 2.3.5). Für Motoren wird in IEC 60034-1 der Dauerbetrieb mit dem Nennbetriebsstrom bis zum Erreichen der Beharrungstemperatur als Nennbetriebsart S1 bezeichnet (S = „Service“).

In der Praxis findet sich neben dem Dauerbetrieb eine Unzahl von Belastungsfällen mit sich ändernder Belastung. Im Aussetzbetrieb wechseln Belastungen und stromlose Pausen in regelmässiger Folge ab. Belastungsdauer und Pause sind so kurz, dass die Teile des Schaltge-

rätes (und des Verbrauchers) ihr thermisches Gleichgewicht weder während der Erwärmungs-, noch während der Abkühlungsphase erreichen. Bei Motoren sind in IEC 60034-1 für Aussetzbetrieb die drei Nennbetriebsarten S3, S4 und S5 festgelegt (S3...konstante Last; S4...mit zusätzlicher Anlaufbelastung; S5...mit zusätzlicher Anlauf- und Bremsbelastung).

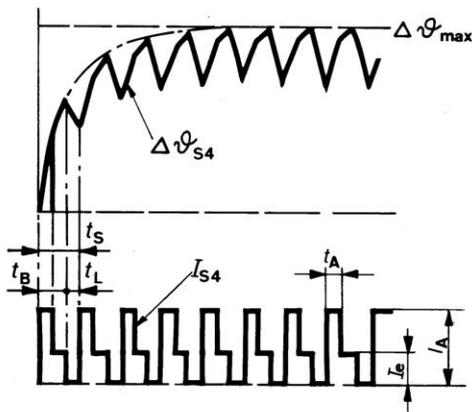


Fig. 2.3-10

Strombelastung und Erwärmung bei Aussetzbetrieb

I_{S4} Strombelastung bei Aussetzbetrieb S4

$\Delta\delta_{S4}$ Erwärmung und Abkühlung bei Aussetzbetrieb S4

Übrige Legende siehe Fig. 2.3-11

Im Kurzzeitbetrieb fließt der Strom eine begrenzte Zeit, so dass die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird. Die stromlose Pause nach der Belastung ist aber so lang, dass die Geräte nahezu wieder auf die Umgebungstemperatur abkühlen. Für Motoren wird in IEC 60034-1 der Kurzzeitbetrieb als Nennbetriebsart S2 bezeichnet.

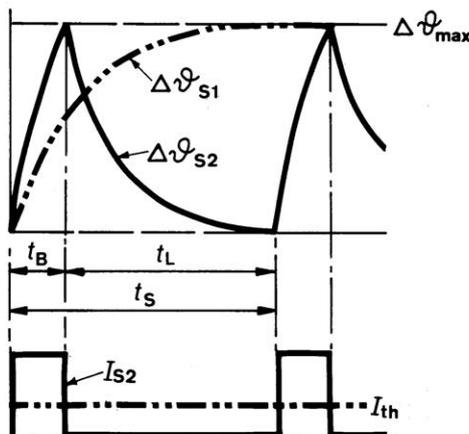


Fig. 2.3-11

Strombelastung und Erwärmung bei Kurzzeitbetrieb S2

t_B Belastungsdauer

t_L Stromlose Pause

t_S Dauer eines Schaltspiels

I_{th} Thermischer Dauerstrom

I_{S2} Strombelastung bei Kurzzeitbetrieb

$\Delta\delta_{max}$ Maximal zulässige Erwärmung

$\Delta\delta_{S1}$ Erwärmung bei thermischem Dauerstrom

$\Delta\delta_{S2}$ Erwärmung und Abkühlung bei Kurzzeitbetrieb

Bemerkung: Im Kurzzeitbetrieb wird eine höhere Temperatur als im Dauerbetrieb zugelassen!

Bei Aussetz- oder Kurzzeitbetrieb kann der Belastungsstrom höher sein als bei Dauerbetrieb, ohne dass die zulässige Erwärmung überschritten wird. Deshalb können z.B. Schütze zum

Schalten von ohmscher Last und Läuferschütze von Schleifringläufermotoren meist kleiner gewählt werden als dem Nennstrom der Last entsprechend.

Beim Schalten von Kurzschlussläufermotoren, Transformatoren, Kondensatoren und Glühlampen ist jedoch die erforderliche Schaltleistung das Hauptkriterium. Schütze für diese Anwendungen sind deshalb bei allen Betriebsarten nach dem Nennbetriebsstrom und der betreffenden Gebrauchsart zu dimensionieren.

2.3.7.1 Aussetzbetrieb und relative Einschaltdauer

Um einen bestimmten Aussetzbetrieb zu definieren, wird vorzugsweise neben dem Wert des Stroms entweder die Belastungs- und die Spieldauer oder die Schalthäufigkeit pro Stunde und die relative Einschaltdauer angegeben.

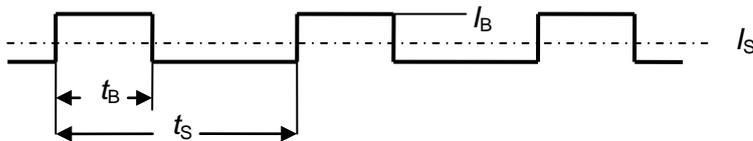


Fig. 2.3-12
Aussetzbetrieb

$$I_S = I_B \cdot \sqrt{\frac{t_B}{t_S}}$$

I_S Mittlere Strombelastung (Effektivwert während eines Schaltspiels und damit auch während der ganzen Betriebsdauer) [A]

I_B Strom während der Belastungsdauer [A]

t_B Belastungsdauer [s]

t_S Spieldauer = Belastungsdauer + stromlose Pause [s]

ED relative Einschaltdauer = t_B / t_S [%]

Die relative Einschaltdauer - meist als Prozentsatz ausgedrückt - ist das Verhältnis der Belastungsdauer zur Spieldauer, wobei die Spieldauer die Summe von Belastungsdauer und stromloser Pause ist.

Die mittlere Strombelastung I_S muss stets etwas kleiner sein als der thermische Dauerstrom, damit die Erwärmungsspitze am Ende jeder Belastungsdauer nicht den zulässigen Wert übersteigt. Bei Ständerschützen von Schleifringläufermotoren müssen, besonders bei kurzer Spieldauer, auch der höhere Strom während der Anlaufzeit (siehe Fig. 2.3-10) sowie die zusätzliche Erwärmung durch die Schaltlichtbögen berücksichtigt werden.

Bei hoher Schalthäufigkeit ist die Erwärmung durch Anlaufstrom und Schaltlichtbogen höher als die Abkühlung während der stromlosen Pause, so dass die Schütze grösser gewählt werden müssen als dem Nennbetriebsstrom entspräche. Die Auswahl erfolgt nach den Diagrammen für die zulässige Schalthäufigkeit.

Die Schalthäufigkeit von Schützen ist auch ohne elektrische Belastung begrenzt, gegeben durch die maximal zulässige Temperatur der Spule bzw. einer allfälligen elektronischen Spulenansteuerung. Die Einschaltstromstöße der Spule (Fig. 2.3-13) tragen bei hoher Schalthäufigkeit erheblich zur Gesamterwärmung der Spule und des Schützes bei. Dies gilt sowohl für Wechselstrom- wie auch für Gleichstrommagnete mit Vorwiderstand oder Schütze mit Doppelwicklungsspule (Sparschaltung) und auch bei elektronischer Spulenansteuerung.

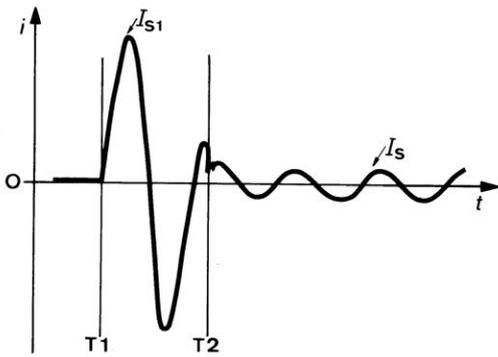


Fig. 2.3-13

Spulenstrom beim Einschalten eines Schütz-Wechselstrommagneten

I_s Nennstrom der Spule

I_{s1} Einschaltstrom der Spule (je nach Schütz 6... 15 · I_s)

$T1$ Einschaltbefehl (Spulenstromkreis geschlossen)

$T2$ Magnet geschlossen

Die zulässige Schalzhäufigkeit konventioneller Spulen kann kurzzeitig ohne Risiko überschritten werden, da die Zeitkonstante für die Erwärmung der Spulen je nach Schützgröße 5 bis 20 Minuten beträgt.

Echte Gleichstrommagnete haben keinen Einschaltstromstoss. Deshalb bestimmen bei diesen die - hier allerdings merklich längeren - Ein- und Ausschaltverzugszeiten die maximale Schalzhäufigkeit.

Bei elektronisch gesteuerten Spulen ist die zulässige Schalzhäufigkeit durch die thermische Belastbarkeit der elektronischen Komponenten gegeben und darf nicht überschritten werden.

Unter elektrischer Belastung muss für die zulässige Schalzhäufigkeit auch die Erwärmung der Kontakte berücksichtigt werden. Einerseits wird zwar in den stromlosen Pausen Wärme abgeführt, andererseits werden aber die Kontakte durch die Lichtbögen und beim Schalten von Motoren durch die Anlaufströme in erheblichem Mass zusätzlich beheizt. Die zulässige Schalzhäufigkeit ist somit von der relativen Einschaltdauer, der Größe und der Dauer des Motoranlaufstroms und vom Ausschaltstrom abhängig. Für typische Anwendungsfälle finden sich in den Katalogen entsprechende Diagramme (Fig. 2.3-14).

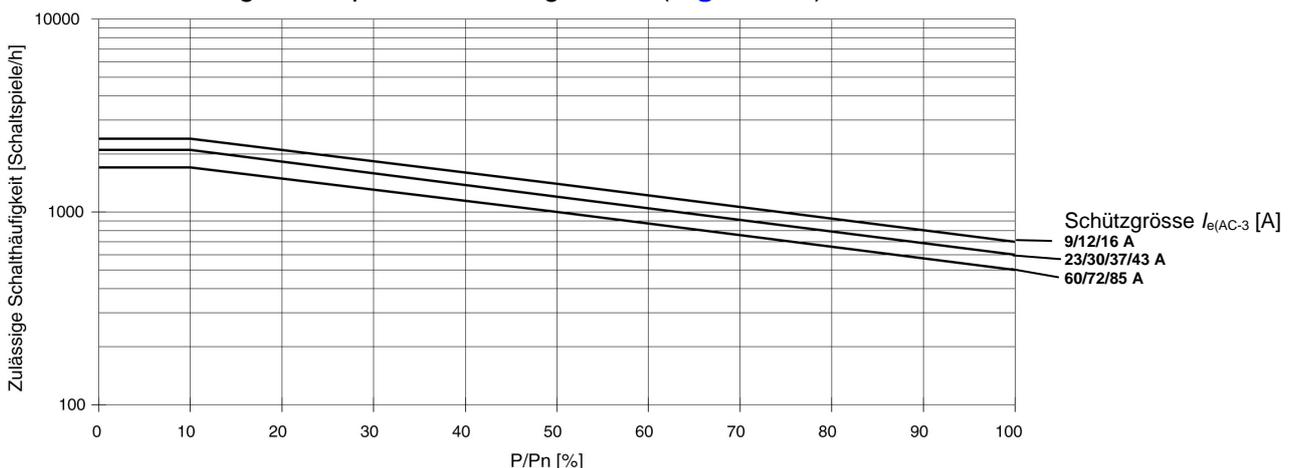


Fig. 2.3-14

Beispiel eines Schalzhäufigkeitsdiagrammes für Schütze. Die Schalzhäufigkeit bei kleinen Belastungen ist durch die Spulenerwärmung begrenzt.

Bei hoher Schalzhäufigkeit werden die Kontakte vorwiegend durch die Anlaufströme belastet. Das gilt auch für die Motorwicklungen.

Beim Schalten von Motoren ist – vorausgesetzt der Motor ist für die gegebene Schalzhäufigkeit dimensioniert - nachzuprüfen, ob der Überlastschutz für die hohe Schalzhäufigkeit geeignet ist und nicht vorzeitig oder zu spät auslöst. Siehe auch Abschnitt [4.1.2](#).

Hinweis

Unbeabsichtigtes Überschreiten der zulässigen Schalzhäufigkeit ist die häufigste Ursache von vorzeitig abgebrannten Schützkontakten. Werden durch sich rasch wiederholende Unterbrechungen des Steuerstroms die Schütze zum „Flattern“ gebracht und dabei hohe Ströme - z. B. Anlaufströme von Motoren - geschaltet, resultiert daraus starke Abnutzung, die zum Verschweissen oder zur Zerstörung der Kontakte führen kann.

Störungen im Steuerstromkreis zu finden, ist oft schwierig, da sie vielfältige Ursachen haben können, z.B.:

- Lose Anschlussklemme („Wackelkontakt“)
- Schleichend öffnender Kontakt an Thermostat, Druckmesser, Endschalter usw.
- Stark prellender Befehlskontakt
- Zögernd betätigter Befehlsschalter
- Falsch programmiertes Steuergerät
- Steuerspannungseinbruch

2.3.8 Bemessungsfrequenz und Oberschwingungen

Siehe auch Abschnitt [2.4.3](#).

Als normale Netzfrequenzen für alle Katalogdaten gelten 50 und 60 Hz. Auch für Gleichstromanwendungen finden sich in den technischen Daten entsprechende Werte. Bei abweichenden Frequenzen, sei es höher (z.B. 400 Hz in militärischen und Luftfahrtanwendungen) oder tiefer (z.B. 16 2/3 Hz im Bahnbereich) ändert sich die Beanspruchung von Schalt- und Schutzgeräten. Eine Überprüfung der Eignung für die jeweilige Applikation und die Ermittlung der Leistungsdaten für die gegebenen Beanspruchungen sind für eine korrekte Geräte-Auswahl unabdingbar.

Auch in Anwendungen, in denen Stromoberschwingungen auftreten – z.B. drehzahlgeregelte Antriebe – können die Leistungsdaten von Schalt- und Schutzgeräten beeinflusst sein.

2.3.9 Sicherheitsabstände

Bei Geräten mit Lichtbogenentwicklung, im Besonderen bei Leistungsschaltern, können Schutzabstände zu benachbarten Geräten, Leitern oder leitfähigen Flächen erforderlich sein, da die Lichtbogengase mit sehr hoher Temperatur (Plasma) und hoher Geschwindigkeit austreten können. Die Schutzabstände gemäss Herstellerangaben sind unbedingt einzuhalten, um Gefährdungen von Personen und Sachwerten vorzubeugen. Bei Nichteinhalten der erforderlichen Abstände kann es - z.B. durch die austretenden leitfähigen Gase beim Abschalten eines Kurzschlusses - zur Entstehung eines Sekundärkurzschlusses auf der Eingangsseite eines Leistungsschalters kommen. Dieser ist durch das nächste speiseseitig liegende Kurzschlusschutzorgan abzuschalten, dessen Nennstrom in der Regel bedeutend höher ist. Entsprechend hoch ist die zerstörende Energie des Störlichtbogens und die allfällige Gefährdung von Personal und Sachwerten.

Die Angabe der Schutzabstände findet sich in der Regel bei den Massskizzen der Geräte (siehe Beispiel [Fig. 2.3-15](#)).

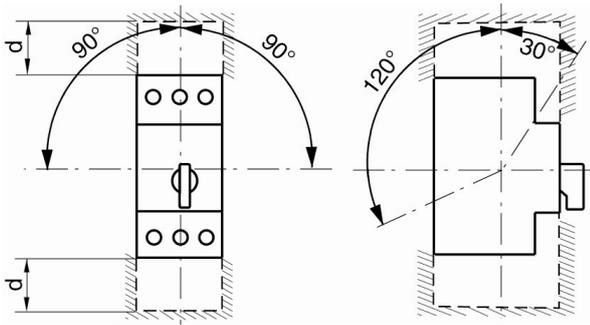


Fig. 2.3-15

Beispiel einer Massskizze mit Angabe der erforderlichen Sicherheitsabstände zu leitfähigen Materialien; die Sicherheitsabstände gelten nicht für angeschlossene isolierte Leiter

Abstände zwischen den Geräten können auch aus thermischer Sicht erforderlich sein, um eine ausreichende Wärmeabfuhr zur Einhaltung der betrieblich zulässigen Temperaturen zu gewährleisten. Auch diese Angaben finden sich in den Katalogen oder sind auf Anfrage verfügbar. Siehe auch Abschnitt 6.1.

2.3.10 Einbaulage

Gewisse Betriebsmittel wie Schütze und auch Leistungsschalter können bezüglich der zulässigen Einbaulage (Fig. 2.3-16) Einschränkungen unterliegen oder deren Betriebsparameter können sich mit der Einbaulage ändern. So weisen stehend montierte Schütze (Tischlage), wenn diese Montageart überhaupt zulässig ist, typisch längere Abfallzeiten auf und sind empfindlicher gegen Stöße in vertikaler Richtung. Hängend montierte Schütze (Über-Kopflage) können höhere Anzugsspannungen erfordern, was die untere Grenze des Toleranzbereichs der Betätigungsspannung nach oben schiebt.

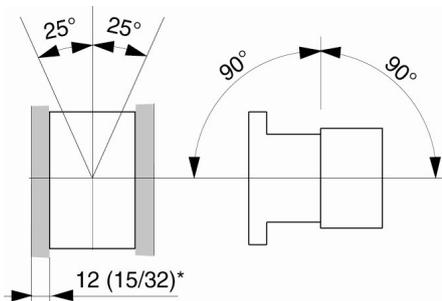


Fig. 2.3-16

Zulässige Einbaulage eines Schützes (Beispiel).

Die graue Zone seitlich kennzeichnet den erforderlichen Abstand zu geerdeten Teilen.

Angaben zu den zulässigen Einbaulagen finden sich in den Massskizzen der Geräte. Bezüglich des Einflusses bei Einbau in von der Normallage abweichender Lage (hängend, stehend) auf die Betriebsparameter empfiehlt sich rückzufragen.

2.3.11 Schutztrennung

Für den Schutz gegen elektrischen Schlag wird im Zusammenhang mit der Anwendung elektronischer Steuerungsgeräte zunehmend der Schutz durch SELV (Sicherheitskleinspannung; Safety Extra Low Voltage) und PELV (Schutzkleinspannung; Protective Extra Low Voltage) gewählt. Die maximalen Spannungspegel für SELV und PELV sind 50 V bei Wechselspannung und 120 V bei Gleichspannung (ausgenommen bei Sonderanwendungen mit tieferen Grenzwerten).

Bei Kreisen mit Sicherheits- oder Schutzkleinspannung müssen alle Geräte, die in den Kreis einbezogen sind, gegen andere Stromkreise eine Isolation entsprechend jener von Sicherheitstransformatoren aufweisen. Das heisst, doppelte Kriechstrecken und nächst höhere Stossspannungsfestigkeit U_{imp} . Dies gilt auch u.a. für Hilfsstromkreise von Schaltgeräten gegenüber ihren Hauptstromkreisen (Fig. 2.3-17).

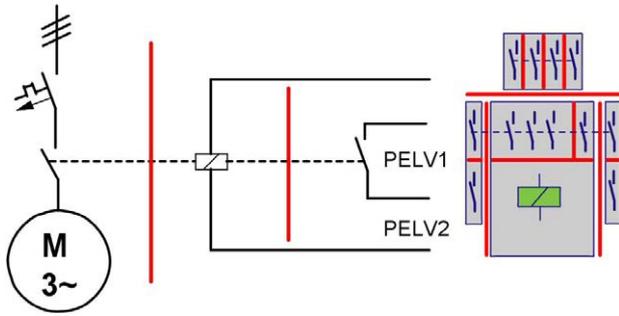


Fig. 2.3-17
Schutztrennung zwischen Leistungs- und Steuerstromkreis

Dies wird in der Regel durch eine Reduktion der Bemessungsbetriebsspannung erreicht. Das heisst, dass z.B. ein für 690 V geeignetes Schütz bei 400 V in SELV- und PELV-Kreisen verwendet werden kann. Die Zulassung für SELV- und PELV-Kreise bedingt konstruktive Massnahmen, die auch im Fehlerfall (z.B. gebrochene Teile) die Schutztrennung gewährleisten. Bei der Auswahl von Schaltgeräten für SELV- und PELV-Kreise ist daher ausdrücklich auf die Deklaration der Schutztrennung bei der jeweiligen Betriebsspannung zu achten.

2.3.12 Aufstellungshöhe

Die Aufstellungshöhe und die davon abhängende Dichte der Luft spielt in Hinblick auf die Kühlbedingungen, die Spannungsfestigkeit und die Lichtbogenlöschung eine Rolle. Als normal gemäss IEC 60947 gilt eine Aufstellungshöhe bis 2000 m. Für grössere Höhen müssen die Leistungsdaten der Geräte zum Teil reduziert werden. Bei leistungselektronischen Geräten sind jedoch vielfach Belastungsreduktionen bereits ab 1000 m anzuwenden. In den Produktkatalogen finden sich jeweils Angaben über die den Leistungsdaten zugrunde liegende Aufstellungshöhe.

Für Schütze, Bimetall-Thermorelais und Leistungsschalter mit Bimetallauslösern finden sich in **Tab. 2.3-6** Richtwerte für die Reduktion der Bemessungswerte in Höhen über 2000 m.

Höhe über NN		[m] [ft]	2000 6600	3000 10000	4000 13000	5000 16500
Schütze						
Reduktionsfaktor für I_{AC-1}		$n \cdot I_e$	1.0	0.95	0.9	0.85
Reduktionsfaktor für I_{AC-2} , I_{AC-3} , I_{AC-4}	bis 415 V	$n \cdot I_e$	1.0	0.95	0.9	0.85
	bis 500 V	$n \cdot I_e$	1.0	0.93	0.85	0.78
	bis 690 V	$n \cdot I_e$	1.0	0.87	0.77	0.65
Bimetall-Thermorelais 1)						
Einstellfaktor auf den Bemessungs-Betriebsstrom des Motors 2)		$n \cdot I_e$	1.0	1.06	1.11	1.18

1) Gilt auch für Leistungsschalter mit Bimetall-Auslösern. Die Auslösecharakteristiken elektronischer Schutzrelais ändern sich typisch nicht mit der Aufstellungshöhe

2) Zusätzlich zu beachten ist eine Reduktion der Bemessungs-Betriebsströme von Motoren aufgrund der Aufstellungshöhe gemäss Angabe des Motor-Herstellers

Tab. 2.3-6
Korrekturfaktoren beim Einsatz in Höhen über 2000m

2.3.13 Schock und Vibration

Niederspannungs-Schaltgeräte sind bezüglich der Beanspruchung durch Schock und Vibration für die normale industrielle Anwendung konzipiert und geprüft. Dies schliesst die üblichen Beanspruchungen im Betrieb z.B. infolge der Erschütterungen beim Schalten von Schützen ein.

In Anwendungen mit erhöhter Beanspruchung durch Schock und Vibration wie z.B. auf Fahrzeugen, im Bahnbereich oder auf Schiffen sind vielfach Massnahmen erforderlich, um die Geräte vor der unmittelbaren Beanspruchung durch extern generierten Schock oder Vibration zu schützen. Im einfachsten Fall durch Optimierung der Montagelage. Im Zweifelsfall ist Rücksprache mit dem Hersteller erforderlich.

2.4 Spezifische Einsatzbedingungen und Schaltaufgaben

2.4.1 Parallel- und Serieschaltung von Strombahnen

2.4.1.1 Parallelschalten

Durch Parallelschalten von Strombahnen bei Schaltgeräten erhöht sich deren thermische Belastbarkeit. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Widerstände der einzelnen Strombahnen infolge Kontaktabbrands, Verschmutzung usw. variieren. Der Strom verteilt sich nicht gleichmässig auf die parallelen Pfade, sondern entsprechend den jeweiligen Impedanzen.

Um eine Überlastung einzelner Kontaktstellen zu vermeiden, müssen Reduktionsfaktoren für die Gesamtbelastung angewandt werden. In der Praxis kann mit folgenden Werten für den zulässigen Gesamtstrom gerechnet werden:

- bei 2 parallelen Strombahnen $I_{e2} = 1.8 \times I_e$
- bei 3 parallelen Strombahnen $I_{e3} = 2.5 \times I_e$

Das Ein- und Ausschaltvermögen bleibt bei Parallelschaltung gegenüber der Normalanwendung gleich wie beim einzelnen Kontakt, weil häufig eine Kontaktstelle zuerst schliesst oder öffnet und deshalb den grössten Teil der Schaltbelastung übernehmen muss. Deshalb ist eine Erhöhung der Schaltleistung von Schützen für das Schalten von Motoren und kapazitiven Lasten durch Parallelschaltung von Kontakten nicht möglich. **Tab. 2.4-1** zeigt das Schaltvermögen bezogen auf den Gesamtstrom bei Parallelschaltung von 2 und 3 Kontakten.

	Dreipoliges Schalten → I_e	2 Strombahnen parallel ¹⁾ → $I_{e2} = 1.8 \cdot I_e$	3 Strombahnen parallel ¹⁾ → $I_{e3} = 2.5 \cdot I_e$
Einschaltvermögen	$12 \cdot I_e$	$(12 \cdot I_{e2}) / 1.8 = 6.7 \cdot I_{e2}$	$(12 \cdot I_{e3}) / 2.5 = 4.8 \cdot I_{e3}$
Ausschaltvermögen	$10 \cdot I_e$	$(10 \cdot I_{e2}) / 1.8 = 5.6 \cdot I_{e2}$	$(10 \cdot I_{e3}) / 2.5 = 4 \cdot I_{e3}$
¹⁾ Spannung an jeder Schaltstrecke $U = U_e / \sqrt{3}$			

Tab. 2.4-1

Einschalt- und Ausschaltvermögen von Schützen als Vielfaches des Bemessungsbetriebsstromes I_e beim dreipoligen Schalten und beim Parallelschalten von zwei und drei Strombahnen

Schütz-Strombahnen sollten aus diesem Grund nur zum Schalten von Wirklast (Gebrauchskategorie AC-1) parallel geschaltet werden. Sie sollen möglichst nur mit Kupferschienen, bei denen die Stromzuführung in der Mitte liegt, parallel geschaltet werden, um eine symmetrische Stromverteilung und gute Wärmeableitung zu erzielen. Für kleinere Schütze sind spezielle Verbindungsbrücken im Angebot.

Ein etwaiger auftretender Kurzschlussstrom teilt sich nach Massgabe der jeweiligen Strombahnwiderstände auf die parallel geschalteten Pole auf. Bei Leistungsschaltern mit parallel geschalteten Kontakten kann dadurch bei kleinen Kurzschlussströmen der Ansprechstrom von elektromagnetisch unverzögerten Kurzschlussauslösern unterschritten werden. Als Folge davon würde ein solcher Kurzschluss erst verzögert durch den thermischen Auslöser abgeschaltet. Die Ansprechschwelle für unverzögerte Kurzschlussabschaltung erhöht sich etwa um den Faktor der Anzahl parallel geschalteter Strombahnen.

2.4.1.2 Serieschaltung

Bei Serieschaltung zweier oder dreier Strombahnen von Schaltgeräten (**Fig. 2.4-1**) ergeben sich u.a. nachstehende Vorteile:

- Erhöhte Spannungsfestigkeit
- Verbessertes Schaltvermögen
- Höhere Betriebsspannung
- Grössere Kontaktlebensdauer

Diese Vorteile werden beim Einsatz von dreipoligen Schützen und Leistungsschaltern zum Schalten von Einphasen-Wechselstrom und vor allem von Gleichstrom genutzt. Die Grenze für höhere Betriebsspannung ist durch die Bemessungsisolationsspannung gegeben, die in keinem Fall überschritten werden darf. Die zulässige Strombelastung von in Serie geschalteten Hauptstrombahnen ist gleich wie die der einzelnen Strombahn.

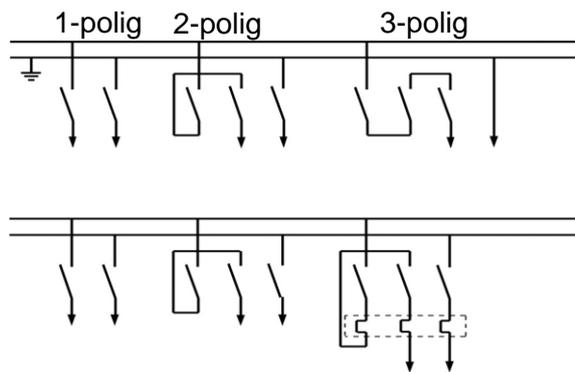


Fig. 2.4-1

Schemabeispiele für Kontakte in Serienschaltung. Bei Anwendungen in geerdeten Netzen (oben) mit beidseitig geschalteter Last ist zu beachten, dass Erdschlüsse zur Überbrückung von Kontakten und damit zu einer Reduktion der abschaltbaren Spannung führen können.

Die Überlast-Auslösekennlinien von Geräten mit thermisch verzögerten Bimetallauslösern wie Leistungsschaltern und Überlastrelais gelten bei gleichmässiger Strombelastung aller drei Bimetallstreifen. Durch die Serienschaltung der Strombahnen wird dieses gewährleistet. Bei Geräten mit Phasenausfallempfindlichkeit ist die Serienschaltung aller Strombahnen zwingend. Bei elektronischen Motorschutzrelais kann es erforderlich sein, den Phasenausfallschutz zu deaktivieren.

Der Einfluss des in Serie Schaltens von Strombahnen beim Schalten von Gleichstrom wird im Abschnitt 2.4.2 behandelt.

Für den Einfluss des in Serie Schaltens von Strombahnen beim Schalten von Frequenzen < 50 Hz und > 60 Hz siehe Abschnitt 2.4.3.

2.4.2 Wechselstromschaltgeräte in Gleichstromnetzen

Für Wechselstrom konzipierte Schaltgeräte können mindestens den gleichen Dauer-Bemessungsbetriebsstrom auch bei Gleichstrom führen. Bei Gleichstrom fällt der Skineffekt in den Strombahnen weg und es treten keine spezifischen Wirkungen des Wechselstromes wie Hysterese- und Wirbelstromverluste auf.

Gleichstrom-Geräte, die mit Kleinspannung betrieben werden, können problemlos mit für Wechselstrom konzipierten Schaltgeräten geschaltet werden, da deren Gleichstrom-Schaltvermögen bei kleinen Spannungen praktisch gleich ist wie bei Wechselstrom.

Bei Spannungen über etwa 60 V geht das Gleichstrom-Schaltvermögen der Wechselstrom-Schaltgeräte mit doppelunterbrechenden Kontakten (z.B. Schütze) stark zurück. Durch Serienschalten von zwei oder drei Strombahnen (Fig. 2.4-1) kann diese Grenze auf die 2- bzw. 3-fache Spannung angehoben werden.

Grund für das verringerte Schaltvermögen bei Gleichstrom gegenüber dem Schalten von Wechselstrom ist der fehlende Stromnulldurchgang, der bei Wechselstrom das Löschen des Lichtbogens unterstützt. Der Lichtbogen im Kontaktsystem kann bei höheren Gleichspannungen weiter brennen und das Schaltgerät dadurch zerstören. Bei Gleichspannung sind der Kontakt-abbrand und damit auch die Schaltstücklebensdauer anders als bei Wechselspannung. Die erreichbaren Werte für Gleichstrom werden spezifisch geprüft und dokumentiert.

Die Last beeinflusst bei Gleichstrom das Schaltvermögen stärker als bei Wechselstrom. Die in der Induktivität der Last gespeicherte Energie muss zum wesentlichen Teil im Lichtbogen abgebaut werden. Somit ist bei stark induktiver Last (grosse Zeitkonstante L/R) das zulässige Schaltvermögen bei gleicher elektrischer Lebensdauer wegen wesentlich längerer Abschaltzeiten kleiner als bei ohmscher Last.

Überlastauslöser

Das Verhalten der vom Betriebsstrom beheizten Bimetallstreifen basiert auf der in den Bimetallen und ggf. deren Heizwicklung umgesetzten Stromwärme. Dies gilt für Wechselstrom wie für Gleichstrom. Die Auslösekennlinie kann bei Gleichstrom etwas träger werden, da keine Hysterese- und Wirbelstromverluste entstehen. Bei Überlastauslösern mit Phasenausfallempfindlichkeit sind immer alle drei Strombahnen in Reihe zu schalten, um Frühauslösungen zu verhindern.

Über Stromwandler beheizte Überlastauslöser sind für Gleichstrom nicht geeignet. Auch elektronische Überlastrelais können meist nicht für Gleichstromanwendungen eingesetzt werden, da die Stromerfassung mit Wandlern erfolgt und die Funktionalität auf Wechselstrom zugeschnitten ist.

Kurzschlussauslöser

Elektromagnetische Überstromauslöser lassen sich bei Gleichstrom verwenden. Der Auslösegrenzstrom liegt im Vergleich zu Wechselstrom aber etwas höher.

Unterspannungs- und Arbeitsstromauslöser

Unterspannungs- und Arbeitsstromauslöser arbeiten mit Magnetantrieben. Für Gleichspannung braucht es spezielle Ausführungen.

2.4.3 Einsatz bei Netzfrequenzen < 50 Hz und > 60 Hz. Einfluss von Oberschwingungen

Niederspannungs-Schaltgeräte sind für eine Netzfrequenz von 50 ... 60 Hz ausgelegt. Will man sie für andere Bemessungsfrequenzen verwenden, sind nachstehende Geräteeigenschaften zu überprüfen:

- Thermische Belastbarkeit der Strombahnen,
- Schaltvermögen,
- Lebensdauer des Kontaktsystems,
- Ansprechverhalten der Auslöser,
- Arbeitsverhalten von Magnet- und Motorantrieben.

Die Beeinflussung des Verhaltens von Niederspannungs-Geräten durch höhere Frequenzen sind sowohl in Netzen mit höherer Grundfrequenz (z.B. 400 Hz) zu beachten als auch beim Auftreten von Strom-Oberschwingungen. Solche Strom-Oberschwingungen treten auf, wenn die Netzspannung Oberschwingungen enthält oder nichtlineare Verbraucher angeschlossen sind wie z.B. Kompensationsgeräte von Leuchtstofflampen, die im Sättigungsgebiet arbeiten, oder Geräte mit Phasenanschnittsteuerung. Bei Verbrauchern mit Phasenanschnittsteuerung und bei Frequenzumrichtern (Inverter; siehe Abschnitt **3.10**) können im Netz Oberschwingungen mit Frequenzen bis zu einigen kHz auftreten. Der Oberschwingungsgehalt kann durch mit dem Netz verbundene Kondensatoren erhöht werden, deren Stromaufnahme mit zunehmender Frequenz steigt. Dies ist besonders bei einzelkompensierten Motoren zu beachten und kann eine Korrektur der Stromeinstellung des Schutzrelais erfordern.

In Anwendungen, in denen Strom-Oberschwingungen auftreten, addiert sich der Einfluss der Oberschwingungen (z.B. zusätzliche Erwärmung) zu jenem der Grundschwingung. Das kann insbesondere bei Geräten, die Spulen oder ferromagnetische Materialien enthalten, kritisch sein (Bimetallheizwicklungen, Magnetauslöser, etc.).

Ein hoher Oberschwingungsgehalt kann bei Lasten mit Nulleiterverbindung (z.B. einphasige Lasten wie Leuchtstoffröhren, kleine Netzteile etc.) wegen der Ausbildung des Nullsystems zu hohen Strömen im Nulleiter bis zu dessen thermischer Überlastung führen. Dies ist auch bei der Anwendung vierpoliger Schaltgeräte zu beachten.

2.4.3.1 Einfluss der Netzfrequenz auf die thermische Belastung

Im Gegensatz zu Gleichstrom wird bei Wechselstrom der Querschnitt eines Leiters nicht gleichmässig vom Strom durchflossen. Die Stromdichte nimmt von der Oberfläche nach innen ab. Dieser Effekt – Skineneffekt genannt – nimmt mit steigender Frequenz zu, so dass bei sehr hohen Frequenzen das Innere des Leiters nahezu stromlos ist und der Strom nur noch in einer relativ dünnen Schicht an der Leiteroberfläche fliesst.

Dadurch ergibt sich mit wachsender Frequenz ein erhöhter Widerstand der Strombahn. Dazu werden durch magnetische Induktion in benachbarten Metallteilen höhere Hysteresee- und Wirbelstromverluste erzeugt. Vor allem ferromagnetische Werkstoffe (Löschhilfen, Schrauben, Käfigklemmen, Magnet, Grundplatte) können unzulässige Temperaturen annehmen. Dies ist vor allem bei Frequenzen > 400 Hz zu beachten.

Wegen des unterschiedlich geformten Querschnitts der Strombahnen sowie der unterschiedlichen Art und Entfernung der benachbarten Metallteile sind die Mehrerwärmung und besonders die örtlichen Übertemperaturen je nach Gerätetyp verschieden hoch. Für die Belastbarkeit der Schaltgeräte und Schaltgerätekombinationen ergeben sich nachfolgende Konsequenzen.

Für die individuelle Anwendung ist immer eine spezifische Abklärung erforderlich, da eine allgemeingültige Aussage aufgrund sehr unterschiedlicher Konstruktionsmerkmale nicht gegeben werden kann, besonders bei Frequenzen > 400 Hz.

Belastbarkeit von Schützen, Last- und Leistungsschaltern

Geräte, die für eine Frequenz von 50/60 Hz ausgelegt sind, können aus thermischer Sicht für mindestens den gleichen Bemessungsstrom bei niedrigerer Frequenz eingesetzt werden. In **Fig. 2.4-2** sind für höhere Betriebsfrequenzen Richtwerte für zulässige Betriebsströme angegeben. Die tatsächlichen Reduktionsfaktoren variieren je nach konstruktiver Ausführung und Nennstrombereich der Geräte. Es ist zu beachten, dass Rahmenklemmen die Erwärmung bei höheren Frequenzen negativ beeinflussen.

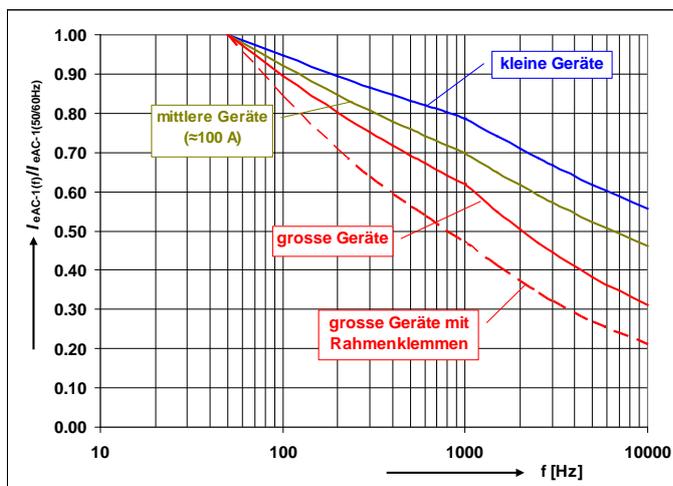


Fig. 2.4-2

Richtwerte für zulässige Betriebsströme AC-1 von Schützen, Last- und Leistungsschaltern bei höheren Frequenzen bezogen auf I_e bei 50...60 Hz

Höhere Frequenzen und Installationsmassnahmen

Bei höheren Frequenzen sind bei der Installation die Effekte von Stromverdrängung (Skineneffekt), Wirbelstrom- und Hystereseverlusten besonders zu beachten:

Die anzuschliessenden Leiter sind entsprechend der höheren Frequenz zu bemessen (grösserer Querschnitt, Flachband- oder Hohlleiter). Die Belastbarkeit von Stromschienen bei höheren Frequenzen kann anhand **Fig. 2.4-3** näherungsweise abgeschätzt werden. Sie hängt von der Geometrie der Schienen und der Art der Leitungsführung ab und ist im Einzelfall durch Prüfung zu ermitteln. Die Leitungsführung soll in möglichst grossem Abstand von leitfähigen (insbesondere ferromagnetischen) Teilen erfolgen, um induktive Effekte gering zu halten.

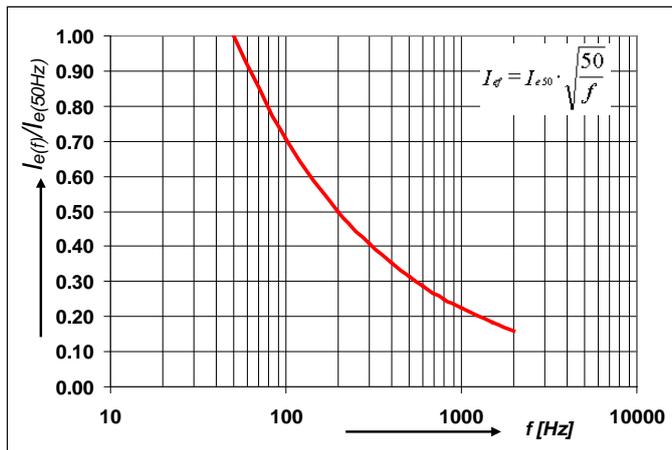


Fig. 2.4-3

Näherungsweise Belastbarkeit von Stromschienen bei höheren Frequenzen [12]

I_{e50} Belastbarkeit bei 50 Hz

I_{ef} Belastbarkeit bei der Frequenz f

Zur Reduktion der Verluste sollten keine rahmenförmigen Kabelklemmen verwendet werden. Dies ist besonders bei Strömen $> 100\text{A}$ zu beachten!

Für 1-phasige Lasten über 400 Hz sind bei Schützen die beiden äusseren Pole parallel für die Hinleitung und der mittlere Pol für die Rückleitung zu benutzen. Dieses ergibt eine teilweise gegenseitige Kompensation der magnetischen Induktion.

2.4.3.2 Einfluss der Netzfrequenz auf das Schaltvermögen

Die Anzugsströme von Motoren für höhere Frequenzen sind manchmal höher als bei 50/60 Hz. Dies kann bei 200 Hz bis zum 15-fachen und bei 400 Hz bis zum 20-fachen Bemessungsstrom führen. Der Leistungsfaktor kann deutlich schlechter sein als bei Motoren für 50/60 Hz. Die erhöhten Einschaltströme sind bei der Geräteauswahl zu berücksichtigen.

Schaltvermögen von Schützen und Lastschaltern

Beim Ausschalten von Wechselstrom muss während des Nulldurchgangs die Schaltstrecke genügend entionisiert werden, um ein Wiederzünden des Lichtbogens in der nächsten Halbwelle zu verhindern. Bei höheren Frequenzen erfolgt der Wiederanstieg der Spannung nach dem Nulldurchgang meist rascher. Die Lichtbogendauer je Halbwelle und damit die Ionisierung der Schaltstrecke ist jedoch kleiner. Deshalb haben die Schütze und Lastschalter (Nullpunktlöscher) bis etwa 400 Hz praktisch das gleiche Schaltvermögen wie bei 50/60 Hz.

Generell muss bei Schützen und Lastschaltern - soweit die Einschaltströme zulässig sind (siehe oben) - nur aufgrund der grösseren thermischen Belastung bei höheren Frequenzen eine Reduzierung des Bemessungsstromes I_e nach Fig. 2.4-2 erfolgen.

Ungünstiger sind die Verhältnisse bei niedrigeren Frequenzen. Hier überwiegt der Einfluss der starken Ionisation des Schaltraumes durch den länger brennenden Lichtbogen bei nicht strombegrenzenden Schaltgeräten. Das Schaltvermögen sinkt bei niedrigeren Frequenzen und wird stärker von der Spannung und von der Induktivität der Last abhängig.

Der volle Bemessungsbetriebsstrom bei 400 V und 50/60 Hz (dreipolig) kann bei 16 2/3 Hz und 400 V bei zwei Polen in Serie zugelassen werden. Für Bemessungsbetriebsspannungen bis 500 V und 16 2/3 Hz sind alle Pole in Serie zu schalten, um mit dem vollen Bemessungsbetriebsstrom belasten zu können.

Bei Frequenzen unter 16 2/3 Hz muss das Gleichstromschaltvermögen der Schaltgeräte gemäss Katalogangaben zugrunde gelegt werden.

Schaltvermögen von Leistungsschaltern

Die Kurzschlussströme in Mittelfrequenznetzen sind vergleichsweise niedrig. Eine etwaige Verringerung des Leistungsschaltvermögens bei Frequenzen über 400 Hz gegenüber 50/60 Hz ist daher de facto problemlos.

Der Effekt der Strombegrenzung reduziert sich mit zunehmender Frequenz, da bei höheren Frequenzen das Maximum des Kurzschlussstroms bereits während der Reaktionszeit des Schalters erreicht wird. In Anbetracht der vergleichsweise niedrigen Kurzschlussströme in Mittelfrequenznetzen ist dies in der Praxis nicht relevant. Die kurzen Abschaltzeiten strombegrenzender Leistungsschalter bleiben erhalten.

Bei Serieschaltung von zwei Polen erreichen Leistungsschalter mit Strombegrenzung in Einphasennetzen bis 400 V typisch das Bemessungs-Ausschaltvermögen bei 50/60 Hz. Bei Spannungen über 400 V bis 690 V Wechselspannung ist dazu die Serieschaltung von drei Polen nötig. In Einphasennetzen ist stets darauf zu achten, dass alle drei thermisch verzögerten Überlastauslöser vom Strom durchflossen werden.

2.4.3.3 *Ansprechverhalten der Auslöser bei Netzfrequenzen < 50 Hz und > 60 Hz*

Thermische Überlastauslöser

Thermisch (stromabhängige) verzögerte Überlastauslöser und –relais arbeiten mit Bimetallstreifen. Diese werden meist mittels einer Heizwicklung durch die Stromwärme des Betriebsstroms oder durch den Sekundärstrom eines Stromwandlers beheizt.

Bis etwa 400 Hz ist die Stromwärme in den Heizwicklungen (ohmsche Verluste) die vorwiegende Wärmequelle. Die zusätzliche induktive Erwärmung in den Bimetallen selbst ist bis zu diesen Frequenzen praktisch vernachlässigbar, so dass die Auslösecharakteristik nur unwesentlich flinker wird als bei 50 Hz. Bei Frequenzen über 400 Hz steigt der Anteil der induktiven Erwärmung und der Auslösegrenzstrom sinkt mit steigender Frequenz.

Überlastrelais, die an Hauptstromwandler mit hohem Überstromfaktor (Schutzwandler) angeschlossen sind oder einen eingebauten Stromwandler haben, weisen bei Frequenzen über 50 Hz bis 400 Hz eine etwas flinkere Auslösekennlinie im Vergleich zu 50 Hz auf.

Die Auslösekennlinie von Relais mit Sättigungswandler für Schweranlauf wird mit zunehmender Frequenz bis 400 Hz erheblich flinker, da der Sättigungseffekt proportional zur Frequenz gegen höhere Ströme verschoben wird.

Elektronische Überlastgeräte

Wegen des unterschiedlichen Funktionsprinzips kann keine generelle Aussage zum Verhalten elektronischer Überlastrelais bei Frequenzen über und unter 50/60 Hz gemacht werden. Bei Relais mit Stromwandlern ist zu beachten, dass der Einsatz gegen tiefe Frequenzen wegen Wandlersättigung begrenzt ist.

Kurzschluss-Auslöser

Für das Ansprechen elektromagnetischer Überstromauslöser ist neben der Höhe des Stroms auch die Dauer massgebend, während der der Strom ansteht. Bei 50/60 Hz sprechen die Anker der elektromagnetischen Überstromauslöser innerhalb etwa 5 ms an. Während der Halbwelle reicht die Anzugskraft aus, um die Anker völlig bis in ihre Endlage durchzuziehen. Bei höheren Frequenzen ist die Dauer einer Halbwelle hierfür zu kurz.

Die Ansprechschwelle der Kurzschluss-Auslöser erhöht sich über 50/60 Hz und nähert sich tendenziell bei etwa 400 Hz dem 1.4-fachen des 50/60 Hz-Wertes.

Erhöhte Betriebsfrequenzen können zu erhöhter Erwärmung der Auslöser führen.

2.4.3.4 *Schaltgeräte im Einsatz mit Softstartern*

Überlastschutz

Thermorelais und Leistungsschalter verfügen über auf den Motornennstrom einstellbare thermische Überstromauslöser und bilden auch während eines Sanftanlaufs die Motorerwärmung nach. Auch die Oberschwingungsanteile des Stroms, die den Motor miterwärmen, werden erfasst.

Das Verhalten elektronischer Motorschutzgeräte bezüglich der Wirkung von Oberschwingungen (z.B. effektivwert-richtige Messung) ist den jeweiligen Geräte-Unterlagen zu entnehmen.

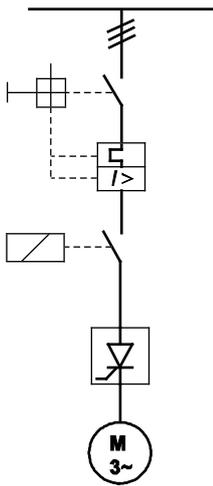


Fig. 2.4-4
Prinzipieller Aufbau eines Hauptstromkreises mit Leistungsschalter, Hauptschütz und Softstarter

Anlagen, die Schweranläufe mit einer Anlaufzeit via Softstarter von etwa 1 Minute und länger zulassen, bedürfen nicht nur einer Spezialauslegung des Motors, sondern auch der Schalt- und insbesondere der Schutzgeräte.

Von Softstartern gesteuerte Motoren für Schweranlauf werden vorteilhaft mit elektronischen Motorschutzgeräten geschützt. Dabei muss der Leistungsschalter so gewählt und eingestellt sein, dass er nicht vor dem Motorschutzgerät auslöst und für die gegebene Belastung (Oberschwingungsgehalt und Anlaufzeit) thermisch geeignet ist. Vorteilhaft werden Leistungsschalter ohne thermischen Auslöser eingesetzt. Die Auswahl und Einstellung des Leistungsschalters erfolgt wie für Schweranlaufbedingungen (siehe Abschnitt 4.1.2.2). Der Leistungsschalter hat in diesem Fall nur noch Kurzschlussschutz und/oder Leitungsschutz sicherzustellen.

Kurzschlussschutz

Bei Kurzschluss sind die Leistungshalbleiter der Softstarter kritisch und gefährdet. Leistungsschalter sind nicht ausreichend flink, um die Leistungshalbleiter der Softstarter vor Kurzschluss zu schützen. Für den Kurzschlussschutz sind daher die Angaben des Softstarter-Herstellers zu beachten. Vielfach wird aus Kostengründen auf einen Kurzschlussschutz der Leistungshalbleiter des Softstarters verzichtet, wodurch eine solche Koordination nur den Koordinationstyp 1 erreicht.

2.4.3.5 Schaltgeräte im Einsatz mit Frequenzumrichtern (Invertiern)

Überlastschutz eingeangsseitig

Siehe auch Abschnitt 3.10.4

Motoren, die von einem Inverter gesteuert werden, sind nicht direkt mit dem speisenden Netz verbunden (via Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter, Fig. 2.4-5). Leistungsschalter oder Motorschutzgeräte, vor den Inverter geschaltet, erhalten keine direkte Information über den Zustand des Motors und können damit den Motorschutz nicht wahrnehmen. Motorschutzfunktionen sind üblicherweise im Inverter integriert.

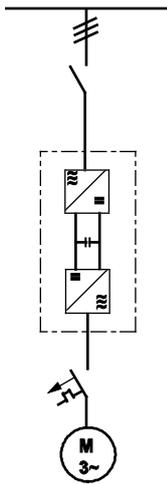


Fig. 2.4-5

Prinzipieller Aufbau eines Hauptstromkreises mit Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter des Inverters. Vielfach werden eingangsseitig (geräteintern oder extern) Filter vorgesehen, um Netzurückwirkungen zu reduzieren.

Da der Blindstrom des Motors von der Zwischenkreiskapazität geliefert wird, ist der Netzstrom kleiner als der Motorstrom und sein $\cos \varphi$ nahezu 1. Wegen des Oberschwingungsgehaltes des Stromes ist die thermische Überstromauslösung des Leistungsschalters ca. auf das 1.2-fache des Motornennstroms einzustellen, höchstens auf die zulässige Strombelastbarkeit der Anschlussleitung.

Kurzschlusschutz

Inverter schützen sich meist selbst gegen ausgangsseitige Kurzschlüsse. Kurzschlüsse auf der Netzseite zwischen Polleitern oder Polleitern und Erde werden vom netzseitigen Kurzschlusschutzorgan (Leistungsschalter oder Sicherung) abgeschaltet.

Leistungsschalter, Motorschutzrelais oder Schütze im Ausgangskreis von Invertern

Werden Niederspannungs-Schaltgeräte im Ausgangskreis von Invertern vorgesehen, so müssen diese für die hohe Taktfrequenz des Ausgangssignals von mehreren tausend Hz geeignet sein. Der Oberschwingungsgehalt des Stromes kann zu Überhitzungen der Geräte führen. Speziell bei Leistungsschaltern mit Schlaganker-Magnetauslösern gilt, dass deren Empfindlichkeit gegenüber Stromoberwellen mit abnehmendem Bemessungsstrom zunimmt. Als Richtwert gilt: Aufgrund der hohen Windungszahlen der Schlaganker ist bei Varianten <10 A Nennstrom mit unzulässiger Erwärmung zu rechnen. Die Herstellerangaben sind zu beachten.

Bei langen geschirmten Leitungen zwischen dem Ausgang des Frequenzumrichters und dem Motor kann durch die Kapazität der Leitung eine hohe Belastung dazwischenliegender Schaltkontakte entstehen, die bis zum Verschweissen der Kontakte führen kann. Auch kann es dadurch unter Umständen wegen der hohen Ladeströme zu Fehlauflösungen kommen. Ähnliche Auswirkungen können Filter haben. Durch die betriebsmässigen steiflankigen Schaltvorgänge von Invertern können zusätzliche Spannungsbelastungen durch Wanderwelleneffekte auf langen Leitungen entstehen. Geeignete Filtermassnahmen können zur Abhilfe erforderlich sein.

Generell ist empfohlen, durch Steuerungsmassnahmen dafür zu sorgen, dass ausgangsseitige Schütze stromlos schalten, d.h. dass der Frequenzumrichter nach dem Schütz ein- und vor dem Schütz ausschaltet.

Überlastschutz ausgangsseitig

Überlastschutzgeräte mit Bimetallen (Bimetallrelais und Leistungsschalter mit Bimetall-Auslösern) sind für 50/60 Hz ausgelegt. Nachdem ihre Funktion auf dem Prinzip der Erwärmung der Bimetalle durch den Motorstrom basiert, beziehen sich die Auslösewerte auf die Erwärmung durch 50/60-Hz-Ströme. Die Taktfrequenzen von Frequenzumrichtern reichen je nach Gerätekonzept von einigen kHz bis in den Ultraschallbereich und erzeugen Oberschwingungsströme im Ausgang, die zu Zusatzerwärmungen in den Bimetallen führen. Lange geschirmte Leitungen

zum Motor können wegen der Leitungskapazität zu einer zusätzlichen Erhöhung des Oberschwingungsanteils führen.

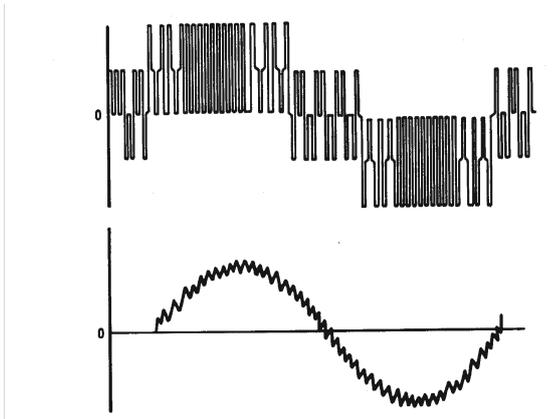


Fig. 2.4-6

Die Taktung der Ausgangsspannung (oben) führt zu einem Oberschwingungsgehalt des Ausgangsstroms von Frequenzumrichtern (unten), der das Verhalten von lastseitigen Schutzgeräten beeinflusst.

Die Erwärmung ist nicht nur abhängig von Effektivwert des Stroms, sondern hängt auch von Induktionseffekten der höherfrequenten Ströme in den Metallteilen der Geräte ab. Die zusätzliche Erwärmung resultiert in einer Reduktion des Grenzstroms der Überlastrelais, deren Ausmass für die jeweilige Kombination Frequenzumrichter / Überlastrelais / Verbindungsleitungen / Motor individuell ermittelt werden muss. Als Folge dieser Effekte ist bei Überlastrelais mit Bimetallen die Stromeinstellung zu erhöhen, gegebenenfalls auch ein höherer Strombereich zu wählen. Je nach Gerätekombination kann der Faktor bis zu 150 % sein.

Da die Ermittlung der Grenzstromveränderung im Einzelfall und für alle möglichen Gerätekombinationen sehr aufwendig ist, empfiehlt sich in der Praxis die Einstellung des Motorschutzgerätes durch Versuch. Dazu wird der Antrieb mit Nennlast für etwa ein bis zwei Stunden betrieben und das Überlastrelais vorerst so eingestellt, dass es sicher nicht auslöst. Am Ende dieser Betriebszeit reduziert man die Stromeinstellung am Gerät sukzessive bis zur Auslösung. Die definitive Einstellung erfolgt auf etwa 10% über dem Auslösewert. Falls eine Unterbrechung des Betriebs durch die Auslösung während des Versuchs unerwünscht ist, kann der Auslösekontakt vorübergehend überbrückt werden. Die so ermittelte Stromeinstellung ist gleichzeitig Basis für eine Überprüfung der Dimensionierung von Schützen oder anderen Schaltgeräten im Stromkreis.

Auch das Verhalten elektronischer Überlastrelais kann frequenzabhängig sein und vom Oberschwingungsanteil der Inverterströme beeinflusst werden. Eine generelle Aussage ist wegen der unterschiedlichen Funktionsprinzipien nicht möglich. Bei elektronischen Überlastrelais mit Stromwandlern ist zu beachten, dass der Einsatz gegen kleine Frequenzen wegen möglicher Wandlersättigung begrenzt ist.

2.4.4 Einsatz von vierpoligen Schaltgeräten

Der Grossteil aller Niederspannungs-Schaltgeräte ist mit drei Kontakten im Hauptstromkreis ausgerüstet, die Drehstromlasten allpolig schalten. In einigen Anwendungen sind Schaltgeräte mit vier Hauptpolen erforderlich, sei es aus Sicherheitsgründen oder für eine optimale Lösung der Anwendung. Dabei können unterschiedliche Konfigurationen der Geräte erforderlich sein.

2.4.4.1 Applikationen von Schaltgeräten mit 4 Schliesskontakten

Vier Schliesskontakte sind u.a. in den nachstehenden Applikationen erforderlich bzw. von Vorteil

- Anwendungen, in denen beim Abschalten bzw. Trennen von Lasten der Neutralleiter unterbrochen werden muss. Dies kann in Netzen mit ungünstigen Erdungsverhältnissen des Neutralleiters, in TT-Netzen, bei der Schutzabschaltung in IT-Netzen oder bei impedanzgeerdeten Netzen der Fall sein. Dabei ist zu beachten, dass der Neutralleiter voreilend oder gleichzeitig schliesst und nacheilend oder gleichzeitig mit den anderen Hauptpolen öffnet.

Beim Schalten nichtlinearer Verbraucher ist die strommässige Belastung des Nulleiters besonders zu beachten. Siehe auch Abschnitt 2.4.3.

- Netzumschaltungen (z.B. für Notstromversorgung), bei denen eine vollständige Trennung der beiden Netze erwünscht ist.
- Schalten von mehreren einphasigen Lasten (Heizungen, Lampen) mit einem Schaltgerät.
- Schalten von Gleichstromlasten mit hoher Bemessungsspannung, die eine Serieschaltung von vier Kontakten erfordern (siehe auch Abschnitt 2.4.2).

2.4.4.2 Applikationen von Schaltgeräten mit 2 Schliess- und 2 Öffnungskontakten

Geräte mit zwei Schliessern und zwei Öffnern werden vorteilhaft in Anwendungen eingesetzt, in denen stets einer von zwei Stromkreisen eingeschaltet sein muss. Dies sind z.B.

- Umschaltung zwischen zwei Stufen einer Heizung (Fig. 2.4-7)
- Netzumschaltung in Einphasen-Netzen – z.B. Notstromversorgungsanlagen (Fig. 2.4-7)
- Drehrichtungsumkehr von Motoren für platzsparende Geräteanordnung (Fig. 2.4-8)
- Drehrichtungsumkehr von 2-Stufen-Motoren mit getrennten Wicklungen (Fig. 2.4-9)

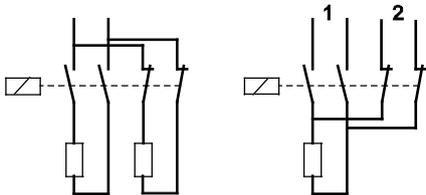


Fig. 2.4-7

Vierpolschütze mit 2S/2Ö Kontaktbestückung zur Umschaltung von einphasigen Lasten (links) oder zwischen zwei Netzen (rechts)

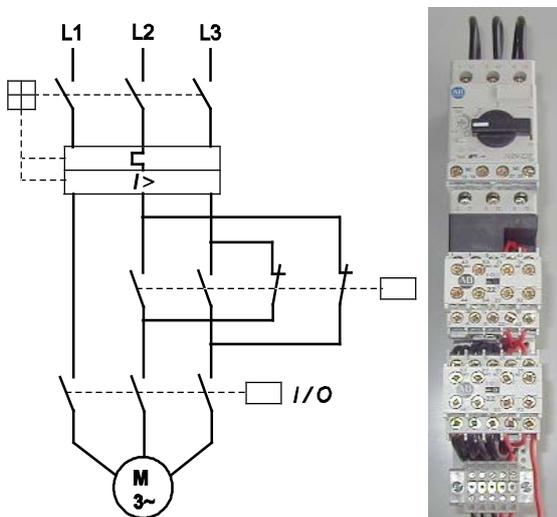


Fig. 2.4-8

Schlanker Wendestarter mit einem 2S/2Ö-Schütz zur Drehrichtungsumkehr

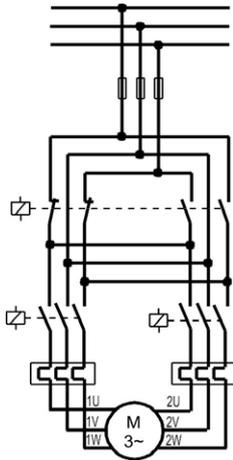


Fig. 2.4-9
Drehrichtungsumkehr eines Zweistufen-Motors mit getrennten Wicklungen

2.4.4.3 Applikationen von Schaltgeräten mit 3 Schliess- und 1 Öffnungskontakt

Geräte mit drei Schliessern und einem Öffner werden vorteilhaft in Anwendungen eingesetzt, in denen bei ausgeschalteter Hauptlast – z.B. Motor – eine andere einphasige Last eingeschaltet sein muss. Anwendungen können sein:

- Sicherheitsschaltungen
- Gleichstrom-Bremssysteme, die beim Ausschalten eines Antriebes aktiviert werden
- Kupplungen, die bei ausgeschaltetem Antrieb gelöst sein müssen

2.4.5 Einsatz von Leistungsschaltern in IT-Netzen

IT-Netze werden eingesetzt um zu vermeiden, dass ein Erdschluss wie in einem geerdeten Netz unmittelbar zur Abschaltung des betroffenen Stromkreises führt. Ein erster Erdschluss resultiert zwar in einer Potentialverlagerung des gesamten Netzes, lässt aber den weiteren Betrieb vorübergehend zu. Spezielle Erdschluss-Überwachungseinrichtungen melden allfällige Erdschlüsse und geben damit die Möglichkeit zu einer raschen Fehlerbehebung – vielfach ohne Störung des Betriebs der Anlage. Die Verhältnisse in hochohmig geerdeten Netzen sind ähnlich.

Tritt jedoch ein zweiter Erdschluss in einer anderen Phase auf, entsteht ein Kurzschluss, der vom Kurzschlusschutzgerät unmittelbar abgeschaltet werden muss. Je nach Ort der Kurzschlüsse ist die abzuschaltende Spannung unterschiedlich (Fig. 2.4-10). Dies führt beim Kurzschlusschutz-Organ zu unterschiedlicher Spannungsbelastung und im Fall von Leistungsschaltern zu unterschiedlicher Anforderung an das Schaltvermögen.

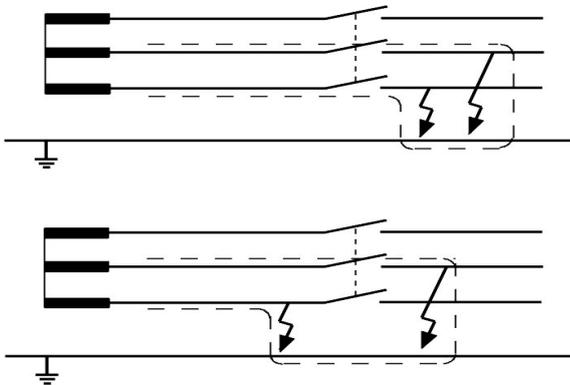


Fig. 2.4-10
Doppelerdschlüsse lastseitig des Leistungsschalters führen zu keiner erhöhten Beanspruchung. Liegt jedoch eine Erdschlussstelle speiseseitig und die andere lastseitig, so erhöht sich die Anforderung an das Schaltvermögen wegen der erhöhten Spannungsbeanspruchung wesentlich.

Treten beide Kurzschlüsse lastseitig des Leistungsschalters auf, teilt sich die Schaltarbeit auf zwei Kontakte auf und das geforderte Schaltvermögen entspricht den normalen 3-phasigen Werten.

Ist jedoch der Ort einer Kurzschlussstelle speiseseitig des Leistungsschalters und der zweite Kurzschluss lastseitig, so hat ein Kontakt des Leistungsschalters die volle Schaltarbeit zu leisten und dies bei der Spannung Phase-Phase. In diesem Fall ist das unter Umständen deutlich niedrigere einpolige Schaltvermögen des Leistungsschalters bei der verketteten Spannung massgebend. Falls nicht aus den Geräteunterlagen ersichtlich, sind die Werte anzufordern. Übersteigt der Kurzschlussstrom an der Einbaustelle das 1-polige Schaltvermögen des Leistungsschalters, so ist eine Vorsicherung erforderlich.

Bei einem 3-poligen Kurzschluss unterscheiden sich IT-Netze nicht von anderen Netzformen. Es gelten dann unverändert das Grenz-Kurzschlusschaltvermögen I_{cu} bzw. das Betriebs-Kurzschlusschaltvermögen I_{cs} .

Leistungsschalter nach IEC60947-2 sind für den Einsatz in IT-Systemen geeignet, wenn sie nicht mit dem Symbol  gekennzeichnet sind. Die Prüfung erfolgt gemäss Annex H.

2.4.6 Schaltgeräte für Sicherheitsanwendungen

Die Sicherheit von Maschinen, Anlagen und Prozessen bezüglich des Schutzes von Personen und Sachwerten vor Schäden jeder Art ist die übergeordnete Zielsetzung von Gesetzen, Vorschriften und Normen für technische Massnahmen und Lösungen. Auch Niederspannungsschaltgeräte finden in sicherheitsrelevanten Funktionen Anwendung. Im Abschnitt 4 „Schutz“ wird näher auf die Gefahren eingegangen, die von der elektrischen Energie herrühren.

In Sicherheitsanwendungen ist es von grosser Bedeutung, eine zuverlässige Rückmeldung über die Stellung der Hauptkontakte zu erhalten, so dass z.B. ausgeschlossen werden kann, dass ein Hilfskontakt geöffnete Hauptkontakte meldet, während sie de facto – z.B. wegen Verschweissens - geschlossen sind. In diesem Zusammenhang kommt der Begriff „Spiegelkontakte“ für Leistungsschütze ins Spiel. Analog dazu sichert die Massnahme der „Zwangsführung“ oder „mechanischen Kopplung“ von Kontakten bei Steuerschützen, dass die Stellung von Schliess- und Öffnungskontakten nicht widersprüchlich sein kann.

Bei modularen Systemen müssen Spiegel- und zwangsgeführte Kontakte unverlierbar mit dem Grundgerät verbunden sein.

2.4.6.1 Zwangsgeführte Kontakte

Anhang L von IEC 60947-5-1 legt die Kriterien für die Zwangsführung von Kontakten fest. In der englischen Sprache wird dafür der Begriff „mechanically linked“ (mechanisch verbunden) verwendet. Die Norm definiert zwangsgeführte Kontakte als „eine Kombination von n Schliesskontakten und m Öffnungskontakten, die derart gestaltet ist, dass sie nicht gleichzeitig geschlossen sein können“. Die Norm definiert auch die Prüfbedingungen: Bei Verschweissen eines Kontaktes – z.B. eines Schliessers – müssen die Öffner bei abgefallenem Schütz noch eine Öffnungsdistanz von 0.5 mm aufweisen bzw. einer Impulsprüfspannung von 2.5 kV Stand halten. Das Entsprechende gilt bei Verschweissen eines Öffners.

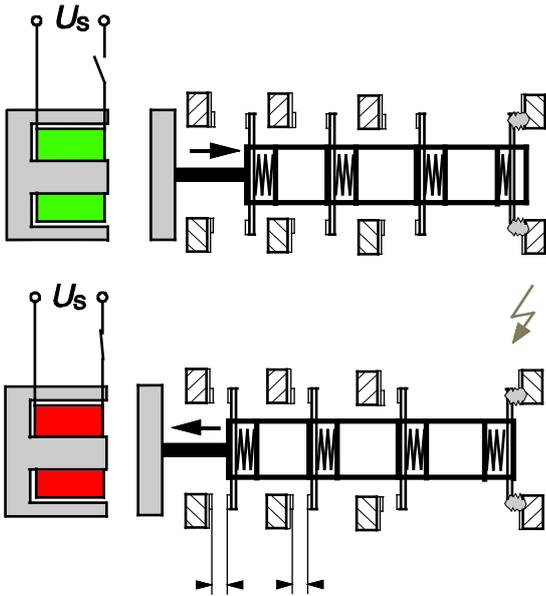


Fig. 2.4-11

Die Schliesskontakte bleiben bei Zwangsführung offen, wenn das Steuerschütz erregt wird und ein Öffnungskontakt verschweisst ist.

Gemäss Norm sind zwangsgeführte Kontakte klar zu kennzeichnen, am Gerät oder in den Unterlagen oder an beiden Orten. Fig. 2.4-12 zeigt die zu verwendenden Symbole.

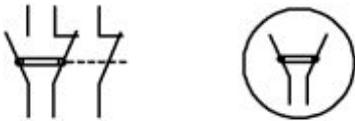


Fig. 2.4-12

Symbol für zwangsgeführte Kontakte zusammen mit Kontakten, die nicht zwangsgeführt sind (links) und Symbol für Zwangsführung, wenn alle Kontakte zwangsgeführt sind (rechts)

2.4.6.2 Spiegelkontakte (Mirror Contacts)

Anhang F von IEC 60947-4-1 legt die Anforderungen für so genannte Spiegelkontakte fest, d.h. für die eindeutige Rückmeldung des Schaltzustands der Hauptkontakte im Fehlerfall, z.B. bei verschweissten Hauptkontakten. Die Norm definiert Spiegelkontakte als Öffner-Hilfskontakte, die nicht gleichzeitig mit den Hauptkontakten geschlossen sein können, wenn ein Hauptkontakt verschweisst ist. Die Prüfbedingungen sind analog jenen von zwangsgeführten Kontakten: Die Öffner-Hilfskontakte, die als Spiegelkontakte ausgeführt sind, müssen bei entriegeltem Schütz noch eine Öffnungsdistanz von 0.5 mm aufweisen bzw. einer Impulsprüfspannung von 2.5 kV Stand halten.

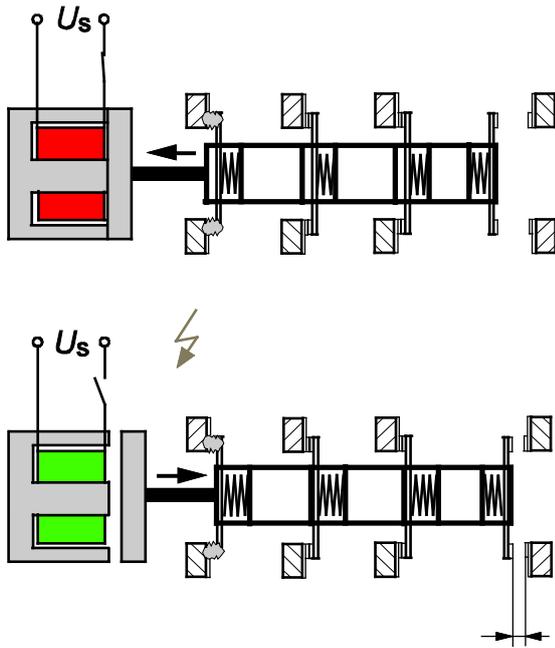


Fig. 2.4-13
 Prinzip von Spiegelkontakten: der Öffner-Hilfskontakt bleibt bei entriegeltem Schütz offen, wenn ein Hauptkontakt verschweisst ist.

Ein Leistungsschütz kann mehrere Spiegel-Hilfskontakte haben. Bei grossen Schützen kann es erforderlich sein, zwei Spiegelkontakte in Serie zu schalten, von denen einer links und einer rechts angebaut ist. So kann auch bei allfälliger Schrägstellung des Schützankers – z.B. wenn ein aussen liegender Kontakt verschweisst ist – eine sichere Rückmeldung erfolgen.

Wie zwangsgeführte Kontakte müssen Spiegelkontakte direkt am Gerät, in der Dokumentation oder an beiden Orten gekennzeichnet sein.



Fig. 2.4-14
 Symbol zur Kennzeichnung von Spiegelkontakten

2.4.7 Explosionsgefährdete Bereiche

2.4.7.1 Geschichte, Richtlinien und Vorschriften

Die Richtlinie 94/9/EG (ATEX 05) regelt die Anforderungen an den Explosionsschutz für den Bereich der Europäischen Union. Sie befasst sich mit der Beschaffenheit von explosionsgeschützten Geräten, Schutzsystemen und Komponenten für den freien Warenverkehr im Binnenmarkt der EU und legt fest, dass die Verwendung solcher Geräte in den Mitgliedstaaten nicht verboten, behindert oder eingeschränkt werden darf.

Die Richtlinie ist nach dem so genannten „Neuen Ansatz“ strukturiert. Ein wesentlicher Aspekt ist der Verzicht auf eine starre normative Festlegung, vielmehr sind die Anforderungen an die Produkte in der Richtlinie selbst umfassend definiert (Anhang II: Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen für die Konzeption und den Bau von Geräten). Dies geschieht in pauschaler Form, so dass der Bezug auf geeignete Normen üblicherweise weiterhin vorzuziehen ist.

Während das In-Verkehr-Bringen von explosionsgeschützten Geräten (Schutzsystemen, Komponenten) EU-weit per Richtlinie 94/9/EG einheitlich geregelt ist, wird der sichere Betrieb dieser Geräte in letzter Konsequenz durch einzelstaatliche Verordnungen reglementiert. Die Richtlinie 1999/92/EG, auch Arbeitsschutzrichtlinie oder Betreiberrichtlinie genannt, setzt hierfür

Mindestanforderungen fest, die durch die nationalen Verordnungen nicht unterschritten werden dürfen.

Die umfangreichen CENELEC-Normen für die Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche haben in allen westeuropäischen Staaten ihre Gültigkeit und sind mit den IEC-Normen fast deckungsgleich.

2.4.7.2 Klassierung explosionsgefährdeter Bereiche

Beim Umgang mit brennbaren bzw. oxidierenden Stoffen, die in feiner Verteilung als Gase, Dämpfe, Nebel oder Stäube vorliegen, können Explosionsgefahren bestehen. Zur Einleitung einer Explosion muss eine wirksame Zündquelle vorhanden sein. Zündquellen können in elektrischen Anlagen als elektrische Funken und Lichtbogen, mechanische Funken oder erwärmte Oberflächen auftreten.

Explosionsgefährdete Bereiche sind Zonen, in denen aufgrund der örtlichen und betrieblichen Verhältnisse eine explosionsfähige Atmosphäre in Gefahr drohender Menge auftreten kann. Die Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche erfolgt in Zonen (IEC/EN 60079-10, EN 50281-3 und IEC/EN 61241-10) nach Art der brennbaren Stoffe (Gase, Dämpfe und Stäube) und nach dem temporären Verhalten (ständig, gelegentlich oder sehr selten und kurz) des brennbaren Stoffes im Ex-Bereich (**Tab. 2.4-2**).

Gemäss Anhang I der Richtlinie 94/9 EG werden 2 Gerätegruppen unterschieden:

- „Gerätegruppe I“ (Methan oder brennbare Stäube) für den Bergbau und
- „Gerätegruppe II“ (Gase oder Staub/Luft-Gemische) für übrige Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre.

Die „Gerätegruppe II“ wird weiter nach den Explosionsgruppen IIA (z.B. Propan), IIB (z.B. Ethylen) und IIC (z.B. Wasserstoff) unterteilt. Die Gefährlichkeit der Gase nimmt von Explosionsgruppe IIA nach IIC zu. Entsprechend steigen die Anforderungen an elektrische Betriebsmittel.

Brennbare Gase und Dämpfe sind nach ihren Zündtemperaturen, die Betriebsmittel nach der Oberflächentemperatur in Temperaturklassen (T1 ... T6, **Tab. 2.4-4**) eingeteilt.

Da die explosionsgeschützten Betriebsmittel nicht immer den höchsten Anforderungen entsprechen müssen, erfolgt ihre Zuordnung entsprechend den Zonen, Temperaturklassen und der Explosionsgruppe der brennbaren Stoffe. Dies ermöglicht die Ausführung explosionsgeschützter Betriebsmittel für verschiedene Zündschutzarten (**Tab. 2.4-3**).

Erforderliche Kennzeichnung der einsetzbaren Betriebsmittel nach IEC/EN			Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche	
Gerätegruppe (Einsatzbereich)	Brennbare Stoffe	Geräte-kategorie	Zoneneinteilung IEC/EN	Temporäres Verhalten des brennbaren Stoffes in den explosionsgefährdeten Bereichen
I Bergbau	Methan, Staub	M1	Untertägige Bergwerke sowie deren Übertage-Anlagen	
		M2 oder M1		
II Übrige Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre	Gase, Dämpfe	1G	Zone 0	Sind ständig, langfristig oder häufig vorhanden
		2G oder 1G	Zone 1	Treten gelegentlich auf
		3G oder 2G/1G	Zone 2	Treten wahrscheinlich nicht auf, wenn doch nur selten oder kurzzeitig
	Stäube	1D	Zone 20	Sind ständig, langfristig oder häufig vorhanden
		2D oder 1D	Zone 21	Treten gelegentlich auf
		3D oder 2/1D	Zone 22	Treten wahrscheinlich nicht auf, wenn doch nur selten oder kurzzeitig

Erläuterung der Gerätekategorie:
M1 Weiterbetrieb beim Auftreten explosionsfähiger Atmosphäre muss gewährleistet sein
M2 beim Auftreten explosionsfähiger Atmosphäre müssen die Geräte abgeschaltet werden können
1G/D sehr hohe Sicherheit = Gerätesicherheit muss gewährleistet sein selbst bei seltenen Gerätestörungen, z.B. Ausfall von zwei Bauteilen gleichzeitig.
2G/D hohe Sicherheit = Gerätesicherheit muss gewährleistet sein bei häufig zu erwartenden Gerätestörungen, z.B. Ausfall von einem Bauteil.
3G/D sicher im Normalbetrieb = Gerätesicherheit muss gewährleistet sein im Normalbetrieb

Tab. 2.4-2

Kennzeichen der Ausführung der Betriebsmittel mit der Gerätegruppe (z.B. II) und der Gerätekategorie (z.B. 3 G für Zone 2) und Einteilung nach Zonen

Zündschutzart	Schutzprinzip	Zone	Vorschriften
			EN / IEC
Allgemeine Bestimmungen			EN 50014 IEC 60079-0
Installation			EN 60079-14 IEC 60079-14
Druckfeste Kapselung	d Übertragung einer Explosion nach aussen wird ausgeschlossen	1 / 2	EN 50018 IEC 60079-1
Erhöhte Sicherheit	e Vermeidung von Funken und Temperaturen	1 / 2	EN 50019 IEC 60079-7
Eigensicherheit	i Energiebegrenzung von Funken und Temperaturen	0 / 1 / 2	EN 50020/39 IEC 60079-11
Überdruckkapselung	p Ex-Atmosphäre wird von der Zündquelle ferngehalten	1 / 2	EN 50016 IEC 60079-2
Vergusskapselung	m Ex-Atmosphäre wird von der Zündquelle ferngehalten	1 / 2	EN 50028 IEC 60079-18
Ölkapselung	o Ex-Atmosphäre wird von der Zündquelle ferngehalten	1 / 2	EN 50015 IEC 60079-6
Sandkapselung	q Übertragung einer Explosion nach aussen wird ausgeschlossen	1 / 2	EN 50017 IEC 60079-5
Zündschutzart „n“	n Verschiedene Schutzprinzipien für Zone 2	2	EN 50021 IEC 60079-15
Schutz durch Gehäuse	IP Ex-Atmosphäre wird von der Zündquelle ferngehalten	20 / 21 / 22	EN 50281-1-1 IEC 61241-1

Tab. 2.4-3

Zündschutzarten und entsprechende EN- und IEC-Vorschriften

Die Kennzeichnung der Zündschutzarten der einsetzbaren Betriebsmittel z. B. für *Erhöhte Sicherheit „e“*, Explosionsgruppe IIC und Temperaturklasse T6 wird nach EN bzw. IEC wie folgt unterschieden (siehe auch Abschnitt 2.4.7.5):

- EN → EEx e IIC T6
- IEC → Ex e IIC T6

Für die nachstehenden Betrachtungen interessiert in erster Linie die Zündschutzart *Erhöhte Sicherheit „e“* von Motoren in Verbindung mit dem zugehörigen Motorschutz. Dabei ist zu beachten, dass die Motorschutzgeräte ausserhalb der explosionsgefährdeten Bereiche zu installieren sind. Diese Einsatzmöglichkeit wird nach CENELEC speziell gekennzeichnet (siehe Abschnitt 2.4.7.5). Bei dieser Zündschutzart werden besondere Massnahmen getroffen, um einen erhöhten Grad an Sicherheit zu gewährleisten und das Entstehen von unzulässig hohen Oberflächentemperaturen sowie von Funken oder Lichtbögen im Innern bzw. an äusseren Teilen elektrischer Betriebsmittel zu vermeiden.

2.4.7.3 Motoren für explosionsgefährdete Bereiche

Elektrische Antriebe, die in explosionsgefährdeten Bereichen betrieben werden, müssen so gebaut und ausgelegt sein, dass sie nicht zu einer Zündquelle werden können. Dies ist nicht nur während des normalen Betriebs und beim Anlauf, sondern auch im Störfall eines blockierten Läufers zu gewährleisten.

Temperaturen einer heissen Oberfläche als potentielle Zündquelle sind bei den Zündschutzarten *Druckfeste Kapselung „d“* (Übertragung einer Explosion nach aussen wird ausgeschlossen) und *Überdruckkapselung „p“* (Ex-Atmosphäre wird von der Zündstelle ferngehalten) nur an der Aussenseite der Gehäuse zu beachten. Wegen der Wärmeträgheit des Motorgehäuses ist eine kurzfristige Erwärmung der Wicklung bei diesen Zündschutzarten über die Grenztemperatur der Temperaturklasse hinaus aus Sicht des Explosionsschutzes als unkritisch anzusehen. Dagegen ist bei einem Motor der Zündschutzart *Erhöhte Sicherheit „e“* (Vermeidung von Funken und Temperaturen) auch im Innern eine kurzzeitige Überschreitung der Grenztemperatur der entsprechenden Temperaturklasse, für die der Motor ausgelegt ist, nicht zulässig.

		Grenztemperaturen (°C)					
Temperaturklasse		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Zündtemperatur IEC/EN 60079-14, Tab.1	>	450	300	200	135	100	85
Maximale Oberflächentemperatur EN 50014, Tab.1; IEC/EN 60079-14 Tab.1	≤	450	300	200	135	100	85
Wicklung der Klasse F dauernd EEx e, EN 50019, Tab. 3	≤	130	130	130	130	95	80
Wicklung der Klasse F am Ende von t _E EN 50019, Tab. 3	≤	210	210	195	130	95	80
		= bestimmt durch die Temperaturklasse des Gases					
		= bestimmt durch die Wärmeklasse (Isolierstoffklasse) der Wicklung					

Tab. 2.4-4

Grenztemperaturen elektrischer Maschinen der Zündschutzart „e“ mit Isolierstoffklasse F
IEC 60079-14 ed.4.0 Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Aus der Forderung, dass die vorzeitige Schädigung und Alterung der Motorwicklung sicher verhindert werden muss, entsteht eine weitere Einschränkung bezüglich des Erwärmungsverhaltens der Wicklung: Die zulässige Grenzüberetemperatur entsprechend der Isolierstoffklasse (Wärmeklasse) der Wicklung ist bei Motoren in der Zündschutzart „e“ gegenüber den normalen Werten um 10 bis 15 K reduziert. Dies bedeutet theoretisch eine Verdopplung der Wicklungslebensdauer und ist eine Massnahme zur Erhöhung der Sicherheit, die jedoch zu Lasten der Leistungsabgabe gegenüber den Normalwerten eines Motors gleicher Baugrösse führt.

Die zulässige Grenztemperatur der Wicklung einer elektrischen Maschine der Zündschutzart *Erhöhte Sicherheit „e“* ist einerseits abhängig von der Temperaturklasse aus Sicht des Explosionsschutzes, zum anderen von der Isolierstoffklasse der Wicklung. Tab. 2.4-4 zeigt die zutreffenden Grenzwerte für Motoren der Isolierklasse F.

Wird ein anderer Isolierstoff verwendet, ändern sich diese Werte entsprechend der Wärmeklasse des Isolierstoffes (Tab. 2.4-5).

Isolierstoffklasse	Grenztemperaturen (°C)			
	E	B	F	H
„d“, Dauerbetrieb	115	120	145	165
„e“, Dauerbetrieb	105	110	130	155
„e“, am Ende der t_E -Zeit	175	185	210	235

Tab. 2.4-5
Grenztemperaturen von Motoren für Zündschutzart „e“ und „d“ in Abhängigkeit von der Isolierstoffklasse der Wicklung

Bezüglich des Erwärmungsverhaltens einer elektrischen Maschine sind zwei Betriebszustände zu beachten: Dauerbetrieb und blockierter Motor.

Bei Dauerbetrieb unter Volllast erwärmt sich die Maschine langsam und erreicht je nach Baugröße nach Stunden die Beharrungstemperatur. Bei der höchstzulässigen Umgebungstemperatur darf diese Beharrungstemperatur weder die Grenztemperatur der Isolierstoffklasse noch die der Temperaturklasse überschreiten.

In dem in Fig. 2.4-15 schematisch dargestellten Beispiel für das Erwärmungsverhalten einer Maschine der Isolierstoffklasse F ist im Dauerbetrieb weder die zulässige Grenze der Temperaturklasse T4 noch die der Isolierstoffklasse F nach Erreichen der Beharrungstemperatur überschritten.

Der zweite Betriebsfall ist als kritischer zu betrachten. Er ergibt sich, wenn der Rotor des Drehstrom-Asynchron-Motors aus betriebswarmem Zustand blockiert. Der dann fließende Strom ist um ein Vielfaches höher als der Nennstrom und lässt die Temperatur in der Läufer- und Ständerwicklung schnell ansteigen. Eine Überwachungseinrichtung muss innerhalb der *Erwärmungszeit* t_E , der Zeit bis zur Erreichung der Grenztemperatur der Wicklung, die Maschine vom Netz trennen. Die *Erwärmungszeit* t_E ist die Zeit, nach der die zulässige Temperatur bei blockierten Läufer aus betriebswarmem Zustand des Motors erreicht wird. Sie ist ein Kennwert des Motors.

Wie das in Fig. 2.4-15 gewählte Beispiel für den blockierten Motor zeigt, bestimmt die Grenztemperatur der Temperaturklasse für die Einsatzfälle T4 und T3 die t_E -Zeit.

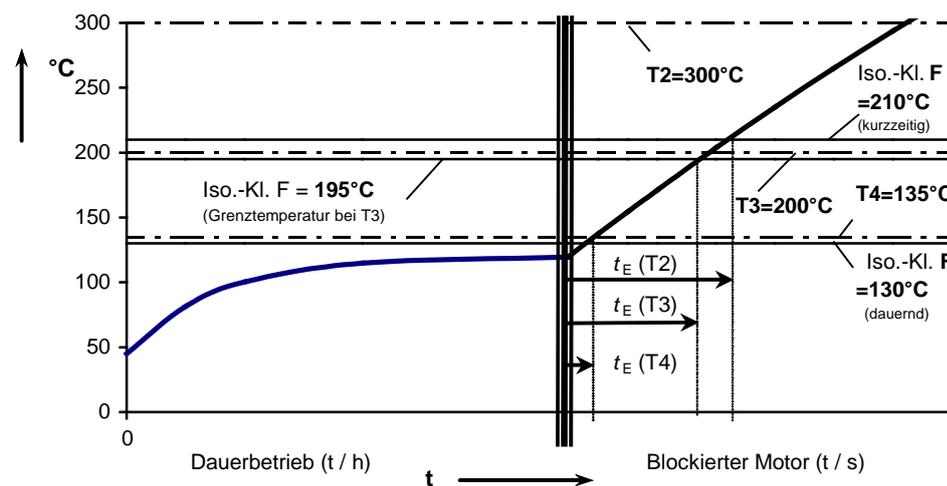


Fig. 2.4-15
Schematische Darstellung des Erwärmungsverhaltens von Motoren. Bei Blockierung aus dem betriebswarmen Zustand muss der Motor innerhalb der t_E -Zeit vom Netz getrennt werden.

Ist dagegen die Maschine für explosionsgefährdete Bereiche der Temperaturklasse T2 (oder T1) vorgesehen, wird die thermische Grenze durch die kurzzeitig zulässige Grenztemperatur der Isolierstoffklasse F von 210 °C gegeben.

Ex-Motoren sind für sich allein nicht explosionsgeschützt. Sie erlangen die erforderliche Explosionssicherheit erst durch zusätzliche Massnahmen bei der Installation durch zweckentsprechende Auswahl und Einsatzbedingungen. Bei der Explosionsschutzart *Erhöhte Sicherheit „e“* ist dies insbesondere das Zusammenschalten mit einer richtig bemessenen und eingestellten Überlastschutzeinrichtung.

2.4.7.4 Schutz von Motoren der Zündschutzart *Erhöhte Sicherheit „e“*

Für den Überlastschutz von Motoren der Zündschutzart *Erhöhte Sicherheit „e“* gelten folgende Vorschriften und Bestimmungen.

- IEC/EN 60947-1, IEC/EN 60947-2 und IEC/EN 60947-4-1 und IEC/EN 60947-8
- IEC/EN 60079-14, Electrical installation in hazardous areas (other than mines), Abschnitte 7 a und 11.2.1

Als Schutzeinrichtungen kommen unter anderem in Betracht:

- Überlastschutzeinrichtungen mit stromabhängig verzögerter Auslösung
- Einrichtungen zur direkten Temperaturüberwachung mit Hilfe von Temperaturlühlern

Schutz durch Motorschutzgeräte mit stromabhängig verzögertem Überlastauslöser

Der Überlastschutz für Motoren in der Zündschutzart „e“ muss so ausgewählt werden, dass er den Bemessungsstrom I_N überwacht und den Motor bei festgebremstem Läufer innerhalb der Erwärmungszeit t_E allpolig abschalten kann. Die Erwärmungszeit t_E ist die Zeit, nach der die zulässige Temperatur bei festgebremstem Läufer aus betriebswarmem Zustand des Motors erreicht wird. Für den Überlastschutz wird dabei die Kennlinie ausgehend vom kalten Zustand des Relais zugrunde gelegt, da die Schutzrelais meist bereits nach kurzer Pause wieder gemäss dieser Kennlinie auslösen, während Motoren viel langsamer abkühlen. Der Anzugsstrom I_A und die Erwärmungszeit t_E sind dem Leistungsschild des Motors zu entnehmen.

Am Betriebsort oder via Internet müssen die Auslösekennlinien des Überlastschutzes verfügbar sein. Die Kennlinien sollen die Auslösezeiten t_A bei 3-poliger Belastung ausgehend vom kalten Zustand in Abhängigkeit vom Anzugsstromverhältnis I_A/I_N – mindestens 3- bis 8-fach - darstellen. Die tatsächlichen Auslösezeiten müssen in einem Toleranzband von $\pm 20\%$ der angegebenen Werte liegen.

Die Auslösezeit t_A des Überlastschutzgerätes muss für das I_A/I_N -Verhältnis des zu schützenden Motors kleiner sein als dessen Erwärmungszeit t_E .

Bei der Auswahl von Überlastrelais ist zu beachten, dass eine kurze Auslösezeit t_A zwar eine sichere Abschaltung innerhalb der Erwärmungszeit t_E gewährleistet. Andererseits muss der Hochlauf des Motors störungsfrei möglich sein.

IEC 60079-7 und EN 50 019 fordern Mindestwerte für die t_E -Zeit von Motoren (**Fig. 2.4-16**).

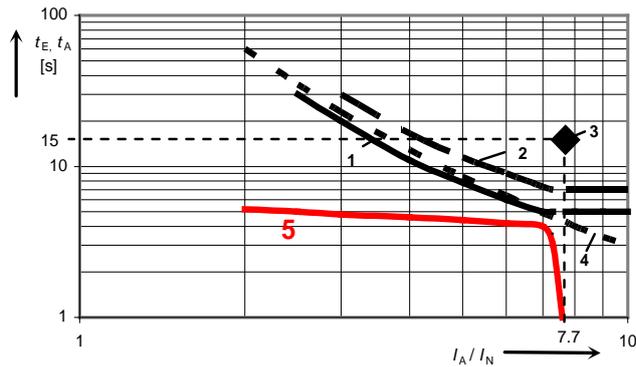


Fig. 2.4-16

Erwärmungszeit t_E (Mindestwert) von Motoren und Auslösezeit t_A eines Leistungsschalters mit Motorschutzcharakteristik in Abhängigkeit vom Anzugsstromverhältnis I_A/I_N

- 1 Mindestwerte für die Zeit t_E von Motoren gemäss IEC 60079-7 und EN 50019
- 2 Mindestwerte für die Zeit t_E von Motoren gemäss Empfehlung der Vereinigung Industrieller Kraftwirtschaft (V.I.K.)
- 3 Ein zu schützender Motor mit $t_E = 15$ s bei $I_A/I_N = 7.7$
- 4 Auslösekennlinie $t_A = f(I_A / I_N)$ eines typischen Leistungsschalters mit Motorschutz der Auslöseklasse 10
- 5 Anlaufstrom des Motors

Strommessende Überlastrelais zum Schutz von Ex e – Motoren müssen über einen Phasenausfallschutz verfügen.

Schutz durch Temperaturfühler

Anstelle einer Überwachung des Stroms kann auch eine direkte Erfassung der Wicklungstemperatur durchgeführt werden. Soll der Überlastschutz ausschliesslich durch den Einbau von Temperaturfühlern erreicht werden, so muss der Motor hierfür besonders geprüft und bescheinigt sein. Dabei ist nachzuweisen, dass die in die Statorwicklung eingebauten Temperaturfühler bei blockiertem Rotor auch sicher auslösen, bevor der Rotor die kritische Temperatur gemäss Zündklasse erreicht. Die direkte Temperaturüberwachung wird in der Regel mit PTC-Thermistoren verwirklicht. Siehe auch Abschnitte [4.1.2.3](#) und [4.2.4.3](#).

Schweranlauf und hohe Schalzhäufigkeit

Schweranlaufende Ex -Motoren stellen in explosionsgefährdeten Bereichen zusätzliche Aufgaben. Bei Anlaufzeiten, die zur Auslösung der auf die t_E -Zeit eingestellten Schutzeinrichtung führen würde, sind Vorkehrungen erforderlich, die unzulässig hohe Temperaturen unter allen Betriebsbedingungen sicher vermeiden. So sind z.B. Schweranläufe aus dem kalten Zustand zulässig, solange sie die 1.7-fache t_E -Zeit nicht überschreiten und speziell überwacht werden.

Da auch während des Anlaufs die Grenztemperatur der jeweiligen Temperaturklasse nicht überschritten werden darf, müssen besonders angepasste Motoren oder Schutzeinrichtungen ausgewählt werden.

Auch bei Motoren, die häufig geschaltet werden, besteht die Gefahr, dass die zulässigen Grenztemperaturen der Wicklung überschritten werden. Eine stromabhängig verzögerte Schutzeinrichtung des Motors allein ist nicht geeignet, den Motor zu schützen. Die zusätzliche Überwachung der Wicklungen durch Temperaturfühler kann hier eine Lösung darstellen. Dies ist wiederum nur bei ständerkritischen Maschinen möglich. In diesem Fall haben Motoren der Zündschutzart *Druckfeste Kapselung „d“* einen Vorteil, da hier eine kurzzeitige Überschreitung der Wicklungstemperatur über die Grenztemperatur der Temperaturklasse aus Sicht des Explosionsschutzes nicht relevant ist. Die thermische Grenze wird hier nur von der Isolierstoffklasse (Wärmeklasse) bestimmt.

2.4.7.5 ATEX 100a (Richtlinie 94/9/EG)

Für EEx- Anwendungen dürfen innerhalb der EU und dem EWR (EU plus Island, Liechtenstein und Norwegen) ausschliesslich Geräte und Schutzsysteme in Verkehr gebracht werden, die nach der EU Richtlinie 94/9/EG (ATEX 100a oder ATEX 95) zertifiziert sind. Die Regelung gilt auch für die Schweiz auf Basis der bilateralen Verträge mit der EU.

Motorschutzgeräte für den Überlastschutz von Motoren der Zündschutzart „e“ unterliegen diesen Vorschriften. Dies sind z.B. Leistungsschalter und Motorschutzrelais, die selbst ausserhalb von explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, jedoch für den sicheren Betrieb der von ihnen geschützten Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen im Hinblick auf Explosionsgefahren erforderlich sind. Es bestehen strenge Vorschriften bezüglich Prüfung und Zulassung der Geräte, deren Kennzeichnung und Massnahmen betreffend die Produktionsüberwachung und Qualitätssicherung beim Hersteller.

Die Prüfung und Zulassung von Geräten ist gemäss ATEX 100a von einer anerkannten Zertifizierungsstelle („Notified Body“; z.B. Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig PTB) erforderlich. Zusätzlich auditiert die „Notified Body“ die Produktionsüberwachungs- und Qualitätssicherungssysteme des Herstellers. Die Zulassung des Herstellers ist periodisch zu erneuern.

Die Gerätekennzeichnung nach ATEX

Die Schutzgeräte sind gemäss ATEX 100a wie folgt zu kennzeichnen:

- Name und Anschrift des Herstellers
- CE-Kennzeichen ergänzt mit der Nummer der notifizierten Prüfstelle (z.B. **CE 0102** für PTB)
- Typbezeichnung
- Seriennummer, falls zutreffend
- Baujahr (oder Codierung des Herstelldatums)
- Kennzeichen **Ex** ergänzt mit Angaben
 - der Gerätegruppe (z.B. // für übrige Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre, kein Bergbau)
 - der Gerätekategorie (z.B. 2 für Geräte, die in den Zonen 1 und 2 eingesetzt werden dürfen, ergänzt mit den Buchstaben *G* und/oder *D*; *G* für explosionsfähige Gasgemische oder *D* für Stäube); für Geräte die zum Schutz von Geräten im Ex-Bereich eingesetzt werden, aber selbst nicht im Ex-Bereich montiert werden, wird die 2 in Klammern gesetzt
→ z.B. **Ex II 2 G** oder **Ex II (2) G**, Kennzeichnung nach ATEX.
- Geräte, die direkt in explosiver Atmosphäre eingesetzt werden, erhalten noch eine zusätzliche Kennzeichnung, um Missverständnisse zu reduzieren:
→ z.B. **EEx e IIC T3**, Kennzeichnung nach CENELEC, „e“ für erhöhte Sicherheit, *IIC* für die Explosionsuntergruppe „Wasserstoff“, *T3* steht für eine maximale Oberflächentemperatur von 200 °C.
- Nummer des ATEX-Zertifikates (z. B. PTB 04 ATEX 3039; ein „U“ am Ende der ATEX - Nummer weist darauf hin, dass das Gerät nicht allein - d.h. z.B. nur zusammen mit einem Motor – als komplettes Betriebsmittel für den Ex-Bereich einsetzbar ist).
- Zutreffende Norm (z.B. EN 60079-14 für elektrische Betriebsmittel in Gasexplosionsgefährdeten Bereichen)
- Die zum Gerät gehörende Anwendungsanweisung (Auslösekennlinien etc.) müssen verfügbar sein (z.B. via Internet). Die Fundstelle ist am Gerät anzugeben.

2.4.7.6 IECEx und andere Zulassungsverfahren für explosionsgefährdete Bereiche

Die Informationen in diesem Abschnitt beziehen sich weitgehend auf die Vorschriften gemäss ATEX. ATEX ist ein europäisches Zulassungsverfahren, das in Ländern ausserhalb der EU

möglicherweise nicht anerkannt wird. Andere anerkannte Standards und Verfahren für explosionsgefährdete Bereiche sind z.B. IECEx (in einigen Ländern wie z.B. Australien vorgeschrieben) und NEC (USA).

Für konkrete Anwendungen sind jeweils die nationalen Vorschriften massgebend. Für IECEx siehe auch www.iecex.com.

3 Starten und Schalten von Motoren

3.1 Auswahlkriterien

Elektrische Motoren müssen mit einer Starteinrichtung vom Stillstand bis zur Betriebsdrehzahl beschleunigt werden. Im Fall von drehzahlvariablen Antrieben umfasst die Aufgabe des Motorsteuergerätes die Beeinflussung der Motordrehzahl auch im Betrieb. Die Wahl des Motors und der Anlassart sind abhängig vom Lastmoment, der gewünschten Anlaufcharakteristik (Anlaufstrom, Beschleunigung) und von der Stärke des Netzes. Siehe auch Abschnitt 1.7 bezüglich der charakteristischen Eigenschaften von Induktionsmotoren als den am häufigsten eingesetzten Motoren.

Hauptkriterien für die Auswahl der Anlassart

Bei der Entscheidungsfindung ob

- Direktstarter
- elektromechanische Starter für den Anlauf mit reduziertem Strom oder
- elektronische Motorsteuergeräte (Softstarter, Inverter)

eingesetzt werden sollen, sind nachstehende Punkte zu beachten, um aus Sicht von Anwendung und Produktivität eine geeignete Lösung zu wählen:

- Wie hoch ist das erforderliche Moment zum Starten der Last?
- Können Übertragungselemente wie Riemen, Getriebe oder Ketten durch das hohe Anlaufmoment bei direktem Starten beschädigt werden?
- Bedarf es aus Sicht der Anlage einer sanften und kontinuierlichen Beschleunigung oder sind Drehmomentstöße zulässig?
- Existieren Restriktionen bezüglich der Netzbelastung?
- Weisen technologisch komplexere Produkte zusätzliche Funktionen für eine Optimierung der Anwendung auf (z.B. Vorwarnfunktionen von Motorschutzrelais, Spiegelkontakte für Sicherheitssteuerungen, Kommunikationsanbindung etc.)?
- Sind neben dem Anlauf auch Aspekte eines kontrollierten Auslaufs oder einer Bremsung zu berücksichtigen?
- Sind neben dem Anlauf auch Aspekte der Drehzahlsteuerung nach dem Hochlauf (z.B. aus prozesstechnischen oder Energiespargründen) zu beachten?

Die Auswahl der geeigneten Anlassmethode stellt einen kritischen Faktor für das Erreichen optimaler Wirtschaftlichkeit bei jeder Motorsteuerungs-Anwendung dar. **Tab. 3.1-1** bietet eine Entscheidungshilfe hinsichtlich der verschiedenen Methoden zum Starten von Kurzschlussläufer-Motoren.

Motorart	Käfigläufer-Normmotoren								Spezielle Käfigläufermotoren	
Anlassart	Direktanlauf	Y-Δ-Anlauf (normal)	Y-Δ-Anl. ohne Unterbrechung	Autotransformator-Anlauf	Anlauf über Drosseln	Anlauf über Widerstände	Anlauf mit Sanftanlassern	Anlauf mit Inverter	Y-Δ-Anlauf mit erhöhtem Anzug	Mehrstufen-Anlauf
Netz	stark	schwach	schwach	schwach-mittel	mittel	mittel	schwach-mittel	schwach	mittel	mittel-stark
Netzbelastung bei Anlauf	voll	gering	gering	gering-mittel	gering-mittel	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel-voll
Rel. Anzugsstrom I_A/I_e ¹⁾	4 ... 8 (= I_{AD})	1.3 ... 2.7 (= $1/3 I_{AD}$)	1.3 ... 2.7 (= $1/3 I_{AD}$)	1 ... 5 (= 0.25...0.65 I_{AD}) wählbar	2 ... 4	2 ... 4	2 ... 6	1 ... 2	2 ... 4	2 ... 8
Rel. Drehmoment T_A/T_e ²⁾	1.5 ... 3 (= T_{AD})	0.5 ... 1 (= $1/3 T_{AD}$)	0.5 ... 1 (= $1/3 T_{AD}$)	0.4 ... 2 (= 0.25...0.65 T_{AD})	0.4 ... 0.8	0.4 ... 0.8	0.15 ... 2 $T_A = k^2 \cdot T_{AD}$ ³⁾	T_A einstellbar ⁴⁾	0.7 ... 1.5	0.7 ... 3
Hochlaufzeit (normal)	0.2 ... 5 s	2 ... 15 s	2 ... 15 s	2 ... 20 s	2 ... 20 s	2 ... 20 s	0.5 ... 10 s	0.5 ... 10 s	2 ... 10 s	0.2 ... 10 s
Hochlaufzeit (Schweranlauf)	5 ... 30 s	15 ... 60 s	15 ... 60 s	20 ... 60 s	für Schweranlauf nicht üblich		10 ... 60 s	5 ... 60 s	10 ... 40 s	5 ... 30 s
Spezifische Merkmale	Starke Beschleunigung bei hohem Anlaufstrom	Anlauf mit reduz. Moment u. Strom; Strom- u. Momentspitzen beim Umschalten	Wie Y-Δ normal, wesentlich reduzierte Strom- u. Momentenspitze beim Umschalten	Ähnlich Y-Δ, jedoch ohne Umschalt-Unterbrechung wählbare Stufen	Spannung am Motor nimmt mit Drehzahl zu und damit auch das relative Moment.	Spannung und Moment nehmen mit der Drehzahl weniger zu als bei Drosseln.	Einstellbare Anlaufcharakteristik. Auch gesteuerter Auslauf möglich.	Hohes verfügbares Moment bei kleinem Strom. Einstellbare Anlaufcharakteristik.	Wie Y-Δ normal, jedoch mit erhöhtem Anlaufstrom und -moment.	Anlaufstrom und Anlaufmomente je nach Motor und Schaltung.
Anwendungsbereich	Antriebe an starken Netzen, die das hohe Anlaufmoment zulassen.	Antriebe, die erst nach dem Hochlauf belastet werden.	Wie Y-Δ normal, aber für Abtriebe mit wenig Schwungmasse u. höherem Widerstandsmoment.	Vorwiegend englischer Sprachraum. Wie die Y-Δ-Anlaufarten.	Antriebe mit der Drehzahl zunehmendem Widerstandsmoment.	Kostengünstig für lastfreie Anläufe. Mit Widerstandsstufen aufwendiger, dafür flexibler.	Anläufe, die sanften oder einstellbaren Drehmomentverlauf (oder Stromreduktion) verlangen.	Meist für betriebsmässige Drehzahlverstellung. Energieeinsparung möglich.	Antriebe mit höherem Momentbedarf beim Anlauf.	Meist für betriebsmässige Drehzahlverstellung.

¹⁾ I_A = Motor-Anlaufstrom, I_e = Bemessungs-Betriebsstrom des Motors. ²⁾ T_A = Drehmoment beim Anlauf, T_e = Bemessungs-Betriebsmoment des Motors.
³⁾ k = Spannungsreduktionsfaktor, T_{AD} = Motor-Anlaufmoment bei Direkteinschaltung. ⁴⁾ Anlauf frequenzgesteuert, Moment in weiten Grenzen einstellbar.

Tab. 3.1-1
Charakteristische Merkmale der gebräuchlichen Anlassarten für Kurzschlussläufer-Motoren

3.2 Direktanlauf von Kurzschlussläufer-Motoren

Der Direktanlauf (Direct On Line, DOL) ist die einfachste und kostengünstigste Art, einen Motor zu starten. Er setzt voraus, dass das speisende Netz problemlos den hohen Anlaufstrom liefern kann und dass die Kraftübertragungselemente und die Arbeitsmaschine für die hohen Anlaufmomente geeignet sind.

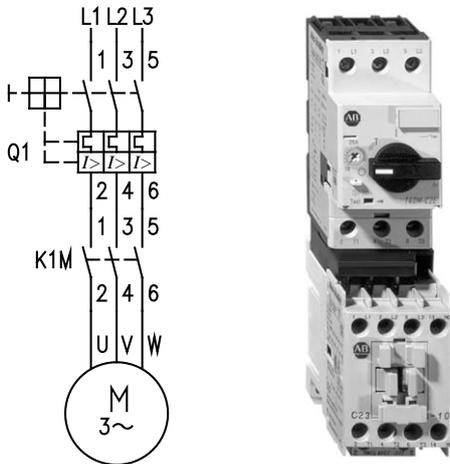


Fig. 3.2-1

Beispiel eines Zwei-Komponenten-Starters für Direktanlauf bestehend aus Motorschutz-Leistungsschalter und Schütz

Bei Direktanlauf liegen die Strombahnen von Schütz und Motorschutzgerät in den Polleitern (**Fig. 3.2-1**) und werden vom Betriebsstrom des Motors durchflossen. Das Motorschutzgerät muss daher auf den Bemessungsbetriebsstrom des Motors eingestellt werden.

Das Schütz wird nach dem Bemessungsbetriebsstrom I_e und der vorliegenden Gebrauchskategorie ausgewählt:

- AC-3 Kurzschlussläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufes
- AC-4 Kurzschlussläufermotoren: Anlassen, Gegenstrombremsen oder Reversieren, Tippen.

Definition der Gebrauchskategorien siehe Abschnitt [1.1](#).

Bei AC-3-Betrieb muss in der Praxis stets mit vereinzelt Tippschaltungen gerechnet werden, z.B. bei Inbetriebsetzung, Betriebsstörungen oder Servicearbeiten. Schütze von Rockwell Automation entsprechen diesen Anforderungen und dürfen ohne Risiko nach den AC-3-Werten dimensioniert werden; für die grosse Mehrzahl der Geräte sind die Bemessungsbetriebsströme für die Gebrauchskategorien AC-3 und AC-4 gleich.

Ein erheblicher Anteil AC-4-Schaltungen oder ausschliesslicher AC-4 - Betrieb ist in der Praxis relativ selten. In solchen Fällen ist oft zugleich eine hohe Schalthäufigkeit vorgegeben und es wird eine hohe elektrische Lebensdauer erwartet. Somit muss das Schütz nach diesen beiden Kriterien dimensioniert werden. Meist muss ein grösseres Schütz eingesetzt werden als dem maximal zulässigen AC-4-Bemessungsbetriebsstrom entspräche. Siehe auch Abschnitte [2.3.6.3](#) und [2.3.7](#).

3.2.1 Anlaufzeit

Die Anlaufzeit ist ein wichtiger Parameter für die Starter-Dimensionierung, da der Anlaufstrom ein Vielfaches der Bemessungsströme von Motor und Schaltgeräten betragen kann und diese entsprechend thermisch belastet. Sie hängt vom Drehmoment des Motors ab und damit von der gewählten Anlassmethode sowie vom Momentenverlauf der Last. Die Differenz zwischen Motormoment und Lastmoment ist das Beschleunigungsmoment. Neben dem Widerstandsmoment des Antriebs bestimmt die zu beschleunigende Schwungmasse wesentlich die Dauer eines Motoranlaufs.

So genannte Leeranläufe, d.h. Anläufe ohne Belastung des Antriebes, bewegen sich je nach Motorgrosse typisch im Zeitbereich von unter 0.1 bis etwa 1 s, Anläufe unter Last (aber ohne grosse Schwungmassen) bis etwa 5 s. Bei Zentrifugen, Kugelmöhlen, Kalandern, Transportanlagen und grossen Ventilatoren können die Anlaufzeiten in den Minutenbereich gehen. Bei Pumpen und Ventilatoren ist zu beachten, dass das Fördergut (Flüssigkeit, Luft) zur effektiven Schwungmasse beiträgt. Obenstehende Richtwerte gelten für Direktanlauf. Die Zeiten verlängern sich entsprechend bei Anlassmethoden mit reduziertem Anlaufstrom und -moment.

Bezüglich der zulässigen Anlaufzeit des jeweiligen Motors sind die Hersteller-Unterlagen massgebend. Für die Auswahl von Schützen für Schweranlauf siehe Abschnitt **2.3.5.2**.

3.2.2 Wendestarter

Beim Wendestarter wird der Motor über zwei Schütze angesteuert, eines für jede Drehrichtung. Wenn der Motor jeweils aus dem Stillstand gestartet wird, erfolgt die Schützauswahl nach Gebrauchskategorie AC-3. Vielfach erfolgt die Drehrichtungsumschaltung jedoch bei laufendem Motor, was eine entsprechend höhere Beanspruchung der Schütze bedeutet und damit eine Auswahl nach Gebrauchskategorie AC-4 bedingt. Die direkte Umschaltung bedingt eine Umschaltverzögerung zwischen den Schützen – z.B. mittels einer Kurzzeitverzögerung – von etwa 40 ms, um Phasenkurzschlüsse zu vermeiden. Zusätzlich zur elektrischen Verriegelung der Schütze von Wendestartern wird eine mechanische Verriegelung empfohlen.

Entsprechende Vorkehrungen wie bei Wendestartern sind bei Gegenstrombremsung erforderlich. Hier wird bei Erreichen des Motorstillstands das Bremsschütz (z.B. gesteuert von einem Drehwächter) ausgeschaltet und damit der Motor vom Netz getrennt.

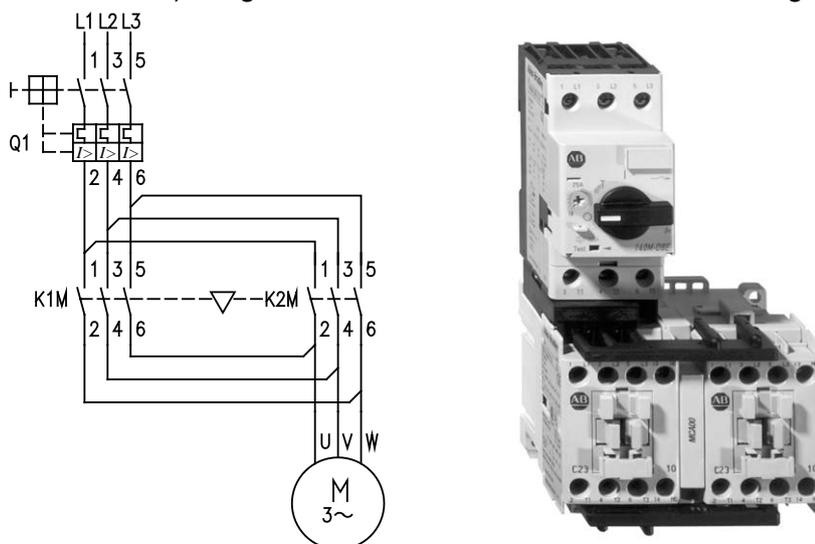


Fig. 3.2-2
Wendestarter mit Motorschutz-Leistungsschalter und mechanischer Verriegelung: Schema und Aufbau

3.3 Stern-Dreieck-Anlauf

Der Stern-Dreieck-Anlauf ist die einfachste Massnahme, um den Anlaufstrom eines Motors herabzusetzen. Das Verfahren kann bei allen Käfigläufermotoren angewandt werden, die im normalen Betrieb in Dreieck geschaltet sind und deren Wicklungsenden einzeln auf Klemmen geführt sind. Die Reduktion des Motorstroms bedingt eine Reduktion des Anlaufmoments. Der Stern-Dreieck-Anlauf eignet sich daher besonders für Antriebe, die erst nach dem Hochlauf belastet werden. Die Anlaufzeit verlängert sich im Vergleich zum Direktanlauf, was besonders bei Antrieben mit grösseren Schwungmassen merkbar wird.

Es ist zu unterscheiden zwischen

- Normalem Stern-Dreieck-Anlauf
- Stern-Dreieck-Anlauf mit unterbrechungsloser Umschaltung (closed transition)
- Verstärktem Stern-Dreieck-Anlauf.

3.3.1 Normaler Stern-Dreieck-Anlauf

Schaltung und Umschaltvorgang

Zu Beginn des Anlaufs werden die Motorwicklungen in Sternschaltung an die Netzspannung angelegt. Das Anlaufmoment und der Anlaufstrom betragen in dieser Schaltung noch ca. 30% der Werte bei Dreieckschaltung. Wegen des reduzierten Drehmoments in Sternschaltung erreicht der Motor nicht ganz die Nenndrehzahl. Nach dem Hochlauf in Sternschaltung werden die Wicklungen auf Dreieck umgeschaltet.

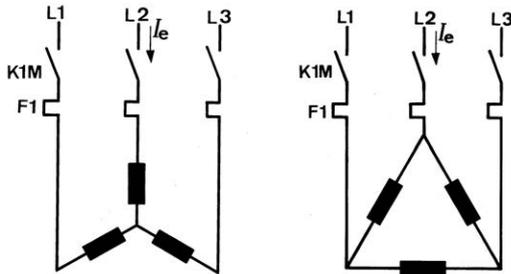


Fig. 3.3-1

Beim Anlauf in Stern-Schaltung liegt an den Motorwicklungen die Phasenspannung und es fließt ein Wicklungsstrom $I_{WY} = I_{W\Delta} / \sqrt{3}$. Wegen der vektoriellen Addition der Wicklungsströme in Dreieck-Schaltung ist $I_{eY} = I_{e\Delta} / 3$.

Bei der Umschaltung vom Stern- zum Dreieck-Betrieb ergibt sich ein Stromstoss, dessen Größe von verschiedenen Umständen abhängt. In den folgenden Figuren sind einige typische Fälle herausgegriffen.

Fig. 3.3-2 zeigt den Idealfall einer solchen Umschaltung. Der Motor erreicht in der ersten Stufe nahezu seine Nenndrehzahl, weil das Lastmoment während des Hochlaufs relativ gering ist. Der Umschaltstromstoss ist etwa gleich gross wie der Einschaltstrom.

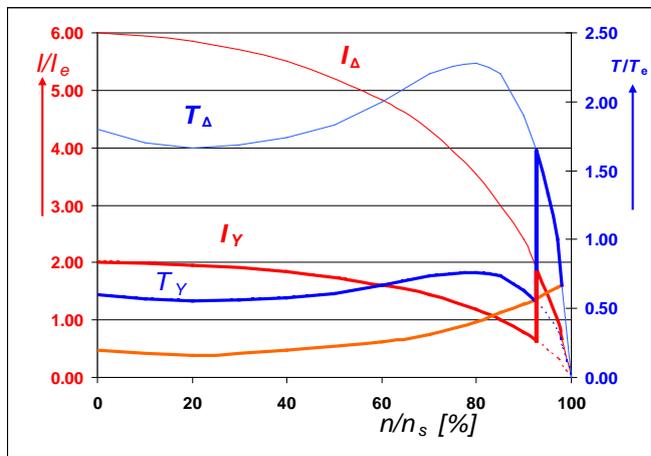


Fig. 3.3-2

Typischer Verlauf von Strom und Moment beim Stern-Dreieck-Anlauf

- I = Motorstrom
- I_e = Bemessungs-Betriebsstrom des Motors
- I_Y = Strom in Sternschaltung
- I_{Δ} = Strom in Dreieckschaltung
- I_A = Stromverlauf bei Stern-Dreieck-Anlauf
- T = Drehmoment
- T_e = Bemessungs-Betriebsmoment des Motors
- T_Y = Drehmoment in Sternschaltung
- T_{Δ} = Drehmoment in Dreieckschaltung
- T_L = Lastmoment
- n = Drehzahl
- n_s = Synchrone Drehzahl

Die Umschaltung selbst erfolgt meist automatisch (selten von Hand) durch ein auf die erforderliche Betriebszeit des Sternschützes eingestelltes Zeitrelais. Zwischen dem Ausschalten des Stern-Schützes und dem Einschalten des Dreieck-Schützes muss eine genügend lange Pause liegen, damit der Ausschaltlichtbogen im Sternschütz sicher gelöscht ist, bevor das Dreieckschütz einschaltet. Bei zu rascher Umschaltung entsteht über den Ausschaltlichtbogen ein Kurzschluss und der Kurzschlussschutz trennt den Stromkreis (siehe Fig. 3.3-3).

Bei zu langer Umschaltpause dagegen fällt je nach Schwungmoment und Belastung die Motordrehzahl während der stromlosen Pause wieder so stark ab, dass der Einschaltstromstoss beim Umschalten in Dreieck sehr hoch wird und den Stern-Dreieck-Anlauf zwecklos macht (Fig. 3.3-4).

Eine genügend lange Umschaltpause zwischen dem Ausschalten des Sternschützes und dem Einschalten des Dreieckschützes wird bei kleineren Schützen mit kurzen Anzugs- und Abfallzeiten durch elektronische Zeitrelais mit einer Umschaltverzögerung von ca. 50 ms erreicht. Grössere Schütze haben bereits eine natürliche Umschaltverzögerung von > 25 ms. Hier dürfen deshalb auch Zeitrelais ohne zusätzliche Umschaltverzögerung verwendet werden. Die Umschaltpause ist dann optimal kurz. Zur Vermeidung von Phasenkurzschlüssen werden das Stern- und Dreieck-Schütz zusätzlich mechanisch verriegelt.

Wird das Dreieckschütz über ein Hilfsschütz geschaltet (z. B. bei niedriger Steuerspannung), ist am Zeitrelais keine Zusatzverzögerung erforderlich. Die genügend lange Umschaltpause ergibt sich aus der Summe der Einschaltverzögerungszeiten des Hilfs- und Dreieckschützes.

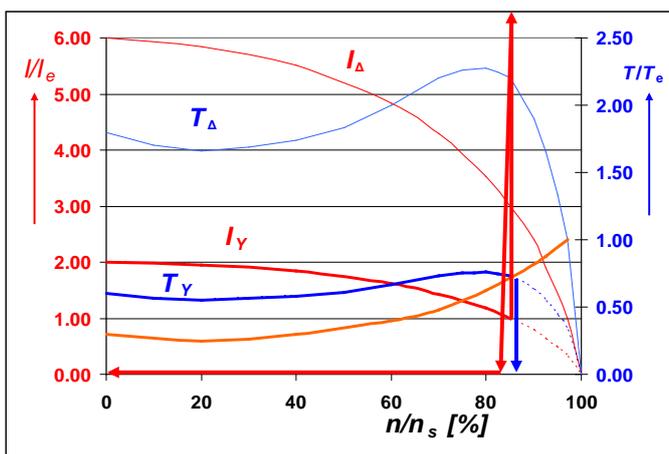


Fig. 3.3-3

Eine zu kurze Umschaltpause führt zu einem Kurzschluss über den Schaltlichtbogen - der Kurzschlussschutz spricht an und schaltet ab

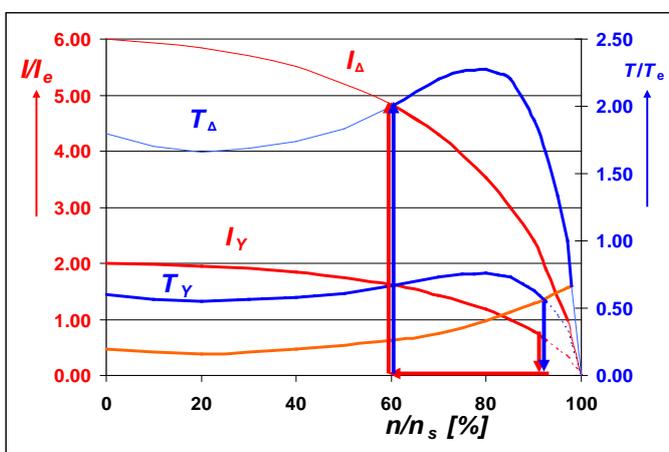


Fig. 3.3-4

Bei zu langer Umschaltpause sinkt die Drehzahl wieder ab → Direktanlauf in Dreieckschaltung

Die Fehler gemäss **Fig. 3.3-3** und **Fig. 3.3-4** lassen sich auch mit der unterbrechungslosen Stern-Dreieck-Schaltung (Abschnitt **3.3.4**) vermeiden.

Bei zu hohem Lastmoment beschleunigt der Motor in Sternschaltung nur zu einer Teildrehzahl und bleibt bei dieser „hängen“. Der Umschaltvorgang würde nach **Fig. 3.3-5** verlaufen und der Zweck des Stern-Dreieck-Anlaufs wäre nicht erreicht.

Ferner hat dieser Umstand zur Folge, dass die Schütze das Mehrfache des Motornennstroms ausschalten müssen. Im Beispiel nach **Fig. 3.3-5** beträgt der Ausschaltstrom etwa $1.3 \cdot I_{eMotor}$. Das Sternschütz wird nach $I_{e(Y-Schütz)} = 0.34 \cdot I_{eMotor}$ dimensioniert (siehe unten) und muss demnach

$$1.3 / 0.34 \approx 4 \cdot I_{e(Y-Schütz)}$$

abschalten. Praktisch bedeutet das AC-4-Betrieb mit entsprechend reduzierter elektrischer Lebensdauer. In diesem Fall ist ein Motor für verstärkten Stern-Dreieck-Anlauf (Abschnitt **3.3.5**) einzusetzen.

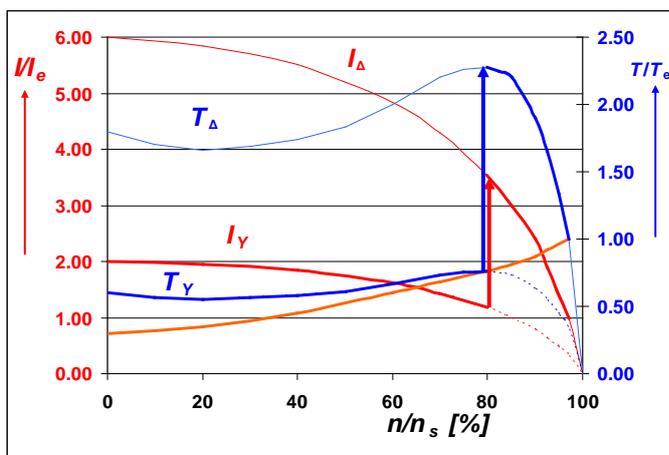


Fig. 3.3-5
Umschaltung bei zu geringer Drehzahl

Dimensionierung der Starterkomponenten

Bei Stern-Dreieck-Schaltungen gemäss **Fig. 3.3-6** liegen im Dreieckbetrieb die Strombahnen von Hauptschütz, Dreieckschütz und Motorschutzrelais in Serie zu den Motorwicklungen (**Fig. 3.3-7**). Die Geräte werden daher mit dem Phasenstrom I_p belastet:

$$I_p = I_e / \sqrt{3} = 0.58 \cdot I_e$$

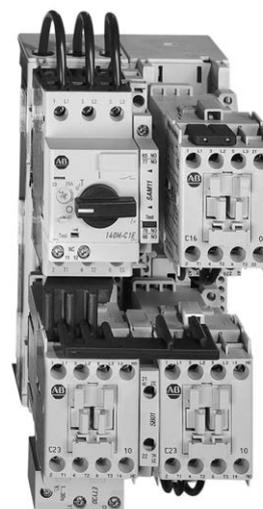
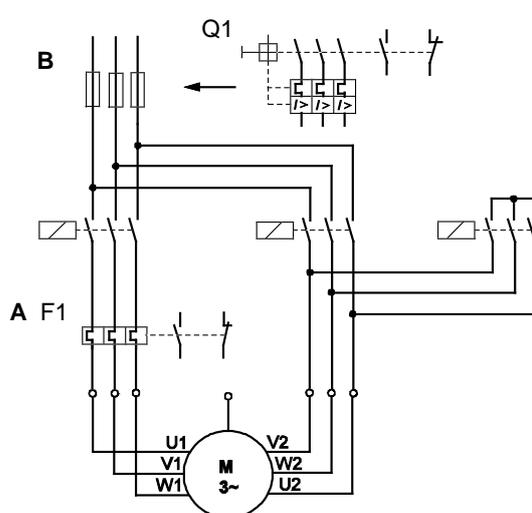


Fig. 3.3-6
Starter für normalen Stern - Dreieck-Anlauf

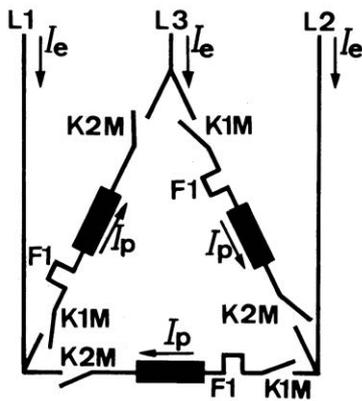


Fig. 3.3-7
 Schützkontakte und Motorschutzrelais sind im Dreieckbetrieb in Serie zu den Motorwicklungen geschaltet
 K1M Hauptschütz
 K2M Dreieckschütz
 F1 Thermorelais
 I_e Bemessungsbetriebsstrom des Motors
 I_p Phasenstrom

Für normalen Stern-Dreieck-Anlauf sind die Schaltgeräte für folgende Bemessungsströme zu dimensionieren:

Hauptschütz	K1M = $0.58 \cdot I_e$	
Dreieckschütz	K2M = $0.58 \cdot I_e$	
Sternschütz	K3M = $0.34 \cdot I_e$	
Thermorelais	F1 = $0.58 \cdot I_e$	→ Motorschutz in Y- und Δ -Betrieb, mit F1 in Pos. A (Fig. 3.3-6), $t_A \leq 15$ s (Normalanlauf)
Leistungsschalter	Q1 = $1.00 \cdot I_e$	→ Motorschutz in Y-Betrieb nur bedingt, mit Q1 in Pos. B (Fig. 3.3-6), $t_A > 15 \dots 40$ s möglich

Die Auswahl der Schütze nach diesen Werten gilt für Anlaufzeiten von maximal 15 Sekunden und 12 Anläufe pro Stunde. Bei Schweranlauf oder höherer Schalthäufigkeit ist das Schütz K3M, evtl. auch K1 M, grösser zu wählen (siehe Abschnitte 2.3.5.2 und 2.3.6).

Ebenso ist die elektrische Lebensdauer der Schütze, insbesondere des Stern-Schützes, zu überprüfen (siehe Abschnitt 2.3.6.3). Erfolgt z. B. die Umschaltung bei zu geringer Drehzahl, muss das Stern-Schütz ein Vielfaches seines Nennstroms abschalten (Fig. 3.3-5). Damit würde seine elektrische Lebensdauer stark reduziert.

3.3.2 Motoranschluss bei Rechts- und Linkslauf

Beim Einschalten des Dreieckschützes können bei ungünstiger vektorieller Lage von speisendem Netz und Läuferfeld Ausgleichsvorgänge im Motor auftreten, die zu grösseren Stromspitzen führen als beim Zuschalten des stehenden Motors in Dreieckschaltung. Dabei kann das Einschaltvermögen der Schütze überschritten werden und es kann zu Verschweissungen der Schaltstücke kommen.

Eine Reduktion der Ausgleichsströme ist durch die richtige Verdrahtung des Hauptstromkreises (Fig. 3.3-8) zu erreichen. Dies führt nicht nur zu geringerer Belastung der Schütze, sondern auch zu einer Verringerung der dynamischen Beanspruchung der Wickelköpfe im Motor.

Geringer Umschaltstromstoss bei richtiger Verdrahtung (Rechtslauf)

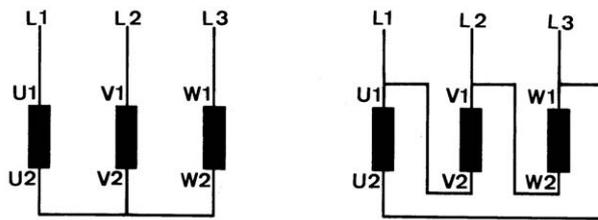


Fig. 3.3-8
Richtige Verbindung der Motorphasen für Rechtslauf

Während der stromlosen Umschaltpause fällt der Rotor gegenüber das Drehfeld des Netzes zurück. Sein magnetisches Feld induziert im Stator eine abklingende Restspannung - im Spannungszeiger-Diagramm Fig. 3.3-9 für den Polleiter L1 eingetragen als $U_{L1'-N}$.

Beim Einschalten auf Dreieck (Fig. 3.3-8 und Fig. 3.3-9) wird die Statorwicklung, die diese Restspannung führt, an die Netzspannung U_{L1-L3} gelegt. Die Differenzspannung ΔU ist dank der günstigen Vektorlage der Restspannung $U_{L1'-N}$ und der Netzspannung U_{L1-L3} , die annähernd gleichgerichtet sind, relativ klein. Somit wird der von dieser resultierenden Spannung herrührende Stromstoss ebenfalls klein bleiben.

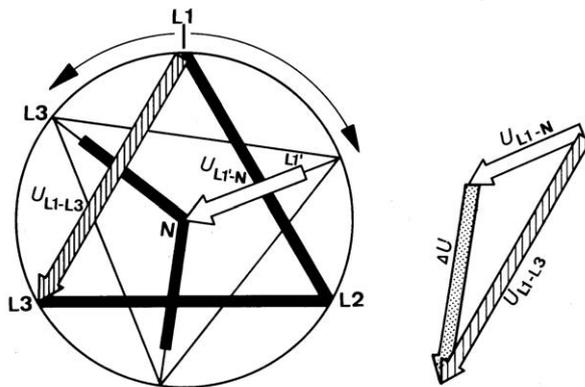


Fig. 3.3-9
Zeigerdiagramm für Stern-Dreieck-Umschaltung bei Rechtslauf mit richtigen Verbindungen der Motorphasen

Hoher Umschaltstromstoss bei falscher Verdrahtung

Der Motor hat ebenfalls Rechtslauf, wenn die Motorklemmen nach Fig. 3.3-10 verbunden werden.

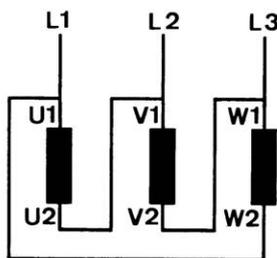


Fig. 3.3-10
Falsche Verbindung der Motorphasen ergibt ebenfalls Rechtslauf

Im Stator wirkt während der Umschaltpause wieder die abklingende Restspannung mit zurückbleibender Phasenlage. Die Phasenwicklung mit dem Zeiger $U_{L1'-N}$ wird jetzt beim Einschalten auf Dreieck an die Netzphase U_{L1-L2} gelegt. Diese beiden Spannungen haben jedoch ganz verschiedene vektorielle Richtungen, die Differenzspannung ΔU ist hoch und bewirkt einen entsprechend hohen Umschaltstromstoss.

Beim Umschalten von Stern auf Dreieck ergibt sich Zeigerdiagramm **Fig. 3.3-11**

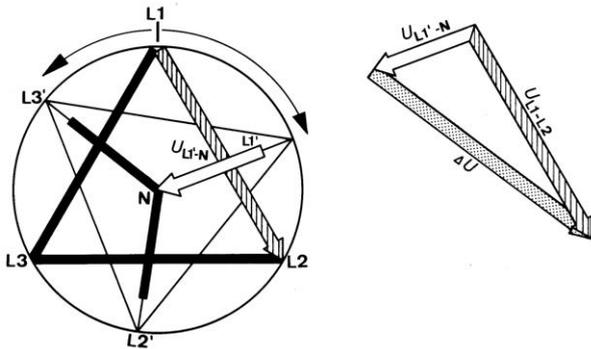


Fig. 3.3-11
Zeigerdiagramm für Verbindungen der Motorphasen nach Fig. 3.3-10. Es ergibt sich ein hoher Umschaltstromstoss wegen der ungünstigen Vektorlage.

Linkslauf

Bei Linkslauf des Motors genügt es nicht, an beliebiger Stelle zwei Phasen zu vertauschen. Damit ergäben sich die gleichen Verhältnisse wie oben beschrieben. Um den Umschaltstromstoss von Stern- auf Dreieckschaltung möglichst klein halten zu können, muss die Verdrahtung nach **Fig. 3.3-12** ausgeführt werden.

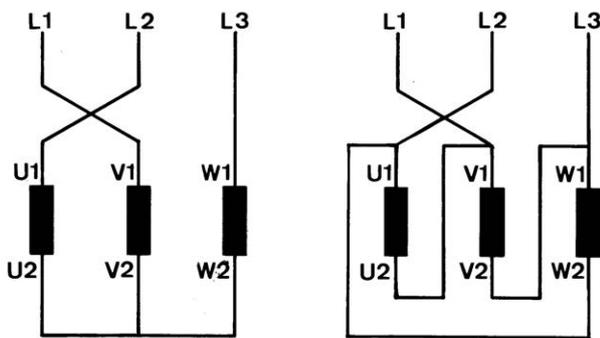


Fig. 3.3-12
Richtige Verbindung der Motorphasen für Linkslauf des Motors

3.3.3 Einfluss der dritten Oberschwingung auf Motorschutzrelais

Bei Motoren, die im Eisen knapp bemessen sind (z. B. Kältemaschinen-Motoren, Unterwasserpumpen-Motoren u.a.), werden bei Dreieckschaltung in den Wicklungen infolge von Eisensättigung die dritte Oberschwingung und ihre Harmonischen angeregt. Wegen der dreifachen Frequenz haben die Ströme der dritten Oberschwingung in allen drei Wicklungen die gleiche Phasenlage. Dieser Oberschwingungsstrom fließt quasi im Kreis durch die Wicklungen und ist in den Zuleitungen nicht erkennbar. Bei Sternschaltung kann sich keine dritte Oberschwingung ausbilden, weil der Motorsternpunkt nicht mit dem Netz verbunden ist.

Erfahrungsgemäss kann der Oberschwingungsstrom Werte bis 30 % und mehr vom Grundstrom erreichen. Mit Effektivwert-richtig anzeigenden Messinstrumenten ist der Effektivwert des gesamten Wicklungsstroms messbar; dagegen wird der Oberschwingungsanteil von nur den Mittelwert anzeigenden Instrumenten nicht korrekt erfasst.

Die dritte Oberschwingung trägt zur Erwärmung der Motorwicklungen bei. Dies wird vom Motorhersteller berücksichtigt, so dass der Motor deswegen bei Nennlast nicht gefährdet ist. Daher sind Motorschutzgeräte bei Direktanlauf in Dreieckbetrieb immer auf den Motor-Bemessungsbetriebsstrom (= Zuleitungsstrom) einzustellen.

In Dreieckbetrieb bei Stern-Dreieck-Schaltung liegt das Motorschutzgerät jedoch in Serie zu den Motorwicklungen (**Fig. 3.3-7**). Ist es normal auf $0,58 \cdot I_e$ eingestellt, kann es wegen der zusätzlichen Oberschwingungen vorzeitig auslösen. In diesen Fällen ist der tatsächliche Effektivwert des Wicklungsstroms zu messen und das Schutzgerät um den festgestellten Prozentsatz des

Oberschwingungsstroms höher einzustellen. Dies gilt für Motorschutzgeräte wie Bimetallrelais, deren Auslösekennlinie auf dem Effektivwert des Stromes basieren.

Elektronische Motorschutzgeräte haben vielfach davon abweichende Messprinzipien (z.B. basierend auf dem Scheitelwert des Stromes). Dort muss die Einstellungs-Korrektur durch Probieren erfolgen.

3.3.4 Unterbrechungsloser Stern-Dreieck-Anlauf (closed transition)

Mit dieser Schaltung (Fig. 3.3-14 und Fig. 3.3-15) wird das Abfallen der Motordrehzahl während der Stern-Dreieck-Umschaltung vermieden und damit die nachfolgende Stromspitze klein gehalten.

Vor dem Öffnen des Sternschützes schliesst ein viertes (Transitions-) Schütz K4M den Motorstromkreis über Widerstände in Dreieck. Damit wird der Motorstrom während der Umschaltung (Fig. 3.3-13) nicht unterbrochen und die Motordrehzahl sinkt kaum ab. Das Dreieckschütz K2M stellt abschliessend den endgültigen Schaltzustand her und wirft das Transitionsschütz K4M ab. Wie die normale Stern-Dreieck-Schaltung ist auch diese Schaltung nur für den Anlauf mit kleinem Lastmoment geeignet.

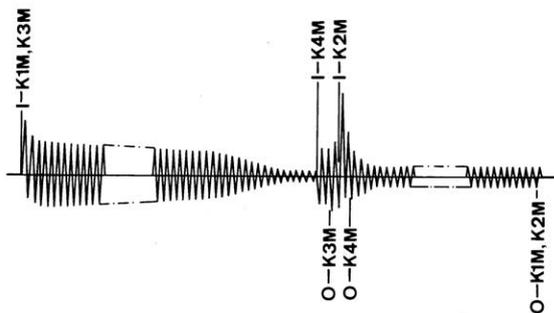


Fig. 3.3-13
Oszillogramm eines Stern-Dreieck-Anlaufs mit unterbrechungsloser Umschaltung

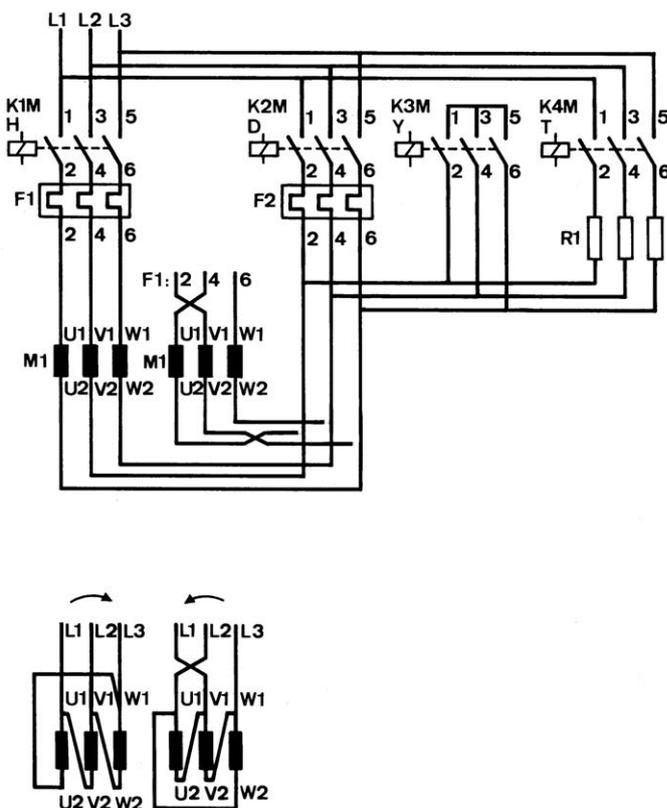


Fig. 3.3-14
Stern-Dreieck-Starter für unterbrechungslose Umschaltung

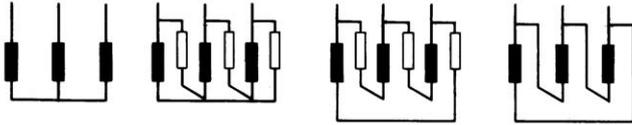


Fig. 3.3-15

Die vier Schaltstufen der unterbrechungslosen Stern - Dreieck – Schaltung

A Anlauf in Stern – Schaltung

B Umschaltung: Stern- und Transitionsschütz sind geschlossen

C Umschaltung: Dreieck-Schaltung über Transitionsschütz und –widerstände

D Betrieb in normaler Dreieck-Schaltung

Dimensionierung des Starters

Hauptschütz	K1M	$0.58 \cdot I_e$
Dreieckschütz	K2M	$0.58 \cdot I_e$
Sternschütz	K3M	$0.58 \cdot I_e$
Transitionsschütz	K4M	$0.27 \cdot I_e$ (typischer Wert, variiert mit R1)
Thermorelais	F1	$0.58 \cdot I_e$
Transitions-Widerstand	R1	$(0.35...0.4) \cdot U_e / I_e$

Der Faktor soll im angegebenen Bereich so gewählt werden, dass ein Standard-Widerstandswert resultiert.

Anders als in der normalen Stern-Dreieck-Schaltung muss das Stern-Schütz im Starter für unterbrechungslose Umschaltung gleich dimensioniert werden wie das Haupt- und Dreieck-Schütz. Das hat zwei Gründe:

- Das Stern-Schütz K3M muss den Stern-Strom des Motors und der Transitions-widerstände abschalten. In den Transitions-widerständen fließt ein Strom von ca. $1.5 \cdot I_e$. Daher ist eine entsprechend höhere Schaltleistung erforderlich.
- Die unterbrechungslose Stern-Dreieck-Schaltung wird oft in Anlagen mit grösserer Schalthäufigkeit eingesetzt, in denen auch eine grössere elektrische Lebensdauer verlangt ist.

Die Widerstände werden nur während maximal 0,1 Sekunden belastet (Kurzzeitbetrieb).

Meistens ist aber nur die Dauerbelastbarkeit der Widerstände bekannt. Für Draht-Keramikrohrwiderstände lässt sich die zur Auswahl erforderliche Dauerbelastbarkeit P_R mittels folgender Näherungsformeln errechnen:

$$P_R \approx U_e^2 / (1200 \cdot R) \text{ [W]} \quad \text{für max. 12 Schaltungen / h}$$

$$P_R \approx U_e^2 / (500 \cdot R) \text{ [W]} \quad \text{für max. 30 Schaltungen / h}$$

Hinweise

Bei Stern-Dreieck-Schaltung mit unterbrechungsloser Umschaltung kann kein unzulässiger Umschalt-Stromstoss entstehen. Bei grossen Schwungmassen sollte ebenfalls auf das richtige Anschliessen bei Rechts- oder Linkslauf geachtet werden (siehe Abschnitt 3.3.2), um Schäden durch Drehmomentstösse zu vermeiden.

3.3.5 Verstärkter Stern-Dreieck-Anlauf

Bei grossem Lastmoment wird wegen der Reduktion des Anlaufmomentes des Motors in normaler Stern-Schaltung keine ausreichende Drehzahl erreicht (siehe Fig. 3.3-5). Ein grösseres Motormoment wird mit dem verstärkten Stern-Dreieck-Anlauf erreicht. Allerdings steigt mit dem Motormoment auch der Anlaufstrom (vergleiche Tab. 3.1-1).

Es sind zwei Anlauf-Arten möglich:

- Gemischter Stern-Dreieck-Anlauf
- Teilwicklungs-Stern-Dreieck-Anlauf

Für beide Arten sind Motoren mit entsprechenden Wicklungsanzapfungen nötig.

Gemischter Stern-Dreieck-Anlauf

Hier sind die Motorwicklungen meist in zwei gleiche Hälften aufgeteilt. Beim Anlauf wird eine Hälfte der Teilwicklungen in Dreieck, die andere vor diese in Stern geschaltet (Fig. 3.3-16). Der Stern-Einschaltstrom ist ca. $(2 \dots 4) \cdot I_e$. Daraus resultiert ein entsprechend grösseres Anlauf-Drehmoment.

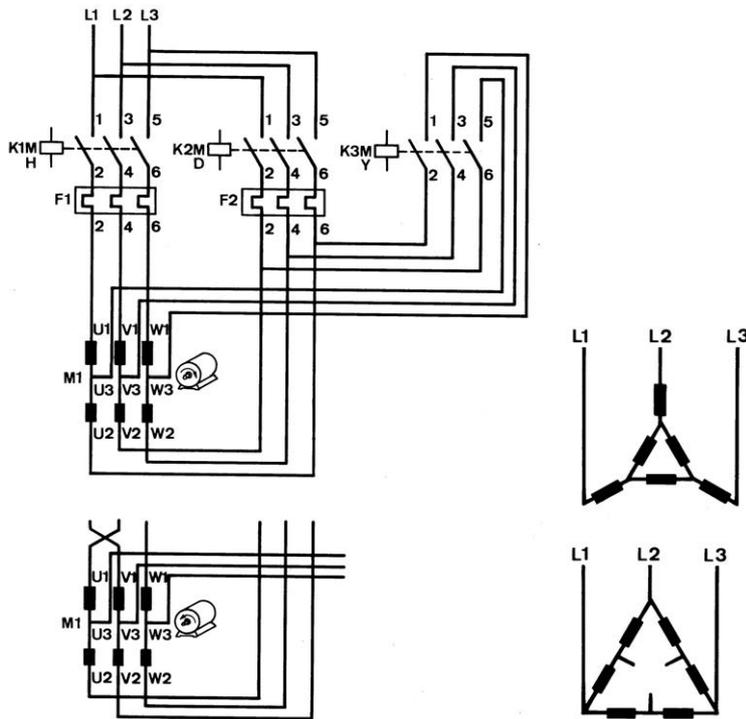


Fig. 3.3-16

Gemischter Stern-Dreieck-Anlauf

Schaltplan und Schaltung der Motorwicklungen während des Anlaufs (Y) und im Betrieb (Δ)

3.3.6 Teilwicklungs-Stern-Dreieck-Anlauf

Auch hier sind die Motorwicklungen unterteilt. In Sternschaltung wird nur die Hauptwicklung (Fig. 3.3-17) - ein Teil der gesamten Wicklung - benutzt. Der Stern-Einschaltstrom ist je nach Anzapfung $(2 \dots 4) \cdot I_e$, woraus ein grösseres Anzugsmoment resultiert.

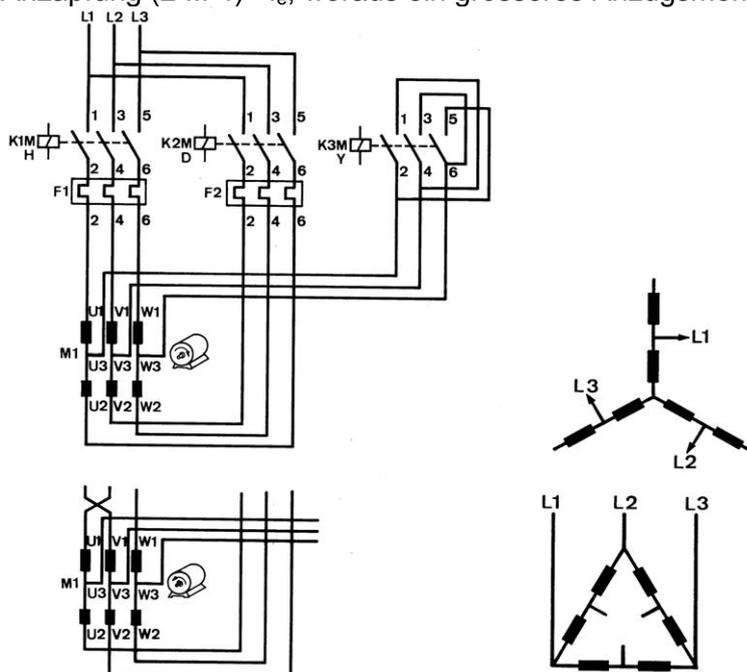


Fig. 3.3-17

Teilwicklungs-Stern-Dreieck-Anlauf

Schaltplan und Schaltung der Motorwicklungen während des Anlaufs (Y) und im Betrieb (Δ)

Dimensionierung des Starters

Mit Ausnahme des Sternschützes werden Schütze und Motorschutzgeräte gleich dimensioniert wie bei der „normalen“ Stern-Dreieck-Schaltung (siehe Abschnitt 3.3.1). Das Sternschütz ist wegen des grösseren Anzugsstroms für $(0.5 \dots 0.58) \cdot I_e$ zu dimensionieren.

Hinweise

Die genügend lange Umschaltpause beim Übergang von Stern- zum Dreieck-Betrieb gemäss Abschnitt 3.3.1 ist in beiden Fällen einzuhalten. Unterbrechungslose Stern-Dreieck-Schaltung gemäss Abschnitt 3.3.4 ist in beiden Fällen möglich. Bei sehr grossem Gegenmoment kann sie sogar nötig sein. Die Transitions widerstände und das Transitionsschütz sind wie dort beschrieben zu bemessen.

Für den Anschluss gelten die Regeln gemäss Abschnitt 3.3.2.

3.4 Auto – Transformator – Anlauf

3.4.1 Schaltung und Funktion

Ein Auto-Transformator-Starter ermöglicht den Anlauf von Käfigläufermotoren mit reduziertem Anlaufstrom, indem die Spannung am Motor während des Anlaufs reduziert wird. Im Gegensatz zur Stern-Dreieckschaltung werden nur drei Motor-Leitungen und -Anschlüsse benötigt. Beim Anlauf liegt der Motor an den Anzapfungen des Autotransformators; Transformatorschütz K2M und Sternschütz K1 M sind geschlossen. Der Motor läuft mit um die Transformatorübersetzung reduzierter Spannung und entsprechend kleinerem Strom an.

Dadurch würde der Netzstrom im Vergleich zum Direktanlauf im Quadrat der Transformatorübersetzung reduziert; er ist aber meist merklich höher, da er auch die relativ hohen Transformatorverluste deckt. Der Einschaltstrom liegt je nach Anzapfung und Anlaufstromverhältnis des Motors bei $(1 \dots 5) \cdot I_e$. Das Motormoment sinkt hingegen quadratisch mit der Spannung an den Wicklungen. Die Autotransformatoren haben meist in jeder Phase drei wählbare Anzapfungen (z.B. 80%, 65%, 50%), um die Motoranlauf-Charakteristik den Lastverhältnissen anpassen zu können.

Wenn der Motor 80 ... 95 % (je nach angestrebter Reduktion des Stromstosses nach dem Umschalten) seiner Nenndrehzahl erreicht hat, wird am Transformator das Sternschütz K1M geöffnet. Jetzt wirken die Transformator-Teilwicklungen als Drosseln. Der Motor liegt an der nur durch die Drosseln reduzierten Netzspannung und seine Drehzahl fällt nicht ab. Über Hilfschaltglieder des Sternschützes zieht das Hauptschütz K3M an und legt den Motor an die volle Netzspannung. Das Hauptschütz K3M wirft seinerseits das Transformatorschütz K2M ab. Der ganze Vorgang verläuft also unterbrechungslos.

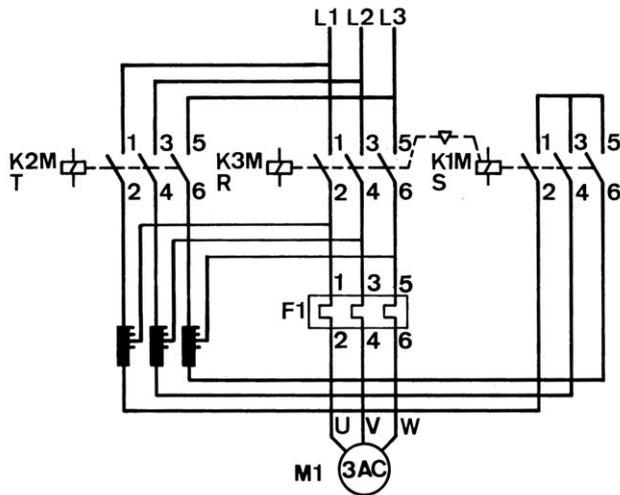


Fig. 3.4-1
Auto-Transformator-Starter mit unterbrechungsloser Umschaltung (Korndörfer- Schaltung)

3.4.2 Dimensionierung des Starters

Das Hauptschütz K3M und das Motorschutzgerät F1 werden nach dem Motor-Bemessungsbetriebsstrom I_e ausgewählt. Transformatorschütz und Sternschütz sind nur kurzzeitig während des Anlaufes eingeschaltet. Ihre Dimensionierung richtet sich nach der erforderlichen Schaltleistung, da sie ein zufälliges Ausschalten während des Anlaufs sicher beherrschen müssen. Das Sternschütz schaltet zusätzlich bei jedem Anlauf während der Umschaltung. Die Werte der Bemessungs-Betriebsströme für das Transformatorschütz K2M liegen je nach Anlaufzeit und Anlaufstrom zwischen $(0.3 \dots 1) \cdot I_e$, für das Sternschütz zwischen $(0.45 \dots 0.55) \cdot I_e$.

3.5 Anlauf über Drosseln oder Widerstände

Die vorgeschalteten Drosseln (Fig. 3.5-1) bzw. Widerstände (Fig. 3.5-2) reduzieren die Spannung am Motor und damit auch den Anlaufstrom. Das Anzugsmoment reduziert sich etwa mit dem Quadrat des Stromes.

3.5.1 Anlauf über Drosseln

Im Stillstand ist die Motorimpedanz klein. Ein Grossteil der Netzspannung fällt an den vorgeschalteten Drosseln ab. Das Anzugsmoment des Motors ist deshalb stark reduziert. Mit steigender Drehzahl steigt die Spannung am Motor wegen des Rückganges der Stromaufnahme und der vektoriellen Spannungsaufteilung zwischen dem Motor und dem vorgeschalteten Blindwiderstand. Damit steigt auch das Motormoment. Nach dem Hochlauf des Motors werden die Drosseln vom zeitverzögerten Hauptschütz K1M kurzgeschlossen und das Anlaufschütz K2M abgeworfen.

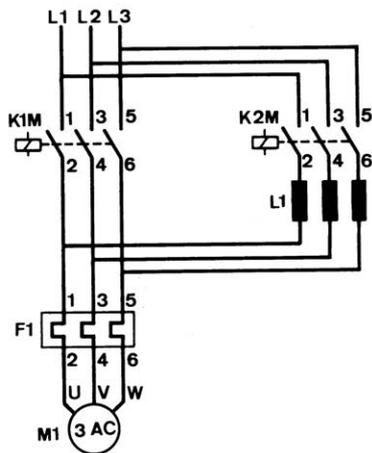


Fig. 3.5-1
Motoranlauf über vorgeschaltete Drosseln

3.5.2 Anlauf über Widerstände

Der Grundschaltplan ist gleich wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben, einzig die Drosseln sind durch kostengünstigere Widerstände ersetzt.

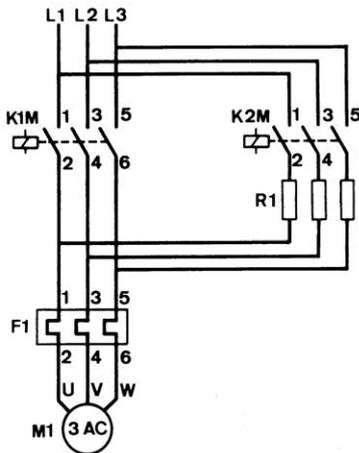


Fig. 3.5-2
Motoranlauf über vorgeschaltete Widerstände

Mit dieser Methode kann der Anlaufstrom nur wenig reduziert werden, weil das Motormoment quadratisch mit der Spannung sinkt und die Spannung am Motor, anders als beim Anlauf über Drosseln, mit zunehmender Drehzahl nur wenig steigt. Vorteilhafter ist es, den Vorwiderstand während des Anlaufes stufenweise zu reduzieren. Dadurch sinkt die Spannung am Widerstand und steigt am Motor an. Der Aufwand an Geräten ist allerdings bedeutend grösser.

Einfacher sind gekapselte Nass(Elektrolyt)widerstände mit einem negativen Temperaturkoeffizienten. Deren ohmscher Widerstand nimmt während des Anlaufs wegen der Erwärmung durch den Anlaufstrom selbsttätig ab.

3.6 Kurzschluss – Sanftanlauf

3.6.1 Schaltung und Funktion

Diese Methode wird bei verhältnismässig kleinen Induktionsmotoren mit Kurzschlussläufern angewandt, um einen sanften Anlauf zu bewirken. Das Anlaufdrehmoment wird dadurch verringert, dass in die Zuleitung einer Phase ein ohmscher Widerstand (Fig. 3.6-1) eingeschaltet wird. Damit wird der Motor unsymmetrisch gespeist und es ergibt sich ein sanfter, stossfreier Motoranlauf. Der Motorstrom wird in den beiden Phasen ohne Vorwiderstand nicht reduziert.

Diese Anlaufmethode ist als Kusa-Schaltung (Kurzschluss-Sanftanlauf) bekannt. Moderne Lösungen verwenden gesteuerte Leistungshalbleiter anstelle eines Widerstandes.

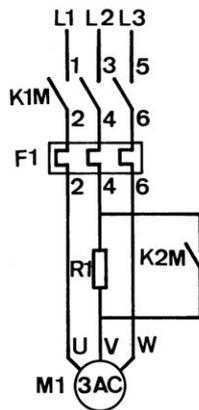


Fig. 3.6-1
Kusa-Schaltung für einen sanften Motoranlauf

Hinweis

Es muss ein Motorschutzgerät ohne Differentialauslösung eingesetzt werden, da es sonst beim Anlauf ansprechen würde.

3.7 Polumschaltbare Motoren

3.7.1 Drehzahländerung durch Polumschaltung

Die Anzahl der Pole bestimmt bei Asynchronmotoren bei gegebener Speisefrequenz die Nenndrehzahl. Wird die Ständerwicklung für zwei oder mehrere verschiedene Polzahlen ausgelegt, kann die Drehzahl durch Umschalten in ebenso vielen Stufen geändert werden.

Besonders wirtschaftlich ist die Dahlanderschaltung, die mit nur einer Wicklung und sechs Klemmen zwei Pol- und damit Drehzahlen im Verhältnis 1:2 ermöglicht. Dabei stehen die Nennleistungen und Drehmomente der beiden Stufen je nach Schaltungsvariante in einem bestimmten Verhältnis zu einander. Die Dahlanderwicklung ist aufgeteilt in einzelne Spulengruppen in der Schrittweite der kleineren Polteilung. Bei gleichsinniger Durchflutung jeder Spulengruppe ergibt sich die höhere, durch Stromrichtungssumkehr in jeder zweiten Spulengruppe die niedrigere Polzahl. Durch Wiederholung der gleichen Spulenanordnung von Pol zu Pol wird eine sehr gute Wicklungssymmetrie erreicht.

Die Dahlanderschaltung ist im Übrigen ein Sonderfall der PAM-Schaltung (Polamplitudenmodulation). Bei PAM-Motoren wird eine Asymmetrie der Feldoberwellen in Kauf genommen und die Wicklungen werden so gruppiert dass die resultierenden Polzahlen in anderen Verhältnissen als 1:2 stehen (z. B. 6/4-polig oder 8/6-polig).

Motoren in PAM-Schaltung haben wie jene in Dahlanderschaltung nur sechs Anschlussklemmen. Für beide Wicklungsarten können die gleichen Varianten des äusseren Schaltplans angewandt werden. An Schaltgeräten wird ausser den zwei Netzschützen der beiden Stufen immer ein zusätzliches Sternpunktschütz für die YY-Stufe benötigt.

Eine Polumschaltung ist auch durch Umgruppieren von Wicklungszweigen möglich, bekannt als Phasenmischverfahren oder Phasenmodulation. Hier wird die Wicklung längs des Umfangs in Wicklungsblöcke aufgeteilt. Je nach deren Anzahl lassen sich zwei- oder mehrstufige Polumschaltungen realisieren. Pro Drehzahlstufe werden drei Anschlussklemmen benötigt.

Bei Polumschaltung durch Phasenmodulation ist für die Wahl des äusseren Schaltplans und der Schaltgeräte das Anschlussschema des Motorherstellers zu konsultieren. Es ist entweder pro Stufe nur ein Netzschütz (z.B. YYY/YYY-Schaltung) oder dazu noch ein zusätzliches Überbrückungsschütz (z.B. Δ/Δ -Schaltung) notwendig.

In [Tab. 3.7-1](#) und [Tab. 3.7-2](#) ist eine Übersicht der gebräuchlichsten Anordnungen und Schaltungen der Statorwicklungen von polumschaltbaren Motoren dargestellt.

Anzahl Drehzahlen	Anzahl und Art der Wicklungen	Übliche Polzahl	Synchrone Drehzahlen bei 50 Hz [min ⁻¹]	Schaltung der Wicklung	Verhältnis zwischen den Stufen Leistung	Nennbetriebsstrom	Anwendung für
2	1 Dahlanderwicklung oder 1 PAM-Wicklung	4/2	1500/3000	Δ/YY	1:1,15 bis 1:1,8	1:1 bis 1:1,5	In beiden Stufen annähernd konstantes Drehmoment
		8/4	750/1500				
		12/6	500/1000	YY/Δ	z. B. ca. 1:1	z. B. ca. 1:0,9	In beiden Stufen annähernd konstante Leistung
		6/4 8/6	1000/1500 750/1000	Y/YY	1:2,7 bis 1:6	1:1,8 bis 1:4	Ventilatoren-, Kreiselverdichter-, Pumpen-Antriebe
	2 getrennte Wicklungen	6/2	1000/3000	Y/Y	Je nach Anwendung	Bei höherer Drehzahl I_e wie Normmotor, bei niedriger Drehzahl und kleinen Leistungen I_e höher als Normmotor	Konstantes Drehmoment oder quadratisch zunehmende Leistung (Ventilatoren-Antrieb)
		6/4	1000/1500	Δ/Δ			
		8/2	750/3000	Y/Δ			
		8/6	750/1000	Y/Δ			
		12/4	500/1500	Δ/Y			
		12/8	500/ 750	Δ/Y			

Tab. 3.7-1
Polumschaltbare Motoren mit 2 Drehzahlen

Anzahl Drehzahlen	Anzahl und Art der Wicklungen	Übliche Polzahl	Synchrone Drehzahlen bei 50 Hz [min ⁻¹]	Schaltung der Wicklung	Verhältnis zwischen den Stufen Leistung	Nennbetriebsstrom	Anwendung für
3	1 Dahlander- und 1 getrennte Wicklung	8/4/2	750/1500/3000	$Y/\Delta/YY$	z. B. ca.	z. B. ca.	In allen Stufen annähernd konstantes Drehmoment Auch mit Dahlander-Stufen YY/Δ für Ventilatoren-Antriebe
		12/8/4	500/750/1500		1:2,5:3,5	1:1,7:2	
		8/6/4	750/1000/1500	$\Delta/Y/YY$	z. B. ca.	z. B. ca.	
		12/8/6	500/750/1000		1:1,25:1,6	1:1,1:1,2	
		8/4/2	750/1500/3000	$\Delta/YY/Y$	z. B. ca.	z. B. ca.	
		12/6/4	500/1000/1500		1:2:4	1:1,1:1,5	
4	2 Dahlanderwicklungen	12/8/6/4	500/750/1000/1500	$\Delta/\Delta/YY/YY$	z. B. ca.	z. B. ca.	
		12/6/4/2	500/1000/1500/3000	$\Delta/YY/\Delta/YY$	1:1,25:1,6:2	1:1,1:1,2:1,4	
					z. B. ca.	z. B. ca.	
					1:1,6:3:5	1:1,2:3:4	

Tab. 3.7-2
Polumschaltbare Motoren mit 3 oder 4 Drehzahlen

3.7.2 Dimensionierung des Starters bei Polumschaltung

Polumschaltbare Motoren haben, besonders in den niedrigeren Drehzahlen, oft einen erheblich ungünstigeren Wirkungsgrad und Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) als Normmotoren. Der aufgenommene Strom ist deshalb meist höher als der in den Auswahltabellen der entsprechenden Leistung zugeordnete. Deshalb sollten die Netzschütze der einzelnen Stufen (Fig. 3.7-1) bei allen Anordnungen und Schaltungen (getrennte Wicklungen, Dahlander-, PAM-, Phasenmodulations-Schaltung) nicht nach den Bemessungsbetriebsleistungen, sondern nach den vom Motorhersteller angegebenen Bemessungsbetriebsströmen dimensioniert werden. Die Auswahl erfolgt gemäss Gebrauchskategorie AC-3; bei Stufen mit Tippschaltungen ist das Netzschütz für AC-4 auszulegen.

Das Sternpunktschütz der YY-Stufe (K3) bei Dahlanderschaltung führt je nach Schaltungsvariante genau oder angenähert den halben Strom des Netzschützes dieser Stufe:

$$I_{eK3} = I_{eYY} / 2 \quad [A]$$

Die Auswahl erfolgt immer gemäss AC-3.

Das Sternpunktschütz bei PAM-Schaltung ist wegen der unsymmetrischen Phasenströme und des Oberschwingungsgehalts gleich gross zu wählen wie das Netzschütz der YY-Stufe.
Die Dimensionierung der Schütze bei Phasenmodulationsschaltung erfolgt nach den Angaben des Motorherstellers bezüglich des Bemessungsbetriebsstroms.

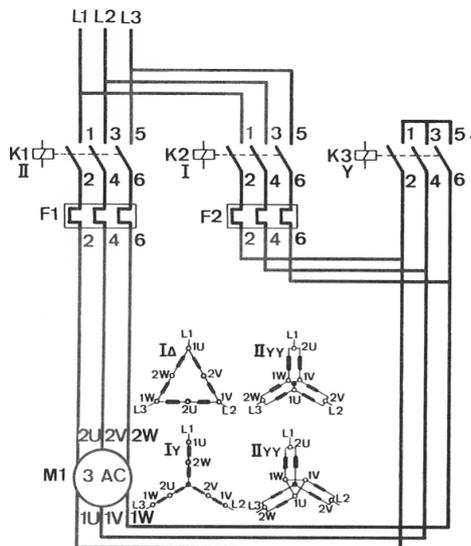


Fig. 3.7-1
Schaltplan für Motoren in Dahlander- oder PAM-Schaltung

Bei allen Anordnungen und Schaltungen ist für den thermischen Überlastschutz des Motors in jeder Stufe ein separates Motorschutzgerät vorzusehen, das auf den entsprechenden Bemessungsbetriebsstrom eingestellt wird.

Da bei Dahlander-, PAM- und Phasenmodulations-Schaltung beim Umschalten der Polzahl in einem Teil der Wicklung eine Stromrichtungsumkehr erfolgt, ist bei der Umschaltung eine stromlose Pause notwendig, um unzulässig hohe Umschaltstromstöße zu vermeiden. Wenn die Einschaltverzögerung der Netzschütze der beiden Stufen kleiner als 20 ms ist, muss die elektrische Verriegelung mit einer Umschaltpause (ca. 30 ... 50 ms) erfolgen. Beim Umschalten zwischen zwei getrennten Wicklungen treten lediglich Ströme im Bereich der Anzugsströme auf, die von den Schaltgeräten beherrscht werden.

Hinweis

Normalerweise wird bei Mehrstufenmotoren für alle Stufen ein gemeinsamer Kurzschlusschutz vorgesehen, der nach dem grössten Bemessungsbetriebsstrom bemessen wird. Es muss geprüft werden, ob dieser Kurzschlusschutz auch für das gewählte Netzschütz der kleineren Stufe zulässig ist. Andernfalls ist ein grösseres Schütz zu wählen.

3.7.3 Dimensionierung des Starters für Stufen mit Stern-Dreieck-Anlauf

Wenn eine Wicklung auf sechs Anschlussklemmen herausgeführt ist, kann in dieser Stufe Stern-Dreieck-Anlauf vorgesehen werden. Anstelle des Netzschützes wird eine Stern-Dreieck-Schützkombination benötigt. Diese wird nach dem Bemessungsbetriebsstrom der betreffenden Stufe dimensioniert.

Eine Reduktion des Anlaufstroms ist auch möglich durch Stern-Dreieck-Anlauf in der Stufe I bei der Dahlanderschaltung Δ/YY (Stufe I: Y- Δ ; Stufe II: YY). Die Schaltung kann mit nur vier Schützen realisiert werden (Fig. 3.7-2).

Die Dimensionierung der Schütze erfolgt nach den Bemessungsbetriebsströmen I_{el} (Stufe I) bzw. I_{eII} (Stufe II). Für die Schütze K3 und K4 gilt der höhere Wert (Tab. 3.7-3).

Schütz	Funktion			Belastung
K1	Netzschütz	Stufe I	(Y-Δ)	I_{eI}
K2	Netzschütz	Stufe II	(YY)	I_{eII}
K3	Dreieckschütz und 1. Sternschütz	Stufe I	(Y-Δ)	$0.58 \cdot I_{eI}$ und $0.5 \cdot I_{eII}$
K4	Sternschütz und 2. Sternschütz	Stufe I	(Y-Δ)	Ca. $0.33 \cdot I_{eI}$ und $0.5 \cdot I_{eII}$

Tab. 3.7-3
Dimensionierung des Starters für Stufen mit Stern-Dreieck-Anlauf

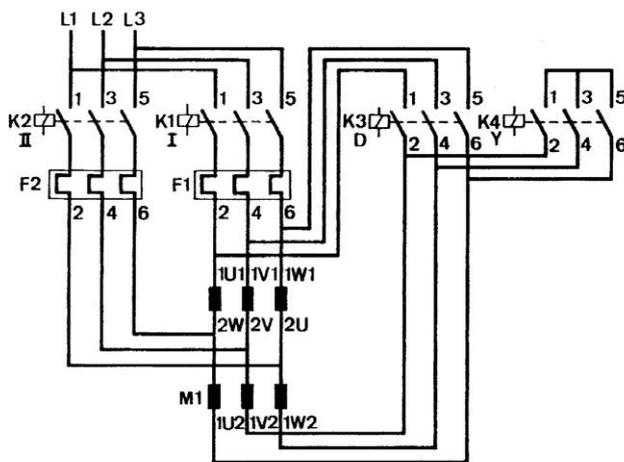


Fig. 3.7-2
2-Stufen-Stern-Dreieck-Starter für Motoren in Dahlanderschaltung (mit neun Anschlussklemmen), Stern-Dreieck-Anlauf in Stufe I

3.8 Starten von Schleifringmotoren

Mit Schleifringläufermotoren kann bei hohem Gegenmoment und langer Anlaufzeit der Anlaufstrom auf $(1,1 \dots 2,8) \cdot I_e$ begrenzt werden. Somit ist ein Schweranlauf auch an nur schwach belastbaren Netzen möglich. Siehe auch Abschnitt 1.7.1.1.

Die Schleifringläufermotoren haben Rotorwicklungen, deren drei Enden über Schleifringe herausgeführt sind. Durch das Einschalten von Widerständen im Rotorkreis werden der Anlaufstrom und damit das Drehmoment beeinflusst (Fig. 3.8-1). Die in jeder Läufer-Phase liegenden Anlasswiderstände werden stufenweise durch Schütze kurzgeschlossen (Fig. 3.8-2). Bei automatischen Anlassvorgängen werden die Schütze der einzelnen Anlassstufen durch einstellbare Zeitrelais gesteuert. Bei so genannten Kombimotoren erfolgt das Schalten der Läuferwiderstände drehzahlabhängig durch Fliehkraftschalter.

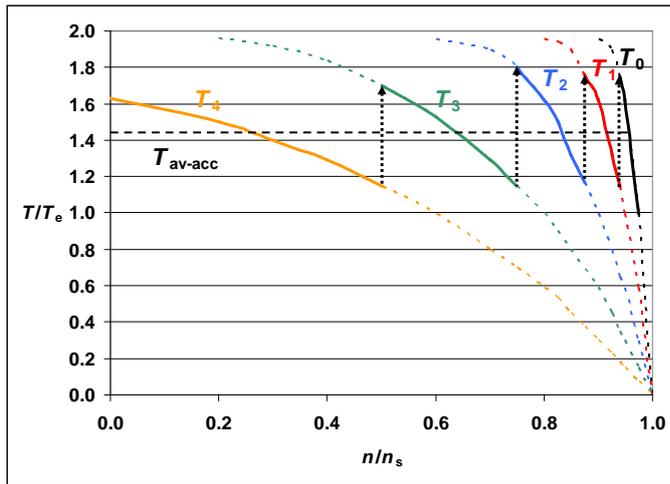


Fig. 3.8-1
 Drehmomentverlauf beim Anlauf eines Schleifringläufermotors
 $T_0 \dots T_4$ Drehmomentverlauf der einzelnen Anlaufstufen
 T_{av-acc} Mittleres Anlaufdrehmoment

Ein Starter für einen Schleifringläufermotor kann mit einer oder mehreren Stufen ausgeführt werden. Dies ermöglicht einerseits das Anlaufmoment an die angetriebene Maschine und andererseits die Stromspitzen an das Netz anzupassen.

		Halblast-Anlauf			Volllast-Anlauf		
Anzahl Widerstandsstufen		2	3	4	2	3	4
Max. Anzugsstrom	I_{max} / I_e	2.2	1.7	1.3	2.8	2.3	1.8
Min. Anzugsmoment	T_{min} / T_e	0.5	0.5	0.5	1	1	1
Hochlaufzeit	s	4 ... 60					

Tab. 3.8-1
 Anwendungsbeispiel: Anlassen von Motoren unter Belastung

Hinweis

Beim Schleifringläufermotor kann mit den Widerständen im Rotorstromkreis auch die Drehzahl geregelt werden (Widerstands- oder Schlupfregelung; z. B. bei Kranmotoren). Dies bedingt einen entsprechend aufgebauten Steuerstromkreis und die Dimensionierung der Schütze und Widerstände für Stell- und Regelbetrieb.

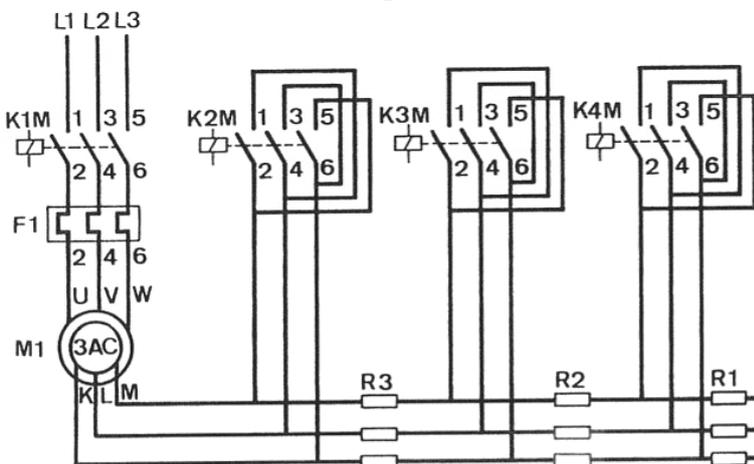


Fig. 3.8-2
 Schaltplan mit dreistufigem, automatischem Kurzschliessen der externen Läuferwiderstände

Dimensionierung des Starters (Anlassbetrieb siehe Tab. 3.8-2)

Das Statorschütz K1M (Netzschütz) wird entsprechend dem Bemessungsbetriebsstrom I_e des Motors nach Gebrauchskategorie AC-2 ausgewählt. Bei den Rotorschützen wird zwischen Stufenschützen (K3M, K4M) und dem Endstufenschütz (K2M) unterschieden. Die Rotorschütze müssen den Strom nur einschalten und kurzzeitig führen. Ihre Pole werden meist in Dreieck geschaltet. Das Endstufenschütz (K2M) muss für Dauerbetrieb AC-1 ausgelegt sein; die Belastung ist $0.58 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$. Die Stufenschütze (K3M, K4M) arbeiten in Anlassschaltungen im Kurzzeitbetrieb. Sie können deshalb für diese Kurzzeitbelastung ausgelegt bzw. nach dem Einschaltvermögen dimensioniert werden.

Dimensionierung für Anlauf bei		Halblast	Volllast	Schwerlast
	$I_{av \text{ Rotor}} / I_{e \text{ Rotor}}$	0.7	1.4	2.0
Statorschütz K1M	$I_{e \text{ AC-2}}$	$I_{e \text{ (Stator)}}$	$I_{e \text{ (Stator)}}$	$I_{e \text{ (Stator)}}$
Rotorschütze (Pole in Dreieck geschaltet)				
Endstufenschütz K2M	$I_{e \text{ AC-1}}$	$0.58 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.58 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.58 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$
Stufenschütze	2 Stufen K3M	$0.20 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.35 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.50 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$
	3 Stufen K3M, K4M	$0.18 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.30 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.43 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$
	4 Stufen K3M ... K5M	$0.15 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.25 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$	$0.35 \cdot I_{e \text{ Rotor}}$
Thermorelais F1		$I_{e \text{ (Stator)}}$	$I_{e \text{ (Stator)}}$	$I_{e \text{ (Stator)}}$
Max. Anlaufzeit pro Stufe		15 s	12 s	12 s
Max. Schalhäufigkeit (Anläufe pro Stunde)		120/h	30/h	12/h

$I_{e \text{ (Stator)}}$ Bemessungsbetriebsstrom des Motors (Stator)
 $I_{e \text{ Rotor}}$ Bemessungsbetriebsstrom des Rotors
 $I_{av \text{ Rotor}}$ Mittlerer Rotorstrom während des Anlaufs

Tab. 3.8-2

Faktoren für die Bemessungsbetriebsströme des Motors zur Schützdimensionierung nach den AC-2-Katalogwerten

Zulässige Spannung für die Rotorschütze

Da die Rotorschütze während des Anlaufs nur kurze Zeit an Spannung liegen, darf gemäss IEC 60947-4-1, 5.3.1.1.2 die Bemessungsbetriebsspannung des Rotors U_{er} (Rotorstillstandsspannung) die Bemessungsisolationsspannung U_i des Schützes um 100 % übersteigen. Schütze für 690 V dürfen also bis zu einer Rotorstillstandsspannung von 1380 V eingesetzt werden.

3.9 Elektronische Softstarter

Softstarter dienen der stufenlosen Anpassung der Anlaufcharakteristik von Drehstrom-Asynchron-Motoren an die Bedürfnisse der Last durch Steuerung der Spannung am Motor und bieten durch diverse Zusatzfunktionen eine optimale Einbindung der Antriebe in die Prozesssteuerung.

Während bei Einsatz von Stern-Dreieck-Startern Anlaufmoment und Anlaufstrom fix auf etwa ein Drittel reduziert werden, kann mit elektronischen Softstartern die Reduktion in einem weiten Bereich eingestellt werden. Es ist zu beachten, dass beim Softstarter das Motordrehmoment mit dem Quadrat der Spannungs- und Stromreduktion sinkt. Bei gleichem Anlaufstrom wie bei einem Stern-Dreieck-Anlasser in Stern-Schaltung ($= 1/3 I_{A\Delta}$) sinkt bei Verwendung eines Softstarters das Motormoment auf $1/9 T_{A\Delta}$ im Vergleich zu $1/3 T_{A\Delta}$ bei Stern-Dreieck. Siehe auch Abschnitt 1.7.1.3.

Bei den konventionellen Anlassverfahren wie Direktstarter, Anlasstrafo oder Stern-Dreieck-Starter werden Motor, Netz und der gesamte Antriebsstrang durch Ein- und Umschaltvorgänge belastet. Jeder Schaltvorgang bedeutet auch eine schnelle Stromänderung (transiente Strom-

spitzen) und erzeugt damit im Motor hohe Momentenstöße. Elektronische Betriebsmittel mit Leistungshalbleitern können diese transienten Vorgänge vermeiden und reduzieren die Belastung von Netz und Antrieb.

Nachstehende charakteristische Merkmale und Optionen kennzeichnen die Verwendung von Softstartern:

- Weiter Einstellbereich der Anlaufcharakteristik bzw. Wahl verschiedener Anlaufcharakteristiken für eine optimale Anpassung an die Bedürfnisse der Lastmaschine
- Stufenloser Verlauf von Strom, Spannung und Moment. Keine Umschaltstromspitzen
- Motoranschluss mit nur drei Leitern bei Steuerung in den Motor-Zuleitungen
- Erhöhte Bemessungsleistung des Softstarters (Faktor 1.73) bei Steuerung im Wicklungsstrang und Motoranschluss mit sechs Leitern
- Überbrückung der Leistungshalbleiter nach dem Motoranlauf zur Reduktion der Dauerverluste
- Begrenzte Anzahl von Anläufen pro Stunde je nach Schwere des Anlaufs und thermischer Auslegung des Softstarters
- Verlängerter Auslauf und Bremsung von Antrieben
- Schleichdrehzahl zur Positionierung
- Diagnose- und Vorwarnfunktionen wie Überlast, Unterlast, Motorblockierung etc.
- Einbindung in ein Kommunikationsnetzwerk
- Integrierte (Motor-) Schutzfunktionen
- Strom-Oberschwingungen während der Anlaufzeit durch Phasenanschnitt
- Antriebe mit Softstartern bedürfen bei Arbeiten am Motor einer vorgeschalteten Sicherheitstrennstrecke (z.B. Trennschalter, Leistungsschalter mit Trennerfunktion)

Softstarter werden in einer Vielfalt von Ausführungsformen mit unterschiedlichen technischen Daten angeboten. Für die Auswahl von Geräten für konkrete Anwendungen sind die Unterlagen des Herstellers und dessen technische Unterstützung massgebend. Siehe auch IEC 60947-4-2 [5] und [17]. Für spezifische Aspekte von Motoren mit hohem Wirkungsgrad siehe [1.7.1.2.1](#).

3.9.1 Spannungsrampe versus Strombegrenzung

Das grundlegende Arbeitsprinzip von Softstartern ist die Steuerung der Spannung am Motor durch Phasenanschnitt. In der Regel erfolgt die Phasenanschnittsteuerung 3-phasig und in beiden Stromhalbwellen durch Triacs oder antiparallele Thyristoren. Kostengünstige Lösungen arbeiten mit gesteuerten Halbleitern in nur zwei oder sogar nur einer (1) Phase. Die dadurch entstehenden Unsymmetrien bringen Nachteile bezüglich des verfügbaren Drehmomentes bezogen auf die Stromaufnahme mit sich und z.B. eine erhöhte Belastung der Motorlager wegen Drehmoment-Asymmetrien. Die 1-phasige Steuerung entspricht der KUSA-Schaltung (siehe Abschnitt [3.5](#)).

Die Stellung der Spannung am Motor kann z.B. durch

- eine (wählbare) Spannungsrampe oder
- eine fixe (reduzierte) Spannung (Quasi-Strombegrenzung)
- in Abhängigkeit von einer Rückführgrösse wie
 - Motorstrom (Strombegrenzung) oder
 - Drehzahl (Start nach Drehzahlkennlinie)

erfolgen. Je nach Wahl der Methode ergeben sich charakteristische Drehmoment- und Drehzahlverläufe beim Start ([Fig. 3.9-1](#)). Beim Start mit Spannungsrampe und besonders beim Start mit Strombegrenzung ergeben sich gegen Ende des Anlaufs im Bereich des Kippmoments des Motors grosse Beschleunigungsmomente.

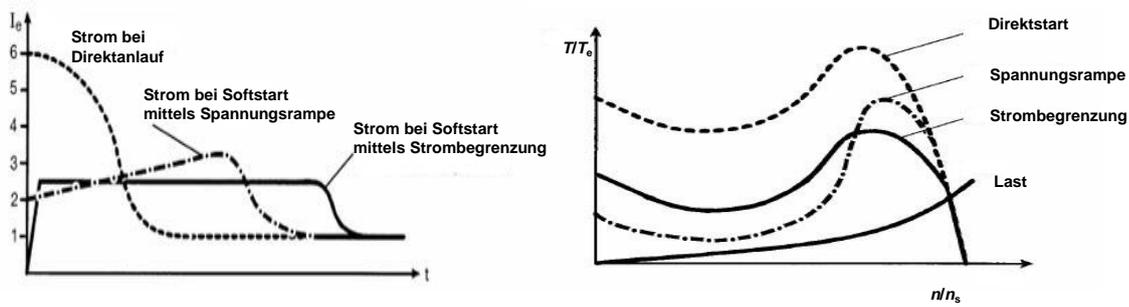


Fig. 3.9-1
Strom- und Momentkurven beim Hochlauf

Nachstehend eine Darstellung der charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen verfügbaren Softstarter-Funktionen.

3.9.2 Spannungsrampe

Die Spannung am Motor wird, beginnend von einem einstellbaren Anfangswert, während einer einstellbaren Zeit linear hochgeregelt (Fig. 3.9-2). Der Anlaufstrom und das Anlaufmoment und damit die Beschleunigung stellen sich gemäss der Spannungsrampe und der Momentencharakteristik der Last ein. Diese Methode eignet sich besonders für entlastete Anläufe und für Lastmaschinen mit steigendem Drehmomentbedarf bei zunehmender Drehzahl (Antriebe mit grösseren Schwungmassen, Lüfter etc.).

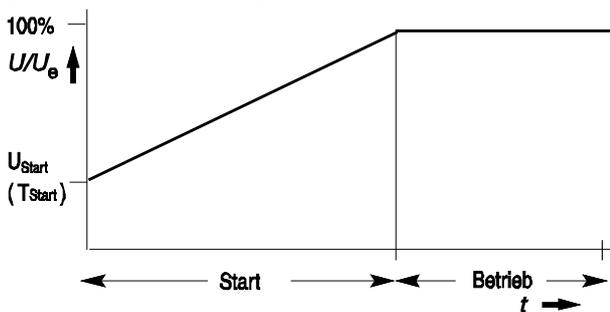


Fig. 3.9-2
Softstart mit Spannungsrampe

Für Antriebe mit variabler Belastung beim Start – z.B. verarbeitende Maschinen, die normal unbelastet hochfahren, nach einer Störung aber belastet sind – sind Softstarter mit zwei Spannungsrampen verfügbar (Fig. 3.9-3). Die Anfangsspannungen und Hochlaufzeiten der Rampen sind getrennt einstellbar und können damit an die beiden Betriebszustände angepasst werden. Nach Bedarf kann zwischen den beiden Rampen umgeschaltet werden.

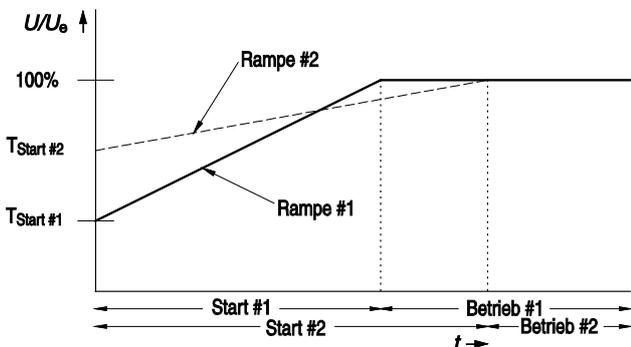


Fig. 3.9-3
Softstarter mit umschaltbarer Spannungsrampe für verschiedene Belastungsverhältnisse beim Start.

3.9.3 Kickstart

Viele Antriebe weisen im Stillstand ein hohes Losbrechmoment auf, weil z.B. Gleitstellen anfangs eine hohe Reibung aufweisen. Dies bedingt eine kurze Periode erhöhter Startspannung am Anfang des Anlaufs. Sobald der Antrieb dreht, geht der Drehmomentbedarf stark zurück und der Anlauf kann mit geringerer Spannung weiter geführt werden. Softstarter mit Kickstart-Funktion bieten die erforderliche Funktionalität (Fig. 3.9-4).

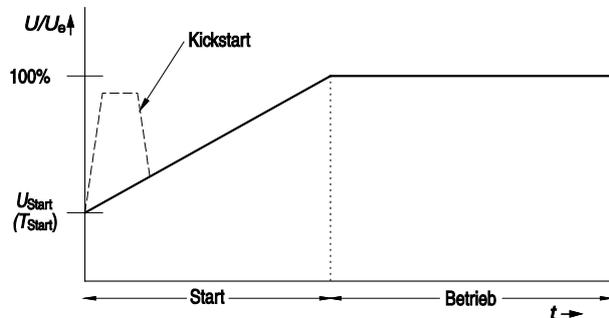


Fig. 3.9-4

Die Kickstartfunktion erhöht die Spannung am Anfang des Anlaufs kurzfristig, um das Losbrechmoment des Antriebs zu überwinden.

3.9.4 Strombegrenzung

Beim Anlauf mit Strombegrenzung ist der Anlaufstrom einstellbar. Die Netzbelastung kann damit den lokalen Anforderungen – z.B. des Elektrizitäts-Versorgungs-Unternehmens – angepasst werden. Der Motorstrom wird im Softstarter gemessen und die Motorspannung gemäss der eingestellten Strombegrenzung nachgeführt. Das verfügbare Motordrehmoment verringert sich mit dem Quadrat der Spannung bzw. des Stromes. Bei starker Strombegrenzung steht somit ein kleines Anlaufmoment zur Verfügung (Fig. 3.9-5 und Fig. 3.9-1).

Eine vereinfachte Variante begnügt sich mit der Einstellung einer fixen reduzierten Spannung während des Hochlaufs.

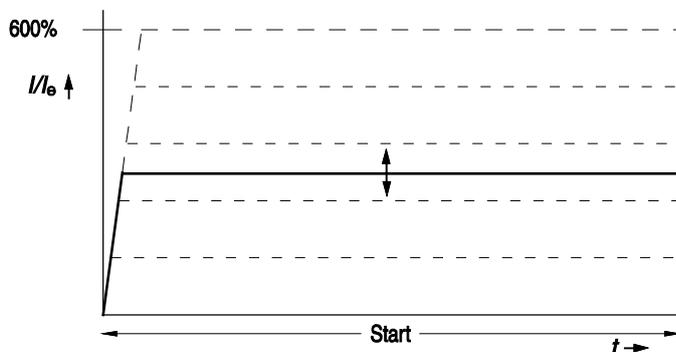


Fig. 3.9-5

Bei Anlauf mit Strombegrenzung kann der Anlaufstrom den Netzverhältnissen angepasst werden

3.9.5 Soft Stopp

Bei manchen Antrieben ist es erwünscht, auch den Auslauf des Motors zu steuern, um ein sanftes Anhalten anstelle eines allfälligen abrupten Stopps beim Ausschalten der Motorspannung zu bewirken. Dies kann z.B. bei Fördereinrichtungen zutreffen, bei denen die transportierten Güter bei einem plötzlichen Anhalten sich verschieben oder umfallen könnten. Softstarter mit einer einstellbaren Spannungsrampe beim Ausschalten sind dafür eine geeignete Lösung. Für Pumpensteuerungen siehe Abschnitt 3.9.6.

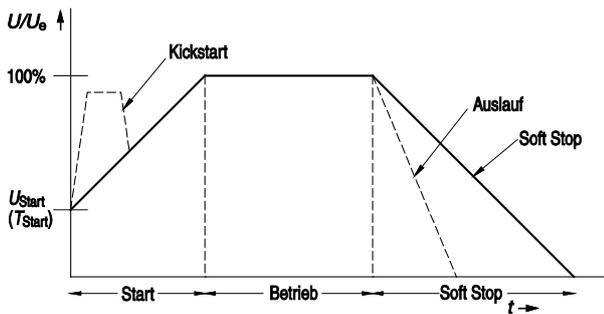


Fig. 3.9-6
Soft-Stop-Funktion mit einstellbarer Auslaufzeit

3.9.6 Softstarter für Pumpensteuerungen

Bei raschen Geschwindigkeitsänderungen von Flüssigkeiten – sowohl beim Beschleunigen als auch beim Bremsen – können in grösseren Zentrifugalpumpen-Anlagen hydraulische Schläge und Kavitationseffekte auftreten, die die Systeme mechanisch sehr stark beanspruchen und mit entsprechenden akustischen Begleiterscheinungen verbunden sind. Die mechanischen Schläge entstehen aufgrund der Eigenschaft von Flüssigkeiten, sich nicht komprimieren zu lassen, und den Druckänderungen im Rohrsystem bei Änderung der Geschwindigkeit der Flüssigkeit. Beim Beschleunigungsvorgang ist auch die träge Masse des zu beschleunigenden (oder zu bremsenden) Mediums zu beachten.

Zur Vermeidung der oben beschriebenen Probleme bedarf es einer langsamen Änderung der Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit beim An- und Auslauf. Dies bedingt beim Anlauf eine Steuerung der Spannung am Motor derart, dass ein kleines, konstantes und der spezifischen Anlage entsprechendes Beschleunigungsmoment entsteht, das gegen Ende des Hochlaufs sanft in den Betriebspunkt überleitet. Die Charakteristiken normaler Softstarter mit Spannungsrampe oder mit Strombegrenzung erfüllen diese Anforderungen nur ungenügend. Die spezielle Pumpensteuerungscharakteristik von Softstartern von Rockwell Automation bietet eine geeignete Lösung (Fig. 3.9-7).

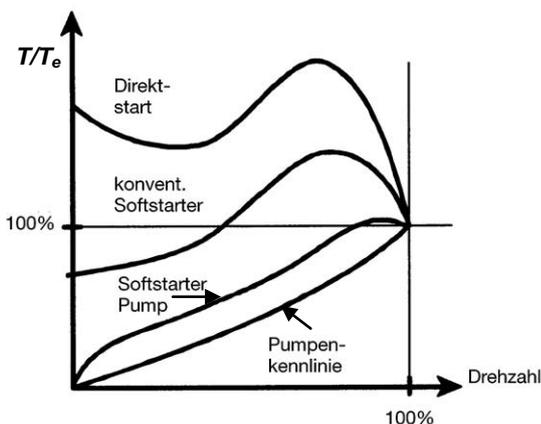


Fig. 3.9-7
Die Pumpensteuerfunktion sorgt für eine sanfte Beschleunigung der Flüssigkeit

Beim natürlichen Auslauf einer Zentrifugalpumpe ergeben sich durch den Gegendruck des geförderten Mediums in der Regel ein abruptes Abbremsen und damit verbunden ebenfalls hydraulische Schläge, die das System stark mechanisch beanspruchen. Ein normaler Soft-Stop durch lineare Reduktion der Spannung am Motor würde das Problem um ein wenig verringern, nicht aber beheben. Die Pumpensteuerfunktion mit Soft-Stop von Rockwell Automation steuert die Spannung am Motor in einer Weise zurück, dass der Fluss der Flüssigkeit kontinuierlich abnimmt und hydraulische Schläge vermieden werden.

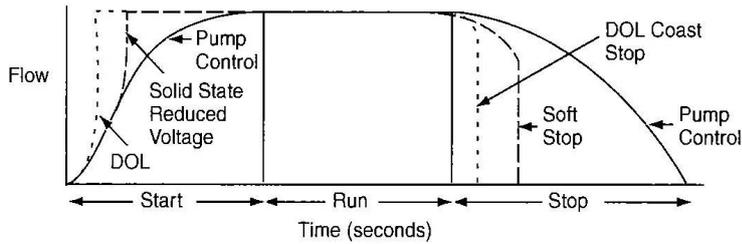


Fig. 3.9-8

Die Pumpensteuerfunktion von Softstartern von Rockwell Automation steuert den Fluss des Mediums beim An- und Auslauf kontinuierlich und vermeidet hydraulische Schläge mit ihren negativen Folgen.

Flow ... Strömung

Solid State Reduced Voltage ... Verlauf bei normalem Softstarter

Pump Control ... Verlauf mit spezieller Pumpensteuerfunktion

DOL Coast Stop ... Verlauf bei direktem Ausschalten

Soft Stop ... Verlauf bei normalem Soft Stop

Run ... Betrieb

3.9.7 Motorbremsung

Für Anwendungen, in denen der natürliche Auslauf des Motors zu lange dauert – z.B. bei Antrieben mit grossen Schwungmassen – kann die Bremsfunktion von Softstartern nützlich sein. Durch geeignete Ansteuerung der Thyristoren wird beim Stoppen ein Bremsmoment im Motor erzeugt, das zu einem beschleunigten Abbremsen führt. Der Motorstillstand wird durch Messung der Gegen-EMK des Motors erkannt, so dass keine zusätzlichen Geräte wie Stillstandssensoren, Schütze etc. erforderlich sind. Diese Methode ist nicht für NOT-AUS Stillsetzungen geeignet.

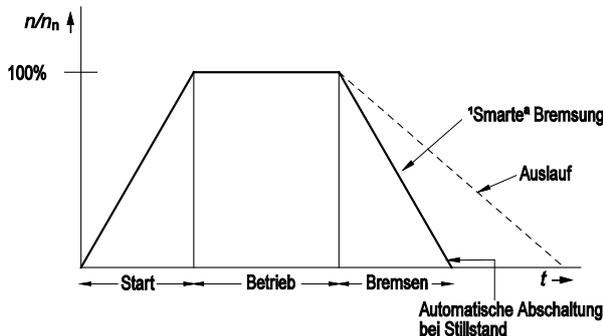


Fig. 3.9-9

Mit der Bremsfunktion kann die Stillsetzungszeit eines Antriebs verkürzt werden

3.9.8 Positionierdrehzahlen und gesteuertes Bremsen

Im Maschinenbau ist vielfach genaues Positionieren erforderlich, wofür die Motordrehzahl vorteilhaft kurzzeitig reduziert wird. Softstarter bieten verschiedene Möglichkeiten für Positionieraufgaben, in einer oder zwei Drehrichtungen und kombiniert mit gesteuertem Bremsen. Siehe [Fig. 3.9-10](#) bis [Fig. 3.9-12](#).

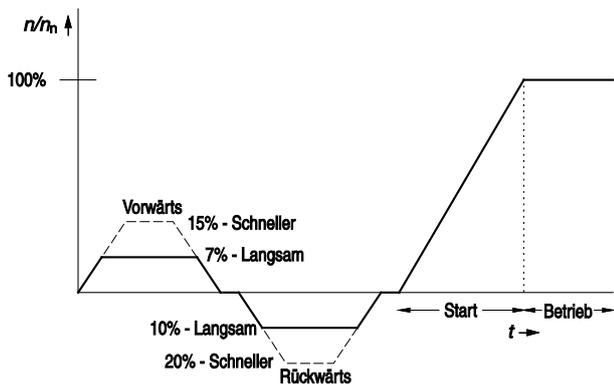


Fig. 3.9-10
Softstarter mit Schleichdrehzahl in beiden Drehrichtungen für Positionierung

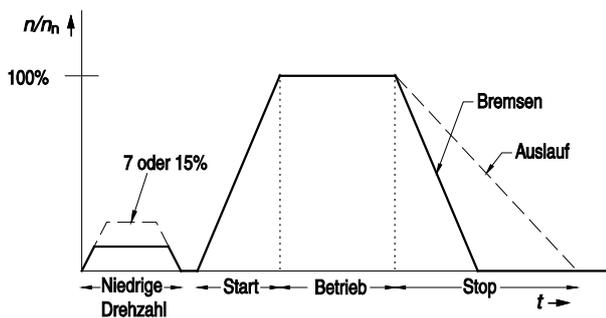


Fig. 3.9-11
Softstarter mit Positionier-Drehzahl in einer Drehrichtung und gesteuerter Bremsung

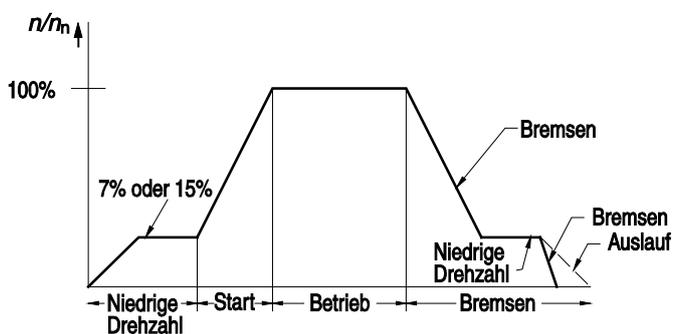


Fig. 3.9-12
Die Accu-Stop™-Funktion ermöglicht präzises (accurate) positionieren in einer Drehrichtung und punktgenaues Anhalten. In der Bremsphase wird zuerst bis zur Positionierdrehzahl heruntergebremst. Die vollständige Abbremsung erfolgt, sobald ein Stopp-Befehl anliegt.

3.9.9 Lineare Beschleunigung und Abbremsung durch Drehzahl-Rückführung

Durch Rückführung der Motordrehzahl kann eine lineare Beschleunigung und Stillsetzung eines Antriebs bewirkt werden. Die Spannung am Motor wird – in weiten Grenzen unabhängig vom Momentenbedarf des Antriebs – gemäss der Drehzahlrückführung so geregelt, dass Anlauf und Bremsung der gewählten Charakteristik folgen. Der Motorstrom stellt sich gemäss der erforderlichen Spannung ein.

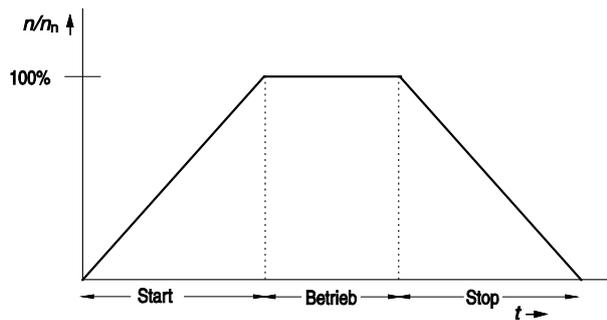


Fig. 3.9-13
Lineare Beschleunigung und Stillsetzung eines Antriebs durch Rückführung der Drehzahl mittels Tachometer.

3.9.10 Direktstart mit voller Spannung

Wie mit kontaktlosen (Halbleiter-) Schützen kann mit Softstartern auch ein Start mit voller Spannung und damit vollem Motormoment durchgeführt werden.

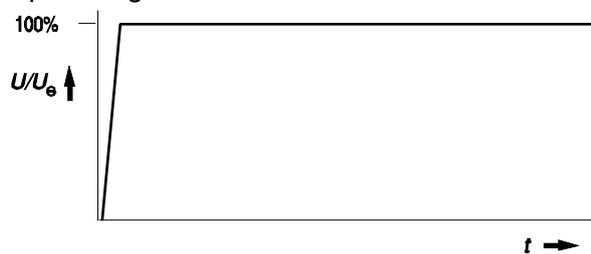


Fig. 3.9-14
Direktstart mit Softstarter. Die Spannung am Motor wird in kurzer Zeit auf die volle Netzspannung geregelt.

3.10 Frequenzumrichter

Der Hauptanwendungsbereich von Frequenzumrichtern für Asynchronmotoren ist der Bereich der betrieblichen Drehzahlstellung und -regelung. Im unteren Leistungsbereich von bis zu wenigen kW kommen sie aus Kosten- und Funktionsgründen durchaus auch für die Lösung von Motoranläufen als Alternative zu Softstartern in Frage. Vielfach – wie bei Pumpen- und Lüfterantrieben – finden Frequenzumrichter sowohl für die optimale Beherrschung des Anlaufs und der Stillsetzung des Antriebs wie auch für die betriebliche Drehzahlregelung Einsatz, z.B. aus Energiespargründen.

Für den Motorstart bietet der Frequenzumrichter den Vorteil, dass im Drehzahlbereich bis zur synchronen Drehzahl das volle Motormoment zur Verfügung steht. Siehe auch Abschnitt 1.7.1.4. Zusätzlich kann der Drehzahlverlauf – meist eine lineare Rampe – als Sollgrösse vorgegeben werden und ergibt sich nicht wie bei Softstartern in einem gewissen Bereich unbeeinflussbar als Ergebnis der Spannung am Motor und der Lastcharakteristik (Schwungmasse und Widerstandsmoment).

3.10.1 Funktionsweise

Nachstehend wird auf die grundsätzliche Funktionsweise von Frequenzumrichtern eingegangen. Bezüglich weitergehender Information – z.B. betreffend Umrichter mit Vektorregelung und Schlupfkompensation, Umrichter mit Regelung des magnetischen Flusses - sei auf weiterführende Publikationen von Rockwell Automation verwiesen (siehe auch Allen-Bradley Homepage www.ab.com).

Der Frequenzumrichter wandelt die konstante Spannung und Frequenz des speisenden Netzes vorerst in eine Gleichspannung um. Aus dieser Gleichspannung erzeugt er für den Drehstrommotor ein neues, dreiphasiges Netz mit variabler Spannung und variabler Frequenz. Dabei entnimmt der Frequenzumrichter dem speisenden Netz im einfachen Fall eines ungesteuerten Gleichrichters fast nur Wirkleistung ($\cos \varphi \sim 1$). Die für den Motorbetrieb erforderliche Blindlei-

nung liefert der Gleichspannungszwischenkreis. Somit kann auf eine netzseitige Leistungsfaktor-Kompensationseinrichtung in den meisten Fällen verzichtet werden. **Fig. 3.10-1** zeigt den prinzipiellen Aufbau.

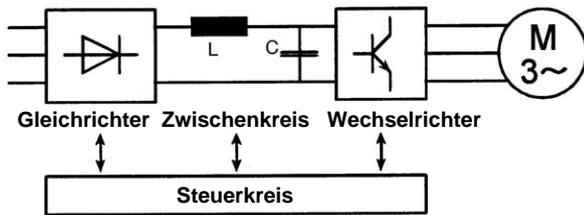


Fig. 3.10-1

Prinzipieller Aufbau eines Frequenzumrichters bestehend aus Gleichrichter, Gleichstrom-Zwischenkreis und Wechselrichter

3.10.1.1 Gleichrichter

Der Gleichrichter liegt am speisenden Netz und erzeugt eine pulsierende Gleichspannung, deren Amplitude (beim ungesteuerten Gleichrichter) dem Spitzenwert der angeschlossenen Netzspannung ($U_e \cdot \sqrt{2}$) entspricht. Für Antriebe mit kleiner Leistung (bis ca. 2.2 kW) werden aus Kostengründen vielfach einphasige, bei grösseren Leistungen dreiphasige Brückengleichrichter eingesetzt.

3.10.1.2 Zwischenkreis

Der Zwischenkreis speichert und glättet die Gleichspannung. Der am Frequenzumrichter angeschlossene Motor entnimmt ihm Energie und entlädt dabei teilweise den Kondensator. Dieser wird nachgeladen, wenn die Netzspannung höher als die Zwischenkreisspannung ist. Die Energie wird somit vom Netz zugeführt, wenn die Netzspannung nahe dem Maximum ist. Dadurch ergeben sich Stromspitzen, die bei der Auswahl vorgeschalteter Schaltgeräte (Schütze oder Leistungsschalter) zu beachten sind, da sich die Bemessungsdaten dieser Geräte auf sinusförmige Ströme beziehen. Bei grösseren Leistungen (ab ca. 5.5 kW) werden Zwischenkreisdrosseln L vorgesehen, um die Stromflussdauer auf der Netzseite zu verlängern und damit die Stromspitzen zu reduzieren.

3.10.1.3 Wechselrichter

Der Wechselrichter erzeugt aus der Gleichspannung für den angeschlossenen Motor wieder ein Drehstromnetz mit der gewünschten Frequenz und Spannung. Für diesen Zweck schalten die Bauelemente des Wechselrichters - gesteuert von der Steuerelektronik - positive und negative Spannungspulse an die Motorwicklung. Durch die hohe Schaltfrequenz, die vielfach über dem hörbaren Bereich liegt, ergibt sich in Zusammenwirkung mit den Motor-Induktivitäten ein weitgehend sinusförmiger Motorstrom. Die Veränderung der Frequenz und Spannung erfolgt bei den meisten Frequenzumrichtern nach dem Prinzip der Pulsweiten-Modulation PWM (**Fig. 3.10-2**).

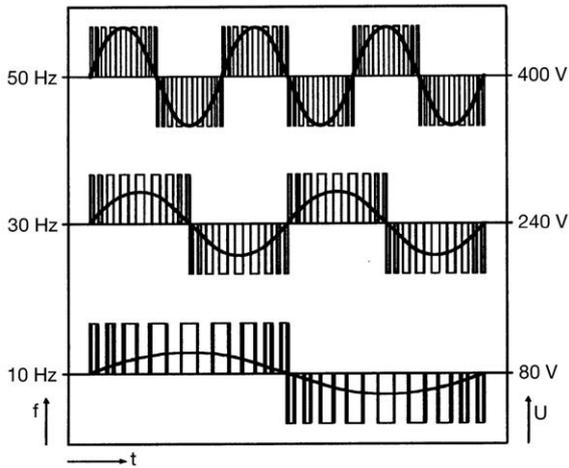


Fig. 3.10-2
Prinzipielle Darstellung der Pulsweiten-Modulation

3.10.2 Betriebsverhalten

Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren verlangen als grundlegende Betriebskennlinie eine sogenannte U/f -Kennlinie, bei der die Spannung am Motor proportional zur Frequenz reduziert wird (Fig. 3.10-3). Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass das magnetische Feld im Motor entscheidend für die Entwicklung des Drehmoments ist und daher eine Sättigung des Eisens zu vermeiden ist. Eine solche Sättigung würde auftreten, wenn mit reduzierter Frequenz nicht auch die Höhe der Spannung reduziert würde (gleiche Spannungs-Zeit-Fläche einer Halbwelle). Im Bereich bis zur synchronen Drehzahl kann so der Antrieb das Nennmoment abgeben (Fig. 1.7-8 Abschnitt 1.7.1.4).

Frequenzumrichter sind in der Regel so ausgelegt, dass die Motorspannung bei der synchronen Drehzahl ihren maximalen Wert erreicht und bei weiterer Erhöhung der Frequenz konstant bleibt. Bei Drehzahlen über der synchronen Drehzahl sinkt somit das verfügbare Drehmoment und der Antrieb kann mit konstanter Leistung betrieben werden.

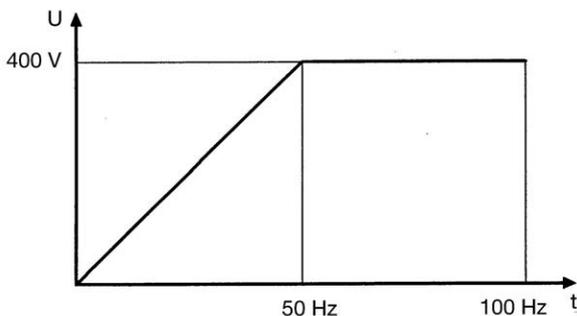


Fig. 3.10-3
 U/f -Kennlinie

Bei kleiner Frequenz ($< \text{ca. } 5 \text{ Hz}$) wird der Spannungsabfall an den internen ohmschen Widerständen des Motors (unabhängig von der Frequenz) im Verhältnis zu jenem an der Motorinduktivität (proportional zur Frequenz) grösser. Dies führt zu ungenügender Magnetisierung und als Folge zu einem Abfallen des Drehmoments. Um diesem Effekt zu begegnen, wird bei niedrigen Drehzahlen eine Spannungsanhebung („Boost“) vorgesehen (Fig. 3.10-4).

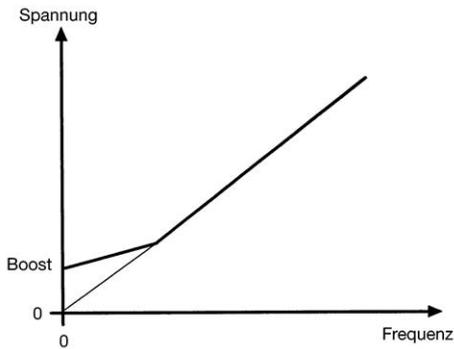


Fig. 3.10-4

Spannungsanhebung bei niedrigen Frequenzen, um ein Abfallen des Drehmoments zu verhindern

3.10.3 Drehrichtungswechsel und Bremsen

Weil das Drehfeld beim Frequenzumrichter elektronisch gebildet wird, genügt ein Steuerbefehl um die Drehrichtung zu wechseln.

Wird die Frequenz bei laufendem Motor reduziert, so dreht der Rotor schneller als das Drehfeld. Der Motor läuft im sogenannten übersynchronen Betrieb und wirkt als Generator. Es wird also Energie vom Motor in den Frequenzumrichter zurückgespeist, wo sie wieder im Zwischenkreis gespeichert wird. Dies führt zu einem Spannungsanstieg und als Folge zu einer möglichen Schutzabschaltung, wenn die Energie nicht durch geeignete Mittel abgeführt wird. Z.B. durch:

- Elektronisch gesteuerte Umwandlung der Energie in Wärme über einen Widerstand
- Rückspeisung der Energie ins speisende Netz mittels eines Wechselrichters
- Zusammenschaltung der Zwischenkreise von mehreren Frequenzumrichtern und Nutzung der Bremsenergie für den Betrieb der daran angeschlossenen Motoren.

3.10.4 Motorschutz

Frequenzumrichter haben üblicherweise einen integrierten elektronischen Motorschutz. Ein zusätzlicher Schutz ist normalerweise nicht erforderlich.

Bei speziellen Anwendungen, z.B. bei Speisung mehrerer Motoren aus einem Umrichter, ist ein zusätzlicher Motorschutz für jeden Motor angebracht. Werden zum Schutz der Einzelmotoren Überlastschutzgeräte mit Bimetallauslösern eingesetzt, muss beachtet werden, dass der Oberschwingungsgehalt des Ausgangsstromes des Frequenzumrichters die Charakteristik der Schutzgeräte möglicherweise verändert und die Geräte auch thermisch zusätzlich belastet. Siehe Abschnitt [2.4.3.5](#).

Es gilt auch zu beachten, dass eigenbelüftete Motoren nicht für einen länger andauernden Betrieb bei niedrigen Drehzahlen geeignet sind. Für solche Anwendungen sind Fremdbelüftungen vorzusehen. Um den Schutz auch bei niedrigen Drehzahlen zu gewährleisten, müssen Temperaturfühler, z.B. Thermistoren (PTC), in die Motorwicklungen eingelegt werden.

4 Schutz

Der Schutz von Menschen, Nutztieren und Sachen vor den Gefahren, die aus dem Betrieb elektrischer Betriebsmittel entstehen können, ist in der Richtlinie 2006/95/EG der Europäischen Union (Niederspannungsrichtlinie) als übergeordnetes Ziel festgehalten. Die Forderung nach einem sicheren Betrieb und der Vermeidung von Gefährdungen und Schäden jeder Art ist in der Niederspannungstechnik allgegenwärtig, sei es die Vermeidung eines elektrischen Schlages, von gefährlichen Überhitzungen oder den Auswirkungen elektrischer Lichtbögen. Dies gilt für den normalen wie auch für den gestörten Betrieb.

Neben dem Aspekt der Vermeidung von Gefährdungen und Schäden kommt dem Schutz eine wichtige Bedeutung bezüglich der Verfügbarkeit von Betriebsmitteln und damit als Produktivitäts-sichernde Massnahme zu. Jede Massnahme zur Vermeidung einer Störung trägt zur Sicherheit und Verfügbarkeit einer Anlage bei.

Im engeren Sinn bedeutet Schutz bei Niederspannungsgeräten in Hauptstromkreisen

- Schutz der Komponenten des Stromkreises selbst und
- Schutz der Last

Er umfasst

- Schutz vor Überlastung und Übertemperaturen und
- Schutz vor den Folgen eines Kurzschlusses oder deren Begrenzung durch früh- und rechtzeitiges Abschalten, aber auch
- Erkennung sich anbahnender Störungen vor einer Schutzabschaltung wie z.B. Überlastung eines Antriebes, asymmetrische Speisung oder fehlender Fluss des Mediums bei Unterwasser-Pumpenmotoren.

Steht beim Thema Schutz auch die Vermeidung von Schäden im Vordergrund, so ist damit aber auch immer die Frage der Ausnutzung der Betriebsmittel verbunden. Schutzabschaltungen, bevor sie tatsächlich nötig sind, mögen zwar mit dem Sicherheitsziel vereinbar sein, bedeuten aber eine betriebliche Störung und können die Ausnutzung der Belastbarkeit von Betriebsmitteln verhindern. Schutzmassnahmen kommt in diesem Sinn stets auch eine wirtschaftliche Bedeutung zu und erhöhter Aufwand für hochwertigen Schutz kann aus dieser Sicht gerechtfertigt sein.

4.1 Schutzanforderungen

Die wesentlichen Schutzanforderungen in Niederspannungs-Anlagen sind

- Schutz vor elektrischem Schlag
- Schutz vor Überlast / Übertemperatur
- Schutz vor den Folgen von Kurz- und Erdschlüssen

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich im engeren Sinn auf Schutzfunktionen von Niederspannungs-Schaltgeräten gemäss IEC 60947.

4.1.1 Schutz vor elektrischem Schlag

Der Schutz vor elektrischem Schlag wird durch mehrstufige Massnahmen erzielt:

- Schutz gegen direkte Berührung
- Schutz bei indirekter Berührung
- Zusatzschutz

4.1.1.1 Schutz gegen direkte Berührung

Der Schutz gegen direkte Berührung spannungsführender Teile wird in elektrischen Anlagen durch die Kapselung erreicht. IEC 60439-1 verlangt für Schaltgerätekombinationen mindestens die Schutzart IP2X oder IPXXB. Schaltgerätekombinationen mit Zugang für Laien gemäss IEC 60439-3 müssen einen Schutzgrad von mindestens IP2XC aufweisen. Es sind stets die lokalen Vorschriften zu beachten.

Für die Schaltgeräte selbst bestehen in einigen Ländern Vorschriften bezüglich der Berührbarkeit von spannungsführenden Teilen. Dies hat zu einem Quasi-Standard für die Geräte geführt, die weitgehend die Schutzart IPXXB (fingersicher) aufweisen. Damit ist die Gefahr eines elektrischen Schlages durch direkte Berührung selbst bei Arbeiten in Schaltgerätekombinationen wesentlich reduziert. Bei Geräten mit grösseren Bemessungsströmen sind vielfach Abdeckungen zur Erreichung von IPXXB erforderlich.

4.1.1.2 Schutz bei indirekter Berührung

Der Schutz bei indirekter Berührung stellt sicher, dass auch im Fehlerfall – z.B. bei leitender Verbindung zwischen einem Polleiter und einem metallischen Teil – keine gefährlichen Berührungsspannungen entstehen ($\geq 50 \text{ V a.c.}$ oder $\geq 120 \text{ V d.c.}$) bzw. dass solche Spannungen in sehr kurzer Zeit abgeschaltet werden, bevor eine Personengefährdung entsteht. In der Regel wird dieser Schutz durch Erdungsmassnahmen und die Kurzschlusschutz-Einrichtungen wie Sicherungen, Leitungsschutzschalter oder Leistungsschalter gewährleistet, da die Fehlerströme in solchen Fällen gross werden.

Schutzkleinspannung (PELV) oder Sicherheitskleinspannung (SELV) gelten auch als geeignete Massnahmen zum Schutz bei indirekter (und direkter) Berührung. Sie werden vielfach in elektronischen Kreisen verwendet. Siehe auch Abschnitt 2.3.11.

Bei langen Leitungen zwischen dem Kurzschlusschutz-Organ und der Fehlerstelle kann der Fehlerstrom durch die Dämpfung der Leitung unter den Ansprechwert des Kurzschlussauslösers (z.B. eines Leistungsschalters für Motorschutz) sinken. Für fest installierte Verbraucher (z.B. Motor) gilt die Forderung, dass die Berührungsspannung (z.B. am Motorgehäuse) – falls grösser als 50 V a.c. (oder 120 V d.c.) – innerhalb von 5 Sekunden abgeschaltet wird. Um diese Bedingungen bei der Projektierung zu überprüfen, ist der Strom im Fehlerfall unter Einbezug aller Schleifenimpedanzen (incl. z.B. des Innenwiderstandes des Bimetallauslösers eines allfälligen Motorschutz-Leistungsschalters) zu errechnen und die zu erwartende Auslösezeit anhand der Überlastkennlinie des Schutzgerätes zu überprüfen (Fig. 4.1-1). Die Hersteller der Schutzgeräte bieten für solche Fälle Applikationsberatung.

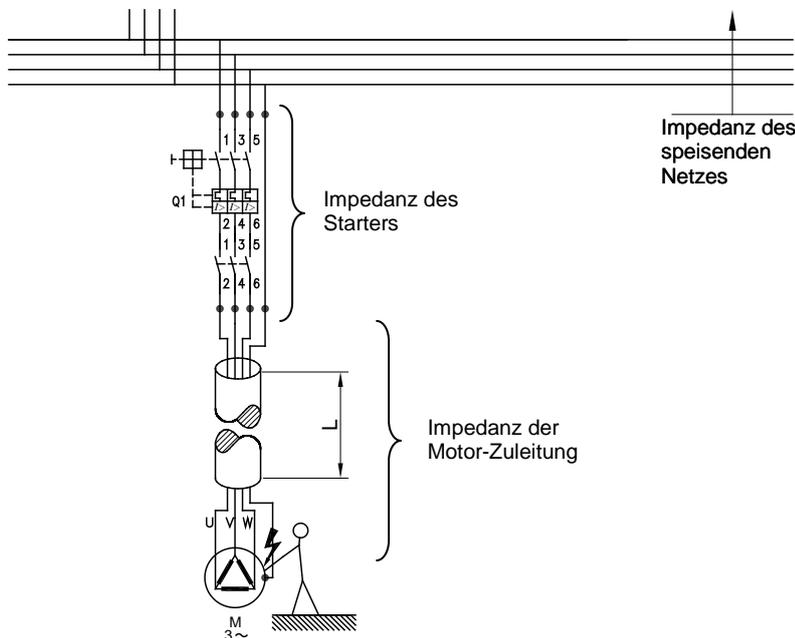


Fig. 4.1-1

Bei langen Leitungen zum Verbraucher kann aufgrund der im Stromkreis liegenden Impedanzen bei einem Kurzschluss am Verbraucher der Fehlerstrom unter den Ansprechwert des Kurzschlussauslösers sinken. Es muss dann sichergestellt sein, dass der thermische Auslöser den Fehler innerhalb 5 Sekunden abschaltet.

4.1.1.3 Zusatzschutz

Der Zusatzschutz stellt quasi das dritte Sicherheitsnetz bezüglich Schutz gegen elektrischen Schlag dar und bietet Schutz bei direktem und indirektem Berühren.

Fehlerstromschutzeinrichtungen mit Ansprechwerten ≤ 30 mA schalten Berührungsströme ab, bevor sie ein gefährliches Niveau für Personen erreichen.

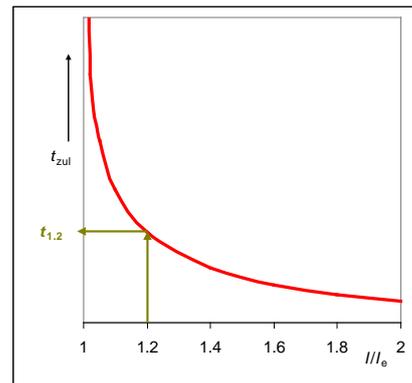
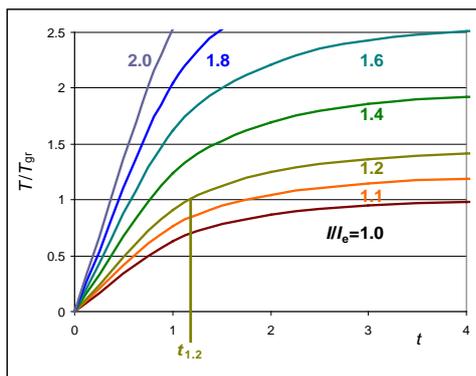
Potenzialausgleichsmassnahmen verringern die Spannung berührbarer Teile im Fehlerfall.

4.1.2 Schutz vor Überlast und Übertemperatur

Anlagenkomponenten können thermisch überlastet werden, wenn betriebsmässig auftretende Überströme zu lange anstehen. Dies kann auf Grund unerwarteter Überlastungen der Fall sein oder weil die Betriebsmittel, wie Motoren oder Leitungen, zu schwach bemessen sind. Überlastströme führen zu keiner unmittelbaren Gefährdung oder zu Sofort-Ausfällen. Sie erwärmen die Betriebsmittel aber über die Bemessungstemperaturen für Dauerbetrieb und verkürzen die Lebensdauer ihrer Isolation.

Je höher der Überlaststrom ist, umso rascher wird die zulässige Grenztemperatur erreicht und umso kürzer ist die zulässige Belastungszeit (Fig. 4.1-2 a). Trägt man die Zeiten der zulässigen Belastung in ein Strom-Zeit-Diagramm ein (Fig. 4.1-2 b), erhält man die zulässige Belastungskurve.

Aufgabe des Überlastschutzes ist, betriebsmässig auftretende Überströme zuzulassen, sie aber rechtzeitig auszuschalten, bevor die zulässige Belastungszeit überschritten wird.



a) Erwärmung bei Belastung mit Bemessungsstrom ($1.0 \cdot I_n$) und verschieden hohen Überströmen ($1.2 \cdot$, $1.5 \cdot$, $1.7 \cdot$, $2 \cdot I_n$)

b) Zulässige Belastungskurve

T_{gr} zulässige Bemessungstemperatur
 T Temperatur

t Zeit
 t_{zul} zulässige Belastungszeit

Fig. 4.1-2

Erwärmungsverlauf eines Körpers bei verschiedenen Belastungsverhältnissen und zulässige Belastung, wenn seine Grenztemperatur nicht überschritten wird

4.1.2.1 Unterschiedliche Belastungskurven verschiedener Betriebsmittel

Verschiedene Betriebsmittel wie Leitungen im Vergleich zu Motoren oder gleichartige Betriebsmittel verschiedener Bemessungsleistung weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Massen unterschiedliche Belastungskurven auf. So erreicht eine elektrische Leitung mit kleinem Querschnitt ihre Grenztemperatur viel rascher als ein grosser Motor mit kompakten Wicklungen, die in ein Eisenpaket eingelegt sind.

Diese Unterschiede sind auch für das Verhalten bei wechselnder Belastung von Bedeutung, wenn sich Erwärmungsphasen an Abkühlphasen reihen und die Endtemperatur einer Phase die Anfangstemperatur der nächsten Phase ist. Abweichungen in der Nachbildung des thermischen

Verhaltens des Schutzobjektes durch das Schutzgerät können sich so summieren und zu Frühauslösungen oder Nichterfüllung des Schutzes führen (Fig. 4.1-3).

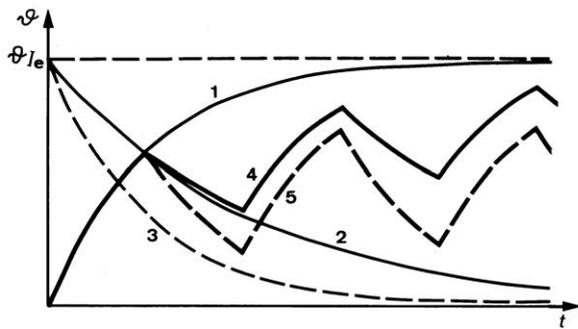


Fig. 4.1-3

Bei intermittierendem Betrieb selbstbelüfteter Motoren hinkt die nachgebildete Erwärmung eines Thermorelais hinter der tatsächlichen Motorerwärmung nach, weil sich die Abkühlung des stehenden Motors verlangsamt.

δ Temperatur

1 Erwärmungs-Charakteristik von Motor und Thermorelais

2 Abkühl-Charakteristik des Motors

3 Abkühl-Charakteristik des Thermorelais

4 Verlauf der Wicklungstemperatur im Motor

5 vom Thermorelais nachgebildeter Verlauf der Wicklungstemperatur

Aus dieser Verschiedenheit der Schutzanforderungen resultiert im Zusammenhang mit technischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit in praxi eine Typisierung von Schutzcharakteristiken und Schutzgeräten, die sich über eine grosse Zahl von Anwendungen und viele Jahrzehnte bewährt hat. Diese Standardisierung ist in den einschlägigen Normen festgehalten und bietet eine praktikable und wirtschaftliche Lösung ohne den Anspruch zu erheben, im Einzelfall massgeschneidert zu sein.

Daraus ergibt sich auch die Tatsache, dass verschiedenen Schutzgeräten verschiedene Anwendungsbereiche zuzuordnen sind. So sind Sicherungen geeignet für den thermischen (und Kurzschluss-) Schutz von Leitungen, nicht aber für den thermischen Schutz von Motoren.

4.1.2.2 Schutz im Dauerbetrieb und bei transienten Vorgängen

Primäre Schutzanforderung bezüglich des Überlast- / Übertemperaturschutzes ist die Vermeidung lang anstehender Überlastungen und Übertemperaturen, die zu beschleunigter Alterung und in der Folge zu vorzeitigem Ausfall der Isolation führen.

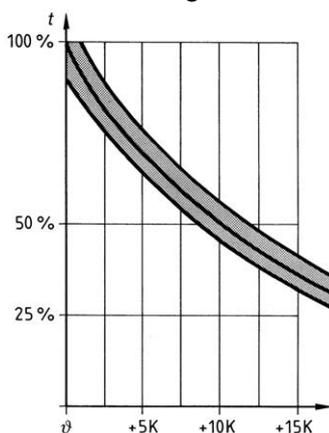


Fig. 4.1-4

Reduktion der durchschnittlichen Lebensdauer von Motorwicklungen bei Übertemperatur

Strommessende Schutzgeräte wie thermische (Bimetall-) oder elektronische Motorschutzgeräte tragen dieser Forderung durch Eichung des Auslösestromes für Dauerbetrieb (Grenzstrom) Rechnung. Der Auslösestrom kann dabei durch Einstellung an einer Skala dem Schutzobjekt

(Motor) angepasst werden. Entsprechend gibt es für den Schutz von Leitungen z.B. Sicherungen oder Leitungsschutzschalter mit definierten Bemessungsströmen, die den verfügbaren Leiterquerschnitten angepasst sind.

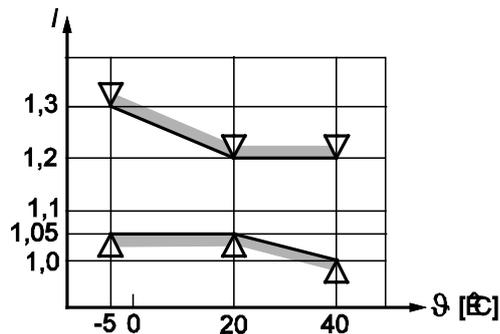


Fig. 4.1-5

Auslösegrenzen für temperaturkompensierte Überlastrelais für Motorschutz nach IEC 60947-4-1

I Überlast als Vielfaches des Stromeinstellwertes

θ Umgebungstemperatur

$\triangle \nabla$ Grenzwerte nach IEC 60947-4-1

Stromeinstellung

In der Regel ist das Motorschutzrelais auf den Bemessungsstrom I_n des Motors einzustellen, bei Stern-Dreieck-Schaltung auf $0.58 \cdot I_n$, weil die Messung in Serie zu den Motorwicklungen erfolgt.

Ist die Kühlmitteltemperatur über 40 °C , so ist die Leistung des Motors zu reduzieren und die Stromeinstellung am Motorschutzrelais anzupassen. Gibt der Motorenhersteller keine anderen Angaben vor, so können die Richtwerte von [Tab. 4.1-1](#) zur Korrektur dienen.

Kühlmitteltemperatur °C	30	35	40	45	50	55	60
Korrekturfaktor (k_1)	1.08	1.04	1	0.95	0.9	0.85	0.8

Tab. 4.1-1

Richtwerte für die Korrekturfaktoren für die Stromeinstellung ($k_1 \cdot I_n$) am Motorschutzrelais in Abhängigkeit von der Kühlmitteltemperatur des Motors

Bei Aufstellhöhen über 1000 m ü. M. verringert sich die zulässige Motorbelastung und damit auch die Einstellung am Motorschutzrelais. Gibt der Motorenhersteller keine anderen Angaben vor, so können die Richtwerte von [Tab. 4.1-2](#) zur Korrektur dienen. Treten abweichende Kühlmitteltemperaturen und gleichzeitig Betrieb in grösseren Höhen auf, so ist bei der Stromeinstellung am Motorschutzrelais das Produkt der beiden Faktoren zu berücksichtigen.

Aufstellhöhe m ü. M.	≤ 1000	1500	2000	2500	3000	3500
Korrekturfaktor (k_2)	1	0.97	0.94	0.90	0.86	0.82

Tab. 4.1-2

Richtwerte für die Korrekturfaktoren für die Stromeinstellung ($k_2 \cdot I_n$) am Motorschutzrelais in Abhängigkeit von der Aufstellhöhe des Motors

Transientes Verhalten

Die Abbildung des thermischen Verhaltens des Schutzobjektes bei transienter Belastung durch Strom messende Schutzgeräte ist stets näherungsweise und abhängig von der Komplexität des Schutzobjektes bezüglich Erwärmung und Abkühlung. So ist z.B. ein Bimetallrelais wesentlich einfacher aufgebaut als ein Motor und selbst komplexe elektronische Schutzgeräte bilden das Verhalten des Schutzobjektes nur näherungsweise nach. Diesem Umstand wird Rechnung

getragen, indem das Schutzgerät im Zweifelsfall rascher reagiert als es bezüglich Gefährdung des Schutzobjektes erforderlich wäre. Man liegt damit auf der sicheren Seite und „überschützt“ das Objekt mit der Konsequenz, dass dessen tatsächliche Belastbarkeit nicht ausgenutzt werden kann. Dies ist in den meisten Fällen auch nicht erforderlich.

Als Beispiel seien Motoranläufe genannt. Sie sind in der Regel so kurz, dass normale Schutzrelais der Klasse 10 oder 10A (Tab. 4.1-3) einsetzbar sind, obwohl Motoren meist längere Anlaufzeiten ohne weiteres zulassen.

Thermisches Gedächtnis von elektronischen Schutzrelais

Thermische Schutzrelais wie z.B. Bimetallrelais haben ein so genanntes „thermisches Gedächtnis“, das die Abkühlung der Motorwicklungen näherungsweise nachbildet. Nachdem Bimetallrelais keine Spannungsversorgung benötigen, ist das thermische Gedächtnis auch bei Spannungsausfall sicher gestellt. Das bedeutet, dass z.B. nach einem kurzen Spannungsausfall (und damit verbundener Motor-Abschaltung) die Bimetalle noch warm sind und den Motor bei einem nachfolgenden Anlauf vor thermischer Überlastung schützen.

Elektronische Schutzrelais bedürfen einer Spannungsversorgung, um zu funktionieren. Diese kann über Stromwandler aus der Messtrecke bezogen werden oder über ein Speiseteil, das z.B. an die Steuerspannungsversorgung angeschlossen ist. Elektronische Schutzrelais können so ausgeführt sein, dass sie über ein thermisches Gedächtnis verfügen oder beim Abschalten des zu schützenden Motors unmittelbar auf „kalt“ zurückstellen. Relais ohne thermisches Gedächtnis müssen vom Hersteller (am Gerät) als solche deklariert werden. Für Relais mit thermischem Gedächtnis schreibt IEC 60947-4-1 einen Test vor, der diesbezügliche Minimalanforderungen festlegt:

- Vorheizen mit I_e
- Abschalten des Stroms während $2 \cdot T_p$ (2-fache Zeit gemäss Auslöseklasse; z.B. 20 s bei Klasse 10)
- Belastung mit $7.2 \cdot I_e$
- Das Relais muss innerhalb 50 % von T_p auslösen (z.B. 5 s bei Klasse 10)

Motorschutz bei Schweranlauf

Während der Anlaufstrom eines Motors ($I_A \approx 4 \dots 8 I_n$) durch dessen konstruktive Gestaltung gegeben ist, hängt die Anlaufzeit t_A von der Belastung (Schwungmasse und Widerstandsmoment) ab. Gemäss Fig. 4.1-6 spricht man von Schweranlauf, wenn die Anlaufzeit - abhängig vom Anlaufstrom - einige Sekunden beträgt. Normale thermische Motorschutzrelais sind hier meist überfordert und lösen während des Anlaufs aus.

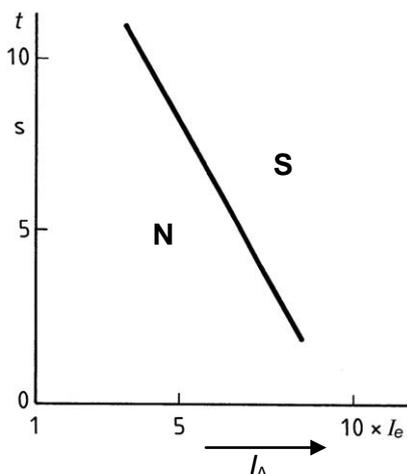


Fig. 4.1-6

Als Schweranlauf gelten Anlaufzeiten oberhalb der Grenzkurve (Richtwerte)

t = Anlaufzeit

I_A = Anlaufstrom ($\approx 4 \dots 8 I_n$)

N = Normale Anlaufbedingungen

S = Schweranlauf

IEC 60947-4-1 sieht verschiedene Auslöseklassen (**Tab. 4.1-3**) für Motorschutzrelais vor, um das Schutzgerät den Anlaufbedingungen anzupassen. Die Grenzwerte mit engerer Toleranz „E“ wurden für elektronische Schutzrelais eingeführt. Bei Schweranlaufbedingungen werden vorteilhaft elektronische Motorschutzgeräte eingesetzt, die auf die spezifischen Anlaufverhältnisse eingestellt werden können (siehe Abschnitt **4.2.4.2**). Lösungen mit thermischen Motorschutzrelais und Sättigungsstromwandlern, Überbrückung des Schutzrelais während des Anlaufs oder Einsatz eines separaten Schutzrelais für den Anlauf sind damit überholt.

Es ist zu beachten, dass bei Schweranläufen die Verdrahtung der Starterkomponenten und des Motors allenfalls mit einem grösseren Querschnitt auszuführen ist. So legt IEC 60947-4-1 in den Prüfbedingungen für Schutzrelais der Klassen 10, 20, 30 und 40 und für Schutzrelais, für die eine maximale Auslösezeit >40 s spezifiziert ist, fest, dass die Tests u.a. mit Leiterquerschnitten gemäss 125 % der Stromeinstellung am Relais durchgeführt werden müssen.

Auslöseklasse	Auslösezeit bei $7.2 \cdot I_e$ (normale Toleranz) s	Auslösezeit bei $7.2 \cdot I_e$ (engere Toleranz „E“) s
2	-	$T_p \leq 2$
3	-	$2 < T_p \leq 3$
5	-	$3 < T_p \leq 5$
10A	$2 < T_p \leq 10$	-
10	$4 < T_p \leq 10$	$5 < T_p \leq 10$
20	$6 < T_p \leq 20$	$10 < T_p \leq 20$
30	$9 < T_p \leq 30$	$20 < T_p \leq 30$
40	-	$30 < T_p \leq 40$

Tab. 4.1-3

Auslöseklassen von Überlastrelais gemäss IEC 60947-4-1 am 2. Die Kennziffer der Auslöseklasse steht für die längste zulässige Auslösezeit bei $7.2 \cdot I_e$ vom kalten Zustand aus.

Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Motorschutz in explosionsgefährdeten Bereichen

Die Motorschutzgeräte für den Schutz von Motoren der Schutzart „erhöhte Sicherheit“ EEx e müssen den Normen und Vorschriften gemäss Abschnitt **2.4.7** entsprechen. Die Motorschutzgeräte sind selbst nicht explosionsgeschützt und dürfen deshalb nicht in den gefährdeten Zonen installiert werden.

4.1.2.3 Überlast- und Übertemperaturschutz durch Messung des Stromes und durch Messung der Temperatur

Es ist nahe liegend, Übertemperaturen zu erkennen, indem man sie direkt misst. So werden alle Faktoren mit eingeschlossen, die die Temperatur am Messort beeinflussen – z. B. die Umgebungstemperatur, die vielfach in weiten Grenzen schwankt und von Strom erfassenden Schutzgeräten nicht berücksichtigt wird oder behinderte Kühlung. Bei Messung des Stromes erfolgt eine Simulation der Erwärmung und es wird eine Worst-Case Betrachtung bezüglich der Umgebungstemperatur durchgeführt. Man nimmt an, dass die Umgebungstemperatur des Schutzobjektes der maximal zulässigen Temperatur entspricht. Diese Referenztemperatur ist für Motoren gemäss IEC 60034 zu 40 °C bei Aufstellungshöhen bis 1000 m festgelegt.

Die Messung der Temperatur von Motorwicklungen mittels Temperaturfühlern (z.B. PTC) wird vielfach eingesetzt und hat sich sehr bewährt. Der Effekt der Messverzögerung bei sehr raschem Temperaturanstieg (z.B. bei blockiertem Motor) ist nur bei thermisch besonders kritischen Motoren (z.B. Unterwasser-Pumpenmotoren) oder grossen rotorkritischen Maschinen nachteilig (**Fig. 4.1-7**). Dennoch ist die Temperaturmessung nicht immer sinnvoll, möglich oder wenigstens sehr aufwendig. Bei rotorkritischen Motoren ist z.B. die Messwertübertragung vom Rotor auf den Stator sehr kostspielig. Leitungsschutz via Temperaturmessung ist aus verschiedenen Gründen kaum praktikabel.

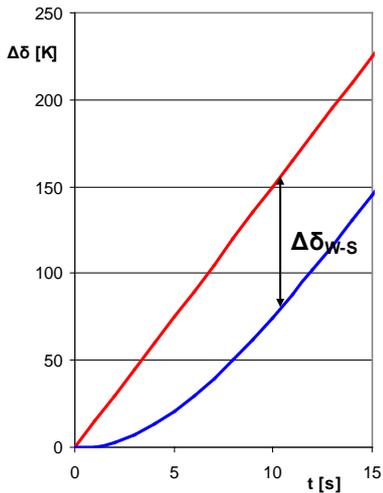


Fig. 4.1-7

Thermische Verzögerung eines in der Statorwicklung eingebauten PTC-Fühlers bei raschem Temperaturanstieg (z.B. blockierter Rotor)

$\Delta\delta$ = Temperaturdifferenz über der Kühlmitteltemperatur von 40 °C
 $\Delta\delta_{W-S}$ = Temperaturdifferenz Wicklung - Sensor
 t = Zeit in s

Die Messung des Belastungsstroms durch das Schutzgerät ist in der Mehrzahl der normalen Anwendungen bestens bewährt und wirtschaftlich, auch wenn die Ausnutzung der tatsächlichen Belastbarkeit der Betriebsmittel oft nicht bis an die Grenze möglich ist. Die Strommessung bietet gerade beim Schutz von Motoren die Möglichkeit für Funktionen, die über die Temperatur nicht erfassbar sind, weil der Strom wichtige Informationen über den Betriebs- und Gefährdungszustand des Motors umfasst. Temperaturmessung mittels in die Wicklung eingebauter Fühler wird meist komplementär eingesetzt.

4.1.2.4 Schutzfunktionen

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Funktionsweise bieten die verschiedenen Arten von Schutzgeräten verschiedene Funktionen und Eigenschaften. **Tab. 4.1-4** gibt einen Überblick über die wichtigsten Schutzfunktionen und deren Verfügbarkeit nach Technologie unter besonderer Berücksichtigung des Schutzes von Motoren.

Funktion	Strom-messend		Temperatur-messend	
	Bimetall	elektronisch	PTC-Fühler	lineare-Fühler
Schutz gegen Überlast und Übertemperatur im Dauerbetrieb	X	X	X	X
Schutz gegen Überlast und Übertemperatur bei besonderen (z.B. gestörten) Kühlbedingungen	---	---	X	X
Schutz gegen Überlast / Übertemperatur beim Anlauf	X incl. rotorkritische Maschinen	X incl. rotorkritische Maschinen	X ohne rotorkritische und thermisch sehr flinke Maschinen	X ohne rotorkritische und thermisch sehr flinke Maschinen
Schutz bei intermittierendem Betrieb	(X) abhängig von Betriebszyklen	X Relais mit Umschaltung auf Abkühlzeitkonstante	X ohne rotorkritische und thermisch sehr flinke Maschinen	X ohne rotorkritische und thermisch sehr flinke Maschinen
Blockierschutz	(X) via thermischen Schutz	X unverzögert	(X) via thermischen Schutz	(X) via thermischen Schutz
Anlaufzeit-Überwachung	(X) via thermischen Schutz	X	(X) via Temperatur	(X) via Temperatur
Unterlastschutz	---	X	---	---
Erdschlussschutz ¹⁾	---	X	---	---
Kurzschlussschutz ¹⁾	---	X	---	---
Phasenausfall-schutz	X beschleunigt	X kurzverzögert	X via Temperatur	X via Temperatur
Asymmetrieschutz	---	X	(X) via Temperatur	(X) via Temperatur
Erwärmungs-anzeige	---	X	---	X
Auslöse-Vorwarnung	---	X	(X) mit 2. Satz Fühler	X
Anzeige Zeit bis Auslösung	---	X	---	---
Anlaufverriegelung	---	X	(X) mit zusätzlichem Satz Fühler	X
Strom-Monitoring	---	X	---	---
Schutz von EExe-Motoren	X	X	X	X
Steuerung Umschaltung Y-D	---	X	---	---
Kommunikation	---	X	---	X
Einstellungen	Strom	Alle Parameter	---	Ansprech-temperatur(en)

Tab. 4.1-4

Übersicht über das Funktionsangebot von Schutzrelais mit Schwerpunkt Motorschutz

X verfügbar (ggfs als Option)

(X) bedingt oder mit Einschränkungen verfügbar

--- nicht verfügbar

¹⁾ Ausschaltung via Leistungsschalter

Nachstehend wird auf einzelne der angeführten Funktionen näher eingegangen

4.1.2.4.1 Schutz beim Anlauf, Anlaufzeitüberwachung, Anlaufverriegelung

Neben dem Schutz im Dauerbetrieb ist der Schutz beim Motoranlauf wegen der hohen Anlaufströme ein zentrales Bedürfnis. Ein Ansprechen des Schutzes vor Erreichen der Gefahrenlinie des Motors ist vorteilhaft, solange der betrieblich normale Anlauf nicht behindert wird. Im Störfall (z.B. Blockierung) würde der Motor nicht bis zur thermischen Grenze belastet und die Wartezeit zur Abkühlung des Motors nach Behebung der Störungsursache würde verkürzt. Temperatur messende Schutzeinrichtungen schalten in jedem Fall erst bei Erreichen der Ansprechtemperatur ab, während Strom messende Schutzgeräte je nach Auslösekennlinie (bei elektronischen Relais vielfach einstellbar) früher auslösen.

Elektronische Relais bieten die Möglichkeit einer Überwachung der Anlaufzeit. Der thermische Schutz kann in diesem Fall auf die Gefährdungsgrenze des Motors eingestellt werden, während die Anlaufzeitüberwachung warnt oder abschaltet, sollte der Motorstrom nicht in der erwarteten Zeit auf das Betriebsniveau gesunken sein.

Bei langen Anläufen, die die thermische Kapazität des Motors weitgehend ausnutzen, kann es erwünscht sein, einen Anlauf erst zuzulassen, wenn die erforderliche thermische Reserve gegeben ist. Eine solche Anlaufverriegelung kann mit elektronischen Relais realisiert werden, die über einen Ausgang verfügen, der die nachgebildete Erwärmung des Motors anzeigt, oder mit Temperatursensoren. Analogensensoren (z.B. Pt 100) bieten die Möglichkeit, die gewünschte Temperaturschwelle einzustellen, bei Sensoren mit fixer Ansprechschwelle (z.B. PTC) bedarf es eines zweiten Sensorsatzes mit der gewünschten Sprungtemperatur.

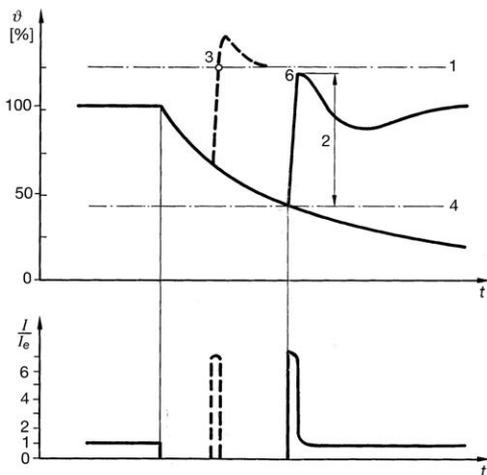


Fig. 4.1-8

Erfolgreiche Anläufe können verhindert werden, wenn Motorstarts erst bei ausreichender Erwärmungsreserve des Motors freigegeben werden.

- 1 Auslösetemperatur
- 2 Temperaturhub während eines Anlaufs
- 3 Bei zu hoher Wicklungstemperatur wird der Anlauf nicht frei gegeben, da er zur Auslösung führen würde
- 4 Temperaturschwelle, unter der Anläufe frei gegeben werden
- 6 Temperatur am Ende eines Anlaufs, der gerade nicht zur Auslösung führt

4.1.2.4.2 Asymmetrieschutz

Bei Speisung von Asynchronmotoren mit unsymmetrischer Spannung – mit dem Grenzfall des Ausfalls einer Phase – entsteht eine thermische Gefährdung wegen der sich einstellenden unterschiedlichen Wicklungsströme, die vom so genannten Gegensystem der speisenden Spannung hervorgerufen werden. Eine unsymmetrische Netzspannung enthält ein solches Gegensystem, das im Gegensinn zur symmetrischen Komponente, dem Mitsystem, dreht und damit relativ zum Rotor eines laufenden Motors eine Frequenz von etwa 100 Hz aufweist. Diese Spannungskomponente bewirkt im Rotor - und damit auch im Stator - einen vergleichsweise grossen Strom, analog den Verhältnissen beim Motoranlauf, wenn die 50-Hz-Netzspannung bei

stehendem Rotor den hohen Anlaufstrom bewirkt. Die Stromverdrängung im Rotor aufgrund der hohen Frequenz bewirkt stark erhöhte Verluste, die den Motor bereits bei verhältnismässig kleinen Spannungsunsymmetrien auf die Dauer thermisch gefährden können. Gemäss IEC 60034-1 basieren die Bemessungsdaten von Motoren auf max. 1 % Spannungs-Asymmetrie. Bei grösseren Unsymmetrien ist die Motorbelastung zu reduzieren (Fig. 4.1-9).

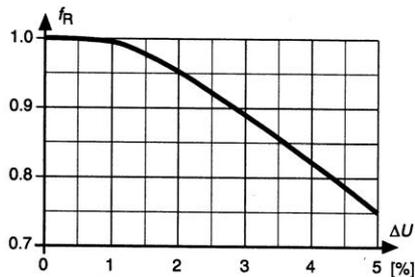


Fig. 4.1-9
Leistungsrückgang infolge Spannungsasymmetrie
 f_R Reduktionsfaktor für Motorleistung
 ΔU Spannungsasymmetrie [%]

4.1.2.4.3 Phasenausfallschutz

Motoren in Sternschaltung

Kleine bis mittelgrosse (ständerkritische) Motoren in Sternschaltung sind durch Phasenausfall allgemein nicht gefährdet. Gemäss Fig. 4.1-10 sind die Ströme in den Motorwicklungen im ungestörten wie auch im gestörten Betrieb beim Ausfall eines Polleiters gleich den Strömen in den Aussenleitern. Das Schutzgerät misst auch im gestörten Betrieb den durch die Wicklungen fliessenden Strom. In den beiden stromdurchflossenen Wicklungen entsteht wegen des zunehmenden Stroms bei gleich bleibender mechanischer Belastung des Motors wohl eine erhöhte Verlustleistung. Mit der dritten (stromlosen) Wicklung erfolgt jedoch ein Temperaturausgleich, so dass ein stromerfassendes Schutzgerät bei Überstrom rechtzeitig auslöst.

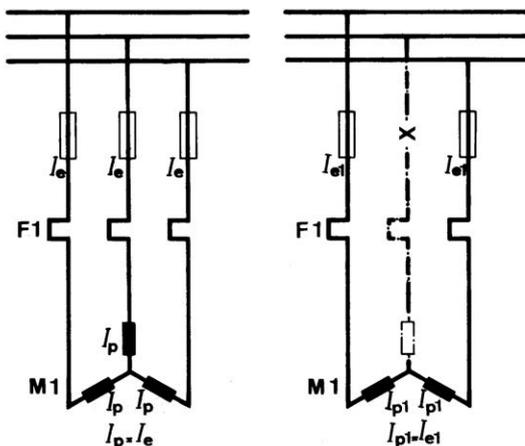


Fig. 4.1-10
Motor in Sternschaltung ungestört und bei Ausfall einer Phase

Motoren in Dreieckschaltung

In der Dreieckschaltung sind im ungestörten Betrieb die Wicklungsströme I_p um den Faktor $1/\sqrt{3} = 0.58$ kleiner als die Ströme I_e in den Aussenleitern. Bei Ausfall einer Phase (Fig. 4.1-11) steigt der Strom – unter der Annahme gleichbleibenden Stroms in den Aussenleitern ($I_{e1} = I_e$) - in einem Wicklungsstrang um etwa 15% an. In den beiden anderen, nun in Serie geschalteten Wicklungen, sinkt der Strom jedoch auf einen $1/\sqrt{3}$ mal kleineren Wert. Im Vergleich zum symmetrischen Betrieb misst das Schutzrelais für die zwischen den gesunden Phasen liegende Wicklung einen zu kleinen Strom, wodurch es zu einer thermischen Überlastung dieser Wicklung kommen kann ohne dass das Schutzgerät auslöst. Wärmeaustausch zwischen dieser

und den weniger Strom führenden Wicklungen verringert die Gefahr einer thermischen Überlastung bei kleinen Motoren bis etwa 10 kW.

In einer realen Anwendung bleibt die mechanische Belastung des Motors bei Ausfall einer Phase konstant. Da die elektrische Leistung nur mehr von zwei Polleitern bereit gestellt wird, werden der Strom in den beiden Aussenleitern (I_{e1}) und die Strangströme (I_{p1} , I_{p2}) im Vergleich zum oben beschriebenen Fall um einen Faktor grösser, der von der Belastung des Motors abhängt. Die Verhältnisse stellen sich wie in **Fig. 4.1-12** dargestellt ein.

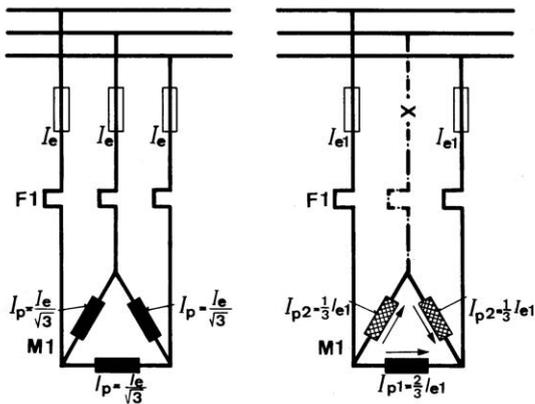


Fig. 4.1-11
Stromverteilung bei Motoren in Dreieckschaltung im ungestörten Betrieb und bei Ausfall einer Phase

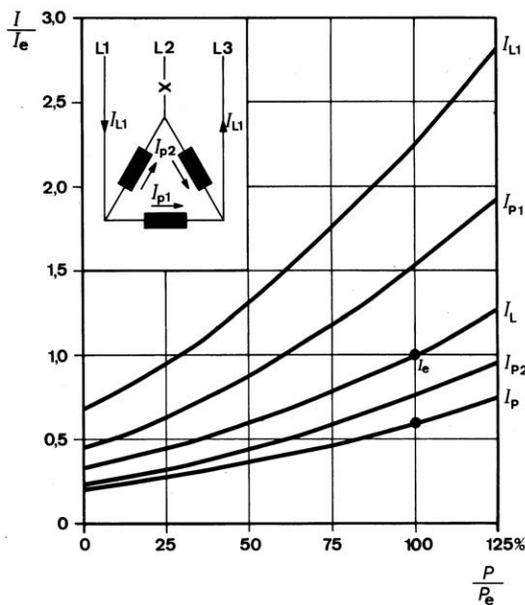


Fig. 4.1-12
Phasenausfall eines Motors in Dreieckschaltung. Stromfluss bei symmetrischer Speisung und bei Phasenausfall als Funktion der Belastung

IEC 60947-4-1 legt die Anforderungen an das Verhalten von Motorschutzgeräten bei Ausfall einer Phase fest (**Tab. 4.1-5**). Für hochwertigen Motorschutz sind Temperatur kompensierte Geräte mit Phasenausfallschutz die Regel.

Art des Überlastrelais	Vielfaches des eingestellten Stromes		Bezugs- Umgebungstemperatur
	A	B	
Thermisch, Umgebungstemperatur-kompensiert oder elektronisch Ohne Phasenausfall-empfindlichkeit	3 Pole 1.0	2 Pole 1.32 1 Pol 0	+20 °C
Thermisch, ohne Umgebungstemperatur-Kompensation Ohne Phasenausfall-empfindlichkeit	3 Pole 1.0	2 Pole 1.25 1 Pol 0	+40 °C
Thermisch, Umgebungstemperatur-kompensiert oder elektronisch Mit Phasenausfall-empfindlichkeit	2 Pole 1.0 1 Pol 0.9	2 Pole 1.15 1 Pol 0	+20 °C

Tab. 4.1-5

Auslösegrenzwerte 3-poliger Überlastrelais bei Phasenausfall gemäss IEC 60947-4-1 am 2

Spalte **A** Keine Auslösung innerhalb von 2 Stunden (vom kalten Zustand aus)

Spalte **B** Auslösung innerhalb von 2 Stunden in Anschluss an die Prüfung gemäss Spalte A

Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Schutzabschaltung bei Ausfall einer speisenden Phase ist erwünscht, um Motorschäden zu vermeiden und weil eine Weiterführung des normalen Betriebes ohnehin nicht möglich ist. Ein Motorstart bei Phasenausfall ist nicht möglich, weil Drehstrom-Asynchronmotoren bei Ausfall einer Phase im Stillstand kein Drehmoment entwickeln.

Phasenausfallschutz ist bei Strom messenden Schutzrelais weitgehend Standard. Die Auslösung erfolgt in der Regel beschleunigt (Bimetallrelais mit Phasenausfallempfindlichkeit) bis kurzverzögert (elektronische Relais). Komplexere elektronische Schutzrelais verfügen vielfach über einen empfindlichen Asymmetrieschutz, der die Gefährdung des Motors durch das Gegensystem berücksichtigt.

Schutzeinrichtungen mit Sensoren in den Wicklungen schützen gegen Übererwärmung der Wicklungen aufgrund von Phasenausfall und bedingt auch bei Asymmetrie. Da sie in den Statorwicklungen die Temperatur messen, können sie eine spezifische Gefährdung des Rotors nicht erkennen. Sie schalten jeweils erst bei Erreichen der Ansprechtemperatur ab.

4.1.2.4.4 Blockierschutz

In Anwendungen, in denen Antriebe aus dem normalen Betrieb heraus blockieren oder hoch überlastet werden können (z.B. Steinbrecher, Kalander), kann es erwünscht sein, vor einer thermischen Schutzauslösung beim Eintreten der hohen Überlast unverzüglich abzuschalten oder ein Warnsignal abzugeben. Dies zum Schutz von mechanischen Übertragungselementen oder zur frühzeitigen Behebung der Störung und der Vermeidung langer Wartezeiten nach einer allfälligen thermischen Schutzabschaltung.

Elektronische Relais messen den Motorstrom und bieten vielfach eine Blockierschutzfunktion mit einstellbarer Ansprechschwelle bezüglich Strom und Auslöseverzögerung. Um den Motoranlauf zu ermöglichen, wird der Blockierschutz erst nach dem Anlauf aktiviert.

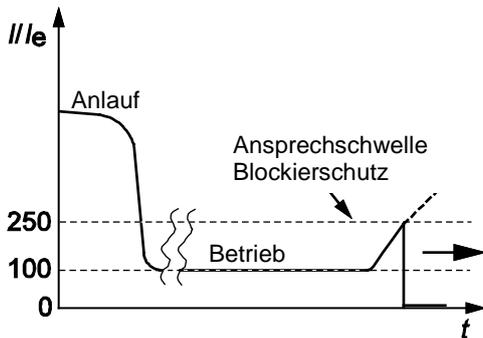


Fig. 4.1-13

Blockierschutz erkennt hohe Überlastungen und ermöglicht rasches Eingreifen oder schnelle Schutzabschaltung

4.1.2.4.5 Unterlastschutz

Motoren, die 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 Funktion des Unterlastschutzes überwacht die Stromaufnahme des Motors und hilft durch rasche Erkennung einer Unterlast, allfällige Störungen und Schäden gering zu halten.

4.1.2.4.6 Automatische Umschaltung beim Start

Die Überwachung der Stromaufnahme eines Motors auf Unterschreiten einer festgelegten Schwelle kann auch für eine automatische Steuerung der Anlaufumschaltung bei Stern-Dreieck-Startern oder bei Autotransformator-Startern genutzt werden. Das Relais erkennt an der Höhe des Stroms, wenn der Anlaufvorgang in der ersten Stufe beendet ist und leitet ohne Verzögerung die Umschaltung auf die zweite Anlaufstufe ein. So können Anläufe optimal kurz gehalten werden – auch bei sich ändernden Anlaufbedingungen.

4.1.2.4.7 Erdschlussschutz

Isolationsschäden an Motoren werden oft von hohen Spannungstößen verursacht. Die Quellen können Netzumschaltungen, Kondensatorentladungen, Geräte der Leistungselektronik und Blitzeinschläge sein. 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.

Die frühzeitige Erkennung und Schutzabschaltung eines Erdschlusses begrenzt das Ausmass des entstandenen Schadens und hilft, Ausfallzeiten und Reparaturkosten zu reduzieren.

Ein verhältnismässig einfach zu realisierender Erdschlussschutz misst die Nullstromkomponente der Stromwandler-Sekundärströme („Holmgreen“-Schaltung, [Fig. 4.1-14](#)). Wegen der Toleranzen der Stromwandler und des Einflusses der 3. Oberschwingung lässt sich damit eine Empfindlichkeit von bestenfalls 10% erreichen, typisch etwa 30%. Diese Methode ist damit auch auf die Anwendung in starr geerdeten Netzen beschränkt.

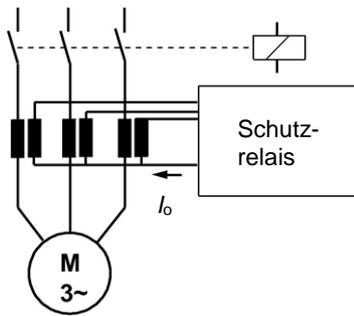


Fig. 4.1-14

Bei der Holmgreen-Schaltung wird der Strom I_0 in der gemeinsamen Rückleitung der Stromwandler gemessen. Wegen der Wandler-Ungenauigkeiten ist die Empfindlichkeit gering.

Höhere Empfindlichkeiten lassen sich mit externen Summenstromwandlern (Prinzip des Fehlerstrom-Schutzschalters, Fig. 4.1-15) erzielen.

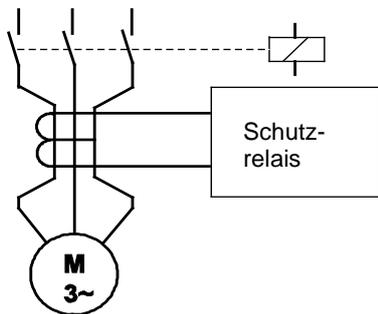


Fig. 4.1-15

Beim Summenstromwandler umfasst der Eisenkern wie bei einem Fehlerstrom-Schutzschalter alle zum Motor führenden Leiter. Damit sind hohe Erdschluss-Empfindlichkeiten erzielbar.

Die Abschaltung von Erdschlüssen soll über einen Leistungsschalter erfolgen, da Erdströme vielfach das Schaltvermögen von Schützen übersteigen. Bei Abschaltung durch das Motorschütz muss eine Schutzabschaltung bei Überschreiten des Schaltvermögens des Schützes vermieden werden (Inhibit). In diesem Fall übernimmt der vorgeschaltete Kurzschlusschutz die Abschaltung des Fehlerstroms.

4.1.2.5 Anzeige, Warn- und Steuerungsfunktionen

Elektronische Motorschutzrelais bieten über die Schutzfunktionen hinaus wertvolle Informationen zur Überwachung und einen optimalen Betrieb von Antriebsanlagen. Nachstehende Funktionen sind möglich:

- Anzeige des fließenden Motorstroms
- Anzeige von Überlastungen
- Anzeige des Erwärmungszustands des Motors
- Vorwarnung vor einer Schutzauslösung
- Angabe der Zeit bis zur Schutzauslösung (bei gleich bleibender Belastung)
- Steuerung der Antriebsbelastung (z.B. Steinbrecher, Kalanders) auf optimale Motortemperatur und damit maximale Produktion
- Anzeige der erforderlichen Abkühlzeit bis zum nächsten Anlauf
- Umschaltung von Stern auf Dreieck sofort nach Absinken des Anlaufstroms
- Schließen des Bypasses von Pumpen oder Ventilatoren sofort nach dem Anlauf
- etc.

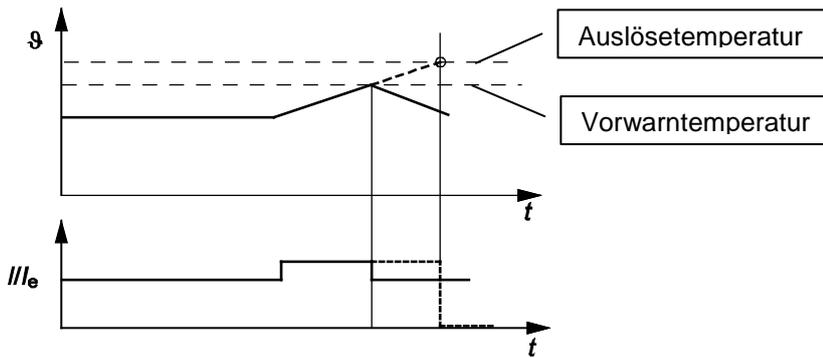


Fig. 4.1-16

Vorwarnung ermöglicht Behebung einer Störung vor Schutzabschaltung

Die Möglichkeiten sind vielfältig und erweitern die Funktion des Schutzgerätes zur integrierten Komponente für eine optimale Betriebsführung. Eine Einbindung in das Kommunikationsnetzwerk von Steuerungssystemen unterstützt die Integration und Minimierung des Aufwandes.

4.1.3 Schutz vor hohen Überströmen, Kurzschlusschutz

Siehe auch Abschnitt 2.3.4.

4.1.3.1 Definition und Charakteristik eines Kurzschlusses

Unter einem Kurzschluss versteht man gemäss IEC 60947-1 eine leitende Verbindung zwischen zwei oder mehreren leitfähigen Teilen, die die Potenzialdifferenz zwischen diesen leitfähigen Teilen zu null oder beinahe null macht. Im Sinne dieses Abschnitts soll unter einem Kurzschluss eine Verbindung mit sehr niedriger Impedanz zwischen einem Polleiter und einem zweiten Polleiter, dem Nullleiter oder dem Schutzleiter oder Erde unter Umgehung der Lastimpedanz verstanden werden, die zur Ausbildung eines sehr hohen Überstroms (d.h. > Überlaststrom des Stromkreises) führt.

Der Verlauf und die Höhe des Kurzschlussstroms in einem Stromkreis sind durch die Impedanzen der Komponenten und Elemente im Stromkreis gegeben. Diese sind:

- Impedanz des speisenden Netzes (Transformator, Anschlussleitung)
- Impedanzen von Verbindungsstellen, allfälligen Komponenten (z.B. Sicherungen, Hauptschalter, Leistungsschalter) und Leitungen im Stromkreis
- Impedanz der Fehlerstelle (vielfach Lichtbogen)

Die Höhe des prospektiven Kurzschlussstroms (symmetrische Komponente) ergibt sich aus der treibenden Spannung und den Impedanzen des Kurzschlusskreises. Für eine Abschätzung ist es nützlich, den Kurzschlussstrom des speisenden Transformators und die Dämpfung des Kurzschlussstroms durch die Leitungen bis zur Fehlerstelle zu ermitteln. Für den Kurzschlussstrom des Transformators bei Klemmenkurzschluss sekundär gilt näherungsweise:

$$I_{ccT2} = I_{2e} \cdot 1/u_k = (P_T / (U_{2e} \cdot \sqrt{3})) \cdot 1/u_k$$

I_{ccT2} prospektiver Kurzschlussstrom sekundär (Effektivwert)

I_{2e} Bemessungs-Sekundärstrom

u_k Kurzschlussspannung

P_T Nennleistung des Transformators

U_{2e} Bemessungs-Sekundärspannung (Pol-Pol)

Für die Abschätzung der Dämpfung des Kurzschlussstroms durch Leitungen siehe RALVET [13].

Laufen grosse Motoren an einem Netz, so ist auch deren Beitrag zum Gesamt-Kurzschlussstrom zu berücksichtigen. Näherungsweise kann deren Anzugsstrom dafür eingesetzt werden.

Wegen des Fehlens einer Lastimpedanz im Kurzschlussstromkreis sind Kurzschlussströme stark induktiv. Dies wirkt sich auf den Scheitelwert des unbeeinflussten Kurzschlussstroms aus,

da je nach Zeitpunkt des Auftretens eines Kurzschlusses innerhalb einer Netzhalbwelle ein mehr oder weniger starkes Überschwingen (Stosskurzschlussstrom) entsteht (Fig. 4.1-17).

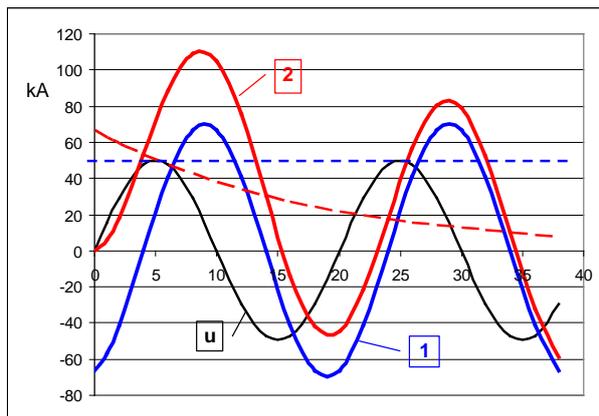


Fig. 4.1-17

Je nach Zeitpunkt des Auftretens eines Kurzschlusses entsteht wegen der Induktivität des Kurzschlussstromkreises ein Überschwingen des Kurzschlussstroms und damit eine hohe erste Stromspitze.

- 1 Verlauf des symmetrischen Kurzschlussstroms (als Beispiel 50 kA_{eff})
- 2 Verlauf des Stroms bei Einschalten im Spannungsnulldurchgang (ungünstigster Zeitpunkt)
- u Verlauf der treibenden Spannung

Diesem Überschwingen wird in den Prüfvorschriften mit Überschwingfaktoren Rechnung getragen, die bei der Auslegung von Schaltgerätekombinationen bezüglich der Kurzschlussfestigkeit der Anlagen und von Kurzschluss-Schaltgeräten bezüglich deren Einschaltvermögen zu berücksichtigen sind. Die Faktoren sind abhängig von der Stärke des speisenden Netzes und damit nach Höhe des prospektiven Kurzschlussstroms gestuft (Tab. 4.1-6).

Effektivwert des prospektiven Kurzschlussstroms [kA]	cos φ	Faktor n
$I \geq 5$	0.7	1.5
$5 < I \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I \leq 20$	0.3	2.0
$20 < I \leq 50$	0.25	2.1
$50 < I$	0.2	2.2

Tab. 4.1-6

Standardwerte für den Faktor n gemäss IEC 60439-1 für die Auslegung der elektrodynamischen Kurzschlussfestigkeit von Schaltgerätekombinationen. Der Effektivwert des prospektiven Kurzschlussstroms ist mit dem Faktor n zu multiplizieren, um den Scheitelwert des Stoss-Kurzschlussstroms zu ermitteln.

4.1.3.2 Wirkungen und Gefährdungen bei Kurzschlüssen

Die hohen Ströme bei Kurzschlüssen beanspruchen die Komponenten im Kurzschlussstromkreis durch hohe dynamische Kräfte und durch starke Wärmeentwicklung in den stromdurchflossenen Teilen.

Die Kraftwirkung ist proportional zum Quadrat des fließenden Stroms. Deshalb kommt dem Scheitelwert des Kurzschlussstroms hohe Bedeutung zu. Auch die Wärmeentwicklung ist proportional zum Stromquadrat.

Meist entsteht am Ort des Kurzschlusses ein Störlichtbogen, der zu ernsthafter Gefährdung von Personen durch Verbrennungen, Verblindung und elektrischen Schlag führen kann sowie auch zur Beschädigung oder Zerstörung von Anlagenteilen.

4.1.3.3 Schutzanforderungen

4.1.3.3.1 Schaltvermögen

Die wohl wichtigste Forderung an ein Kurzschluss-Schutzorgan ist ein ausreichendes Schaltvermögen, das den Fehlerstrom mit Sicherheit beherrscht. Durch den Projektierenden und Anwender ist sicher zu stellen, dass das Schaltvermögen I_{cu} bzw. I_{cc} des Kurzschlusschutz-Gerätes bzw. der Gerätekombination (z.B. Leistungsschalter und Schütz) bei der vorliegenden Betriebsspannung gleich oder grösser ist als der grösste am Einbauort auftretende (prospektive) Kurzschlussstrom. Bezugsgrösse für die Dimensionierung ist dabei der symmetrische Wert. Während es bei Sicherungen naturgemäss nur um das Abschaltvermögen geht, müssen Leistungsschalter auch ein entsprechendes Einschaltvermögen aufweisen, da sie gegebenenfalls auf einen bestehenden Kurzschluss einschalten. Dieses wird durch die Prüfsequenzen sichergestellt.

Bei Leistungsschaltern ist zwischen dem Grenz-Kurzschlusschaltvermögen und dem Betriebs-Kurzschlusschaltvermögen zu unterscheiden, die sich in der Weiterverwendbarkeit nach einem Kurzschluss unterscheiden. Siehe Abschnitt 4.2.2.3.3.

4.1.3.3.2 Strombegrenzung

Aufgrund des Gefahrenpotenzials von Kurzschlüssen ist es erwünscht, sie rasch zu erkennen und – möglichst im Entstehen (Fig. 4.1-18) – abzuschalten. Dadurch soll die gefährdende und zerstörende Energie auf ein Minimum reduziert und das Schadensausmass in Grenzen gehalten werden. Je geringer der Schaden durch das Kurzschlussereignis ist, desto geringer werden die Instandsetzungskosten, die Betriebsunterbrechung und in Folge ein allfälliger Produktionsausfall. Moderne Leistungsschalter und Sicherungen weisen stark strombegrenzende Eigenschaften auf.

IEC 60439 (Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen) trägt diesen Zusammenhängen Rechnung, indem auf einen Nachweis der Kurzschlussfestigkeit verzichtet wird, wenn der symmetrische Kurzschlussstrom ≤ 10 kA ist oder der Durchlassstrom $I_D \leq 17$ kA.

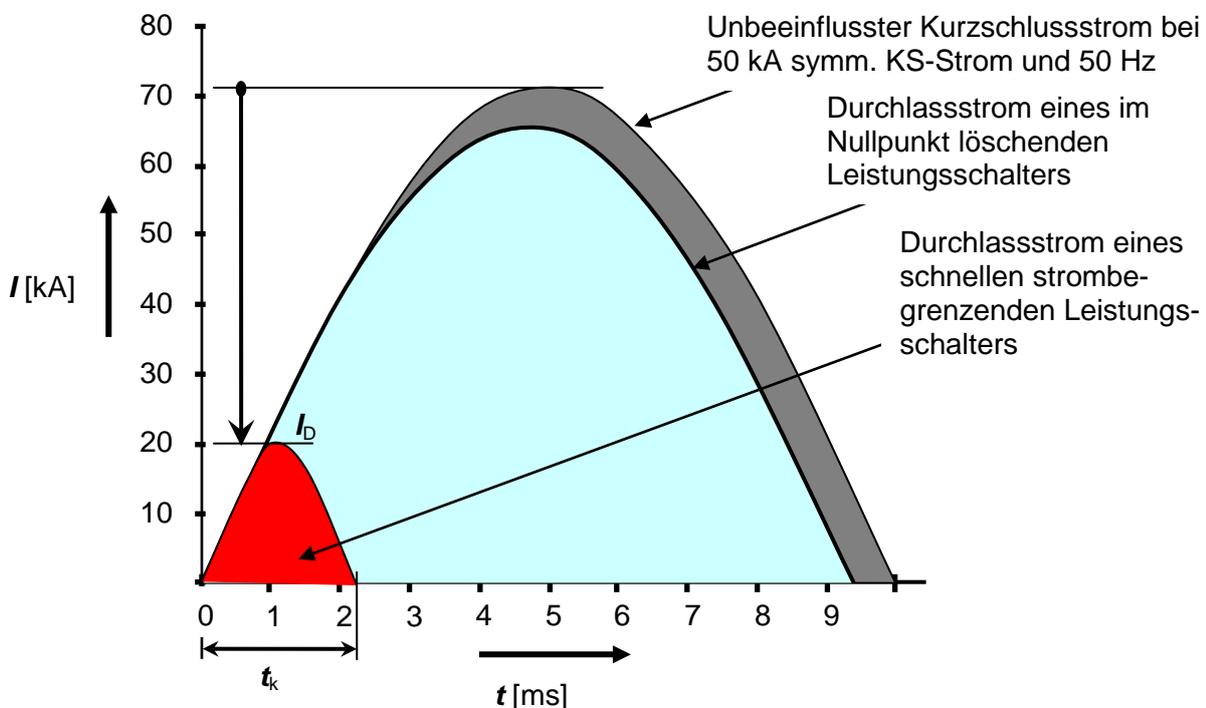


Fig. 4.1-18

Strombegrenzende Leistungsschalter oder Sicherungen begrenzen den Fehlerstrom und reduzieren damit die mechanische und thermische Beanspruchung im Fehlerfall

I_D Durchlassstrom

t_k Gesamte Abschaltzeit

4.1.3.3.3 Selektivität

Aus Sicht der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit einer gesamten Niederspannungsanlage ist es meist erwünscht, den von einem Kurzschluss betroffenen Anlagenteil gezielt abzuschalten, um eine Ausbreitung der Störung zu vermeiden. Durch Selektivität soll erreicht werden, dass die Schutzabschaltung möglichst Fehler nah erfolgt, um nicht betroffene Anlagenteile ungestört weiter betreiben zu können. Dies ist vielfach auch aus Sicherheits-Gründen erwünscht und in IEC 60439-1 (Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen) für Anlagen angesprochen, die eine hohe Kontinuität der Stromversorgung bedingen.

In Gebäude- und Industrieanlagen stellen strahlenförmige Verteilnetze den Normalfall dar. Im Strahlennetz liegen mehrere Schutzgeräte in Reihe, in der Regel mit abnehmender Bemessungsstromstärke von der Einspeisung zur Last. Während die Betriebsströme von der Einspeisung zur Last abnehmen, werden alle in Reihe liegenden Schutzgeräte bei einem Kurzschluss vom gleichen Fehlerstrom durchflossen. Durch eine Staffelung der Auslösekennlinien muss erreicht werden, dass jeweils nur das fehler nächste Schutzgerät anspricht und damit die Störung selektiv auf den kleinstmöglichen Anlagenteil beschränkt bleibt.

Grundvoraussetzung für Selektivität in Reihe liegender Schutzgeräte ist, dass die Auslösekennlinie des nachgeschalteten (Last näheren) Schutzgerätes flinker ist als jene des vorgeschalteten. Und zwar unter Einbezug aller Toleranzen und über den gesamten Strombereich bis zum grössten zu erwartenden (prospektiven) Kurzschlussstrom.

Besonders zu beachten ist dabei der Bereich hoher Überströme, wenn Effekte von Strombegrenzung und Abschaltzeiten von Bedeutung sind. So spricht eine vorgeschaltete Sicherung nur dann nicht an, wenn das Gesamt- I^2t des nachgeschalteten Schutzgerätes (Sicherung, Leistungsschalter) kleiner ist als das Schmelz- I^2t der Sicherung. Ein vorgeschalteter Leistungsschalter spricht dagegen nur dann nicht an, wenn der maximale Durchlassstrom I_D des nachgeschalteten Schutzgerätes kleiner ist als der Ansprechwert seines Magnetauslösers.

Im Einzelfall ist zur korrekten Geräteauswahl für Selektivität der Beizug der Hersteller-Unterlagen und vielfach die technische Unterstützung des Herstellers erforderlich. Nachstehend sind die grundsätzlichen Verhältnisse dargestellt.

Selektivität in Reihe liegender Sicherungen

In Reihe liegende Sicherungen verhalten sich selektiv, wenn ihre Zeit-Strom-Kennlinien ausreichenden Abstand voneinander haben und sich ihre Streubänder nicht berühren (Fig. 4.1-19).

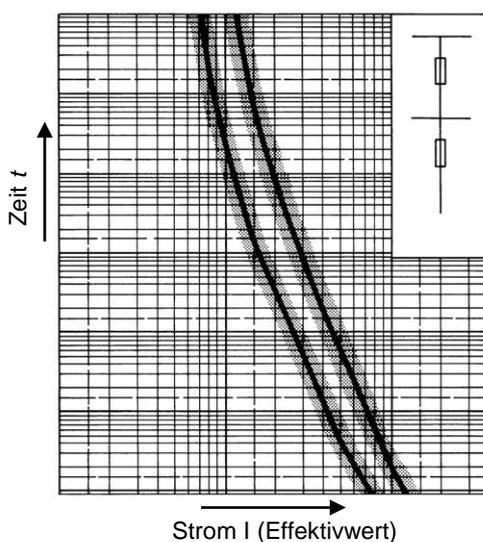


Fig. 4.1-19
Selektivität in Reihe liegender Sicherungen

Bei hohen Kurzschlussströmen muss der Schmelz- I^2t -Wert der Vorsicherung grösser als der Ausschalt- I^2t -Wert (Schmelz- und Löszeit) der kleineren nachgeordneten Sicherung sein.

Dies ist in der Regel der Fall, wenn sich ihre Bemessungsströme um den Faktor 1,6 oder mehr unterscheiden.

Selektivität in Reihe liegender Leistungsschalter

Stromselektivität

In Verteilungen werden die Nennstromstärken der Verteilerschalter vom Transformator zum Verbraucher hin immer kleiner. Da die Kurzschlussauslöser normal bei einem Vielfachen des Bemessungsstroms ansprechen, nehmen auch deren Ansprechwerte im gleichen Sinne mit der Entfernung von der Einspeisung ab. Da auch die prospektiven Kurzschlussströme mit der Entfernung vom Einspeisepunkt durch die Leitungsdämpfung kleiner werden, kann sich eine so genannte natürliche Selektivität über die Stromhöhe ergeben. Das heisst, dass der maximale Kurzschlussstrom bei einem Kurzschluss lastseitig des Schalters 2 (Fig. 4.1-20) unter dem Ansprechwert des Magnetauslösers des Schalters 1 liegt. Die Kurzschlussströme an den Einbaustellen der Schalter müssen bekannt sein

Bei Kurzschlussströmen über dem Ansprechwert des Magnetauslösers des vorgeschalteten Leistungsschalters ist in der Regel Selektivität nicht gewährleistet.

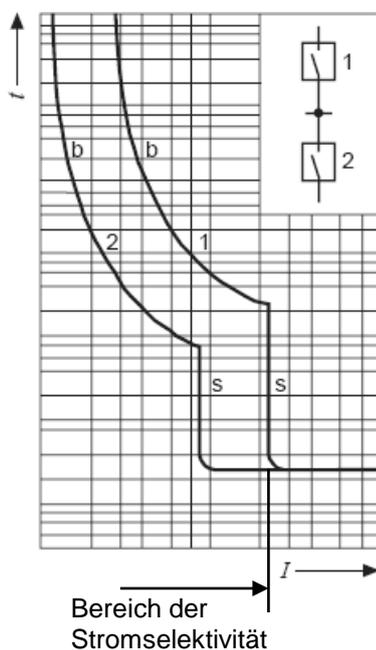


Fig. 4.1-20

Stromselektivität zweier Leistungsschalter in Reihe besteht, wenn der prospektive Kurzschlussstrom hinter dem Leistungsschalter 2 kleiner ist als der Ansprechwert des Magnetauslösers des Schalters 1

b = Überlastauslöser

s = Kurzschlussauslöser

Bei der Beurteilung der Stromselektivität ist die Toleranz der Kurzschlussauslöser (+/-20 % gemäss IEC 60947-2) zu berücksichtigen.

Zeitselektivität

Ist Stromselektivität zwischen Leistungsschaltern nicht möglich, muss die Selektivität durch Staffelung der Auslösezeiten erreicht werden, d.h. die Ansprechzeit des vorgeschalteten Leistungsschalters wird kurz verzögert, um dem nachgeschalteten Leistungsschalter Zeit zu geben, den Kurzschluss abzuschalten. Liegt der Kurzschluss zwischen den beiden Schaltern, dann bleibt er während der kurzen Auslöse-Verzögerungszeit des Schalters 1 bestehen und wird nach Ablauf dieser Zeit von diesem abgeschaltet (Fig. 4.1-21).

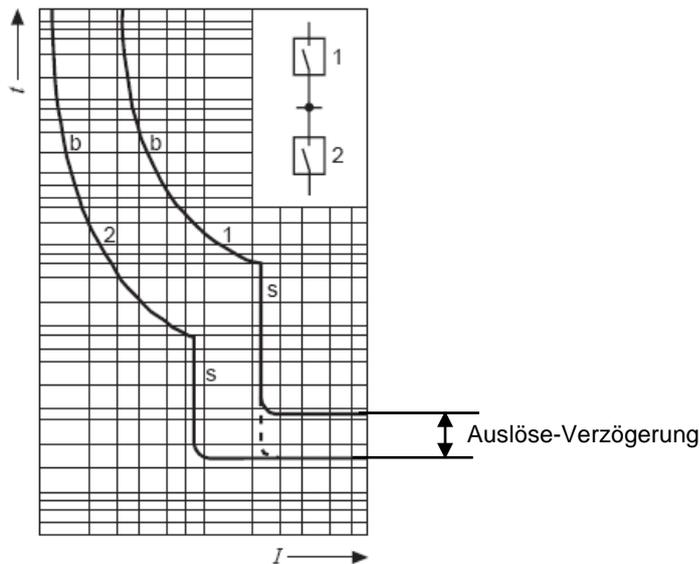


Fig. 4.1-21

Zeitselektivität zweier Leistungsschalter in Reihe

b = Überlastauslöser

s = Kurzschlussauslöser (Schalter 1 mit Kurzzeit-Verzögerung; Gebrauchskategorie B)

Die zeitliche Staffelung der Auslösezeiten bedingt, dass der Schalter 1 in der Lage ist, während der Zeit der Auslöseverzögerung den Kurzschlussstrom zu tragen. Dies ist beim Einsatz von Leistungsschaltern der Gebrauchskategorie B der Fall. Die massgebende Kenngrösse ist der Bemessungs-Kurzzeitstrom I_{cw} , der die Höhe des zulässigen Kurzzeitstroms während einer definierten Zeitdauer angibt. Er wird meist als 1s-Strom angegeben und kann für andere Zeiten mit $I^2 t = \text{const.}$ umgerechnet werden (siehe auch Abschnitt 2.3.4.3).

Selektivität zwischen Sicherung und nachgeordnetem Leistungsschalter

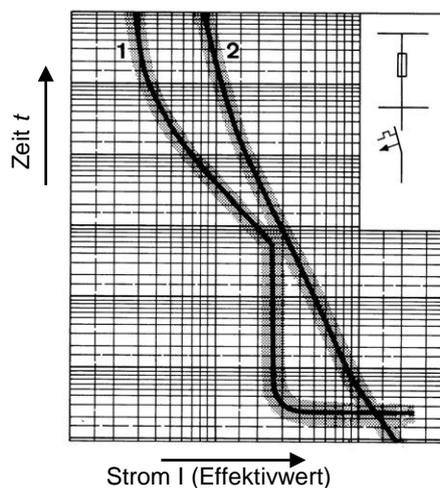


Fig. 4.1-22

Selektivität zwischen Sicherung und nachgeordnetem Leistungsschalter

1 = Leistungsschalter

2 = Sicherung

Im Überlastbereich ist Selektivität gegeben, wenn die Auslösekennlinie des Überlastauslösers unterhalb der Kennlinie der Sicherung liegt (einschliesslich Berücksichtigung der Streubänder). Im Kurzschlussbereich ist so weit Selektivität gegeben, wie die Gesamt-Abschaltzeit (incl. Löszeit) des Leistungsschalters unter der Schmelzkennlinie der Sicherung liegt.

Selektivität zwischen Leistungsschalter und nachgeordneter Sicherung

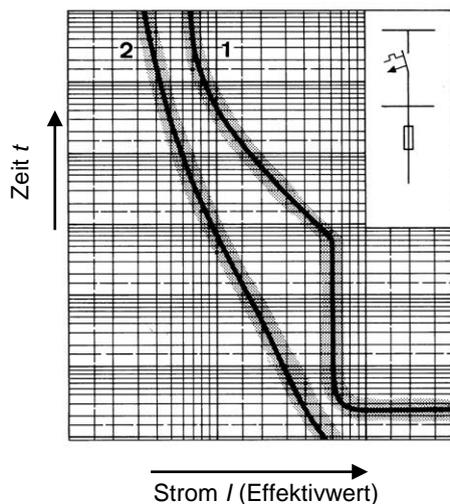


Fig. 4.1-23

Selektivität zwischen Leistungsschalter und nachgeordneter Sicherung

1 = Leistungsschalter

2 = Sicherung

Selektivität im Ansprechbereich des Kurzschlussauslösers des Leistungsschalters ist gegeben, wenn der Durchlassstrom der Sicherung kleiner ist als dessen Ansprechwert.

Selektivität und Unterspannung

Bei einem Kurzschluss bricht an der Kurzschlussstelle die Netzspannung zusammen. Die Höhe der verbleibenden Spannung hängt von der Impedanz der Fehlerstelle ab. Bei Auftreten eines Störlichtbogens liegt die Spannung bei etwa 30V bis 70V.

Da der Kurzschlussstrom über die gesamte Leitungsstrecke bis zur Energiequelle fließt, entsteht entlang dieser Strecke eine Spannungsabsenkung nach Massgabe der dazwischen liegenden Impedanzen. Alle angeschlossenen elektrischen Verbraucher sind von der Spannungsabsenkung betroffen, je näher der Fehlerstelle umso mehr. Geräte wie Schütze oder Unterspannungsauslöser von Leistungsschaltern können je nach Höhe und Dauer der Absenkung abfallen.

Um Betriebskontinuität zu gewährleisten, sind geeignete Abfallverzögerungen oder Wiedereinschalt-Einrichtungen vorzusehen. Bei Abschaltung von Kurzschlüssen durch Strom begrenzende Leistungsschalter sind die Spannungseinbrüche so kurz, dass mit keinen Störungen zu rechnen ist.

4.1.3.3.4 Kurzschluss-Koordination

Die Kurzschluss-Koordination bestimmt das Schadensausmass und die Konsequenzen bezüglich Betriebsunterbrechung als Folge eines Kurzschlusses für Motorstarter und Lastabgänge.

Siehe Abschnitt [2.3.4.5.2](#).

4.2 Schutzgeräte

4.2.1 Sicherungen

Schmelzsicherungen als die ältesten Schutzeinrichtungen in der Elektrotechnik haben immer noch ein weites Anwendungsgebiet, obwohl Leistungsschalter im Anlagenbau stetig an Bedeutung gewinnen und Sicherungen verdrängen.

4.2.1.1 Wirkungsweise

Der Schutz durch Sicherungen beruht auf dem Prinzip, ein Stück elektrischen Leiter durchschmelzen zu lassen, sozusagen als Sollbruchstelle in einem Stromkreis. Hierfür ist eine bestimmte Stromwärme erforderlich. Ganzbereichs-Sicherungen verfügen über eine Lot-

Verbindungsstelle, die im Bereich kleiner Überströme die Sollbruchstelle darstellt und eine Engstelle des Leiters, die bei hohen Überströmen (Kurzschlussströmen) durch den Stromwärmepuls $\int I^2 dt$ öffnet und den Stromkreis unterbricht. Teilbereichs-Sicherungen sind ausschliesslich für den Kurzschlussschutz vorgesehen.

4.2.1.1.1 Strombegrenzung

Durchlassstrom

Sicherungen schalten bei sehr hohen Strömen so rasch ab, dass der Stromkreis unterbrochen wird, bevor der Kurzschlussstrom seine unbeeinflusste Höhe erreicht. Der höchste Augenblickswert des Stroms, der während des Ausschaltvorgangs erreicht wird, wird als Durchlassstrom I_D bezeichnet. Die Strombegrenzung wird anhand von Durchlassstrom-Diagrammen angegeben (Fig. 4.2-1). Diese geben den Scheitelwert des durchgelassenen Stroms in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom an.

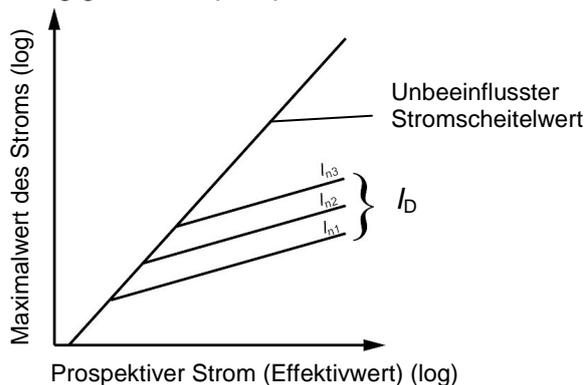


Fig. 4.2-1

Durchlassstrom-Diagramm von Sicherungen

I_{n1}, I_{n2}, I_{n3} = Bemessungsströme von Sicherungen

I_D = max. Durchlassstrom

Durchlass - $\int I^2 \cdot t$ -Wert

Der $\int I^2 \cdot t$ -Wert (korrekt $\int I^2 \cdot dt$) repräsentiert die von der Sicherung durchgelassene Wärmeenergie, die den Stromkreis bis zur Fehlerstelle belastet. Die zerstörende Wirkung eines Kurzschlusses ist umso geringer je niedriger der durchgelassene Strom (je besser die Strombegrenzung) ist und je schneller dieser abgeschaltet wird, d.h. je kleiner der $\int I^2 \cdot t$ -Wert ist.

Man unterscheidet zwischen $\int I^2 \cdot t$ -Werten, die bis zum Schmelzen (Schmelz- $\int I^2 \cdot t$) und jenen, die bis zum Löschen des Lichtbogens (Gesamt- $\int I^2 \cdot t$) der Sicherung auftreten. Erst bei grossen Kurzschlussströmen bzw. bei Gesamtausschaltzeiten, die kleiner als eine Stromhalbwelle sind, differieren die beiden Werte stark. Die $\int I^2 \cdot t$ -Werte der Sicherungen sind massgebend für die Selektivität von Sicherungen untereinander bei hohen Strömen.

4.2.1.1.2 Ausschaltvermögen

Die wirksame Strombegrenzung und das damit verbundene sehr hohe Ausschaltvermögen sind spezifische Eigenschaften von Sicherungen, die ihnen in gewissen Anwendungsbereichen der Kurzschlussschutztechnik und bei hohen Betriebsspannungen ihren Platz sichern.

4.2.1.2 Vorschriften und Gebrauchskategorien

Um die Schmelzsicherungen den jeweiligen Bedarfsfällen anzupassen, sind unterschiedliche Typen mit verschiedenen Strom-Zeit-Kennlinien entwickelt worden. Parameter und Prüfungen sind in diversen Vorschriften festgelegt. Die für Sicherungen massgebenden Vorschriften sind IEC 60269 – 1 (Allgemeine Anforderungen)

IEC 60269 – 2 (Sicherungen bestimmt für die Bedienung durch Fachpersonal)

IEC 60269 – 3 (Sicherungen bestimmt für die Bedienung durch Laien)

IEC 60269 – 4 (Sicherungen bestimmt zum Schutz von Halbleitern).

4.2.1.2.1 Klassifikation und Zeit/Strom-Bereiche

Der Anwendungsbereich wird durch zwei Buchstaben gekennzeichnet, von denen der erste den Ausschaltstrom-Bereich, der zweite die Gebrauchskategorie kennzeichnet. Einen Überblick über die Klassifikation der Niederspannungssicherungen vermittelt **Tab. 4.2-1**.

Ausschaltstrom-Bereich	Dauerstrom bis	Gebrauchskategorie	Charakteristik, Schutz von
"g" ¹⁾	I_n	"gG" „gL"	Leitungen, Kabel, Geräte
		"gM"	Schaltgeräte in Motorabzweigen
		"gR", "gS" ³⁾	Halbleiter
		"gD"	Sicherungen mit Zeitverzögerung
		"gN"	Sicherungen ohne Zeitverzögerung
"a" ²⁾	I_n	"aM"	Schaltgeräte in Motorabzweigen
		"aR"	Halbleiter

¹⁾ Ganzbereichssicherungen, ²⁾ Teilbereichssicherungen, ³⁾ Typ "R" flinker als Typ "S"

Tab. 4.2-1

Klassifikation der Niederspannungssicherungen nach Ausschaltstrom-Bereich und Gebrauchskategorie IEC 60269-1 ed. 4.0. Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Der Buchstabe "g" bezeichnet Ganzbereichssicherungen, die Ströme bis wenigstens zu ihrem Bemessungsstrom I_n dauernd führen und Ströme vom kleinsten Schmelzstrom bis zum Bemessungsausschaltstrom ausschalten können. Hierunter fallen z.B. die "gG" Sicherungen für allgemeine Anwendungen (Kabel-, Leitungs- und Geräteschutz).

Der Buchstabe "a" bezeichnet Teilbereichssicherungen, die Ströme bis wenigstens zu ihrem Bemessungsstrom I_n dauernd führen und Ströme oberhalb eines bestimmten Vielfachen ihres Bemessungsstromes bis zum Bemessungsausschaltstrom ausschalten können. Dieser Funktionsklasse sind z.B. die "aM" Sicherungen zum Schutz von Motorkreisen zuzuordnen, deren Ausschaltbereich oberhalb des vierfachen Bemessungsstroms beginnt und die daher allein dem Kurzschlusschutz dienen.

Je nach den Anwendungsanforderungen sind unterschiedliche Zeit/Strom-Bereiche festgelegt. In **Fig. 4.2-2** sind die prinzipiellen Verläufe der Zeit/Strom-Bereiche für die Gebrauchskategorien "g" und "a" dargestellt. Der Bereich der Überlastbarkeitskurve von Sicherungen der Klasse "aM" muss durch eine Überlastschutzeinrichtung geschützt werden. Die Ausschaltkurve der Schutzeinrichtung muss unterhalb der Überlastbarkeitskurve der "aM"-Sicherung liegen.

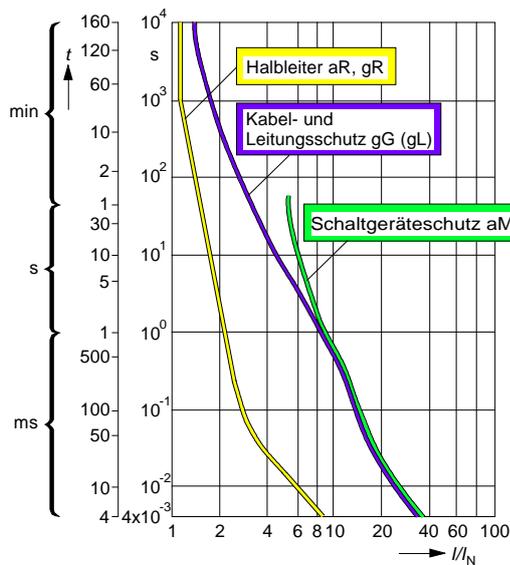


Fig. 4.2-2
Prinzipieller Verlauf des Zeit/Strom-Bereiches von Sicherungen

Von den Herstellern von Sicherungseinsätzen werden diese Kennlinien meist als Mittelwerte eines Streubandes angegeben.

Selektivität

Die Zeit/Strom-Bereiche sind für "gG"/"gL" - Sicherungen so aufeinander abgestimmt, dass Sicherungen, deren Bemessungsströme im Verhältnis 1:1.6 stehen in der Regel untereinander selektiv sind. Siehe auch Abschnitt 4.1.3.3.3 über Selektivität.

4.2.1.3 Bauarten

Die Bauart der Sicherungen hat sich historisch entwickelt. Man unterscheidet zwischen Bauarten, die vornehmlich für die Bedienung durch Laien bestimmt sind (z.B. Schraubsicherungen) und solche, die für die Bedienung durch Fachpersonal bestimmt sind (z.B. Sicherungen mit Messerkontaktstücken).

Schraubsicherungen (z.B. D-System)

Das D-System ist gekennzeichnet durch Unverwechselbarkeit des Sicherungseinsatzes hinsichtlich des Nennstromes und durch den Berührungsschutz. Es ist für industrielle Anwendungen und für Hausinstallationen geeignet und durch Laien bedienbar. Schraubsicherungen sind zum Schalten von Betriebsströmen ungeeignet (d.h. sie sind stromlos ein- bzw. auszuschrauben).

Sicherungen mit Messerkontaktstücken (z.B. NH-System)

Das NH-System (Niederspannungs-Hochleistungs-Sicherungssystem) ist ein genormtes Sicherungssystem, das aus einem Sicherungsunterteil, einem auswechselbaren Sicherungseinsatz und einem Bedienungselement zum Auswechseln des Sicherungseinsatzes besteht. NH-Sicherungen können zusätzlich über Schaltzustandsgeber und Auslösevorrichtungen verfügen.

Unverwechselbarkeit hinsichtlich des Nennstroms und Berührungsschutz sind nicht gegeben; das NH-System ist deshalb für die Betätigung durch Laien nicht geeignet.

Sicherungsunterteile haben zwar Phasentrennwände und Seitenwände, sind aber nicht berührungssicher beim Sicherungswechsel, der deshalb nur mit besonderen Schutzeinrichtungen vorgenommen werden soll. Baugrößen des Systems müssen mit ihren maximalen Stromwerten gekennzeichnet sein. Innerhalb des von einer Baugröße gegebenen Strombereiches ist der Einsatz jedes Sicherungsnennstroms möglich.

Sicherungs-Lasttrennschalter

Sicherheit beim Wechseln von Sicherungseinsätzen ist beim NH-System mit Sicherungslasttrennschaltern möglich. Die Einsätze sind in einem über das ganze Unterteil reichenden Deckel befestigt, und werden mit diesem für das Auswechseln aus den Messerkontakten gezogen. Ein Schliessen und Öffnen des Stromkreises unter Last ist damit möglich.

Als Weiterentwicklung sind hier noch die „Schalter-Sicherungskombinationen“ zu nennen. Um das Auswechseln von Sicherungseinsätzen noch sicherer zu machen, werden die Sicherungseinsätze vor dem Auswechseln beidseitig von Spannung freigeschaltet. Somit sind weder Rückspannungen noch die Einspeiserichtung für den Anwender zu berücksichtigen. Aus Platzgründen finden meistens „Leistenbauformen“ Anwendung.

4.2.2 Leistungsschalter

4.2.2.1 Wirkungsweise und Bauart

Der Leistungsschalter ist ein mechanisches Schaltgerät, das Ströme unter Betriebsbedingungen im Stromkreis einschalten, führen, ausschalten und auch unter festgelegten aussergewöhnlichen Bedingungen, wie Kurzschluss, einschalten, während einer festgelegten Zeit führen und ausschalten kann (IEC 60947-1).

Leistungsschalter haben das Vermögen, Kurzschlüsse abzuschalten. Sie werden nach dem Abschaltvermögen, ihrer Bauart und dem Vermögen, Kurzschlussströme zu begrenzen, eingestuft. Nachstehende Gruppen werden unterschieden:

- **Im Stromnullpunkt löschende Leistungsschalter**
- **Strom begrenzende Leistungsschalter**

Die Geräte beider Gruppen lassen sich weiter unterteilen nach ihrer Bauart:

- **Leitungsschutzschalter (MCB = Miniature Circuit Breaker)**
Ein- oder modular mehrpolige Leistungsschalter bis etwa 100 A Bemessungsstrom für den Leitungsschutz mit oder ohne Fehlerstromauslöser für Installations-Anwendungen
- **Kompakte Leistungsschalter (MCCB = Moulded Case Circuit Breaker)**
Leistungsschalter mit einem tragenden Gehäuse aus Isolierstoff, das einen integrierenden Bestandteil des Leistungsschalters bildet (Bemessungsströme typisch bis etwa 1600 A)
- **Offene Leistungsschalter (ACB = Air Circuit Breaker)**
Grosse Anlagenschalter in offener Bauart (Bemessungsströme typisch 300 ... >3000 A)

4.2.2.2 Vorschriften, Funktionen und Gebrauchskategorien

4.2.2.2.1 Vorschriften

Die für Leistungsschalter massgebenden Vorschriften sind

- IEC 60947 – 1 (Niederspannungs-Schaltgeräte, Allgemeine Anforderungen) und
- IEC 60947 – 2 (Leistungsschalter).

Für den Einsatz in Nordamerika gelten die Vorschriften und Zulassungen nach UL 489 bzw. CSA 22.2. Geräte ohne Approbation nach diesen Normen sind in Nordamerika nicht als Leistungsschalter anerkannt und zugelassen.

Für Leistungsschalter mit Motorschutzfunktion gilt zusätzlich IEC 60947-4-1. Solche Leistungsschalter sind unter gewissen Bedingungen nach UL 508 (Construction Type E) in Nordamerika einsetzbar. Für Details bezüglich des Einsatzes in Nordamerika siehe WP001A-EN-P [15].

4.2.2.2.2 Funktionen und Gebrauchskategorien

Der Leistungsschalter besteht im Wesentlichen aus einem Betätigungsorgan (manuell oder – als Option – fernbetätigt), (meist) einem (thermischen oder elektronischen) Überstrom-, einem elektromagnetischen Kurzschlussauslöser, einer Auslösemechanik mit Kraftspeicher (Schaltenschloss), dem Hauptkontaktsystem und optionalen Hilfsschaltern. Die Verknüpfung dieser Funktionen in einer Einheit gestattet eine kompakte Bauweise von Anlagen und den Einbezug des Leistungsschalters in die Automatisierungs-Umgebung. So bestehen moderne Starterkom-

binationen aus nur zwei Komponenten - Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik und Schütz.

Leistungsschalter bieten Funktionen wie:

- Kurzschlusschutz
- Leitungs-, Verbraucher- (Motor-), Anlagenschutz
- Signalisierung des Betriebszustands
- Auslösemeldung
- Betriebsmässiges Schalten
- Fernschalten
- Trennen
- Abschliessfunktionen mittels Vorhängeschloss

Sie können je nach Ausführung nicht nur als Kurzschlusschutz-Organ, sondern auch als Motorschutzschalter, Lastschalter, Hauptschalter oder Trennschalter eingesetzt werden.

In Hinblick auf die Selektivität zwischen Kurzschlusschutzeinrichtungen unterscheidet IEC 60947-2 ed. 4.0 zwei Gebrauchskategorien (*Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch*).

- **Gebrauchskategorie A** → Leistungsschalter mit Sofortauslösung
IEC-Definition: Leistungsschalter, die nicht besonders ausgelegt sind für Selektivität unter Kurzschlussbedingungen gegenüber anderen auf der Lastseite in Reihe liegenden Kurzschlusseinrichtungen, d.h. ohne beabsichtigte Kurzzeitverzögerung für Selektivität unter Kurzschlussbedingungen und daher ohne Bemessungskurzzeitstromfestigkeit ¹⁾
 - **Gebrauchskategorie B** → Leistungsschalter mit Kurzzeitverzögerung
IEC-Definition: Leistungsschalter, die besonders ausgelegt sind für Selektivität unter Kurzschlussbedingungen gegenüber anderen auf der Lastseite in Reihe liegenden Kurzschlusseinrichtungen, d.h. mit beabsichtigter Kurzzeitverzögerung für Selektivität unter Kurzschlussbedingungen. Solche Leistungsschalter haben eine Bemessungskurzzeitstromfestigkeit ¹⁾
- ¹⁾ *Bemessungskurzzeitstromfestigkeit (I_{CW}): Bei Wechselspannung ist dies der Effektivwert der Wechselstromkomponente des unbeeinflussten Kurzschlussstromes während der Kurzzeitverzögerung.*

Die grosse Mehrzahl der Leistungsschalter ist am Verbraucherende der Stromkreise eingesetzt und entspricht der Gebrauchskategorie A.

Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik entsprechen zusätzlich den Gebrauchskategorien für das Schalten von Verbrauchern, z.B. AC-3 nach IEC 60947-4-1.

4.2.2.3 Aufbau eines Leistungsschalters

Die in **Fig. 4.2-3** aufgeführten Bauteile des Leistungsschalters sind exakt aufeinander abgestimmt, damit die gemeinsamen Aufgaben, das schnelle Abschalten von Kurzschlussströmen und sichere Erkennen von Überlasten, optimal ausgeführt werden können.

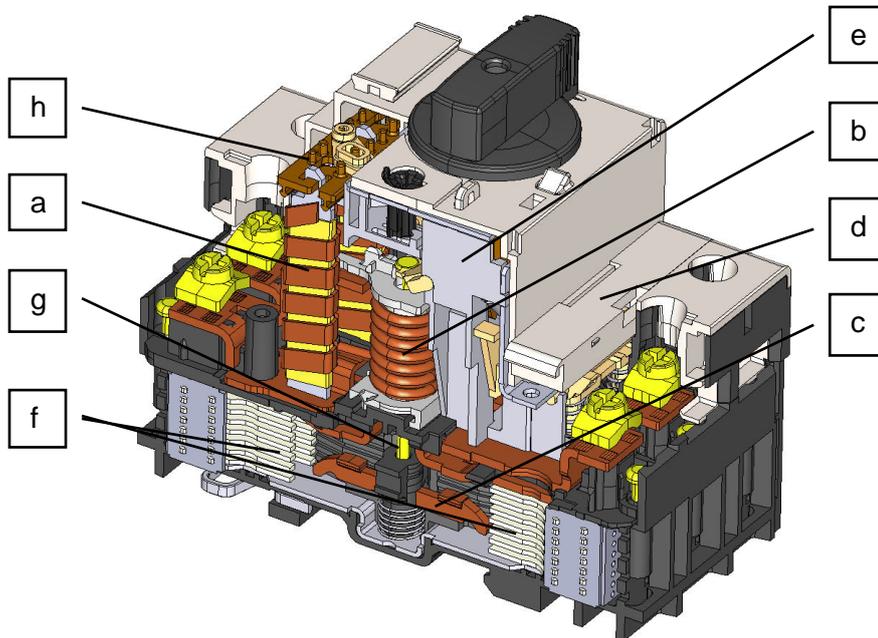


Fig. 4.2-3
Hauptfunktionselemente eines Leistungsschalters für Motorschutz

- a) Thermische Überstromauslöser
- b) Elektromagnetische Überstromauslöser
- c) Hauptkontaktsystem
- d) Hilfsschalter-Position
- e) Schaltschloss
- f) Löschkammer (Löschbleche)
- g) Schlaganker
- h) Differentialauslöseschieber

Bei grösseren Leistungsschaltern (> ca. 100 A) finden zunehmend elektronische Auslöse- und Kommunikationsmodule Anwendung. Diese bieten eine hohe Flexibilität bezüglich der Wahl der anwendungsspezifischen Parameter und gestatten die Einbindung der Geräte in übergeordnete Steuer- und Leitsysteme.

4.2.2.3.1 Thermische Überstromauslöser

Die thermischen Überstromauslöser von Leistungsschaltern funktionieren wie jene thermischer Motorschutzrelais (Bimetallrelais) und unterliegen denselben Vorschriften, soweit sie dem Motorschutz dienen. Siehe auch Abschnitt 4.2.4.1. Die Auslösung erfolgt normal über das Schaltschloss des Leistungsschalters und bewirkt das Öffnen der Hauptkontakte. Die Wiedereinschaltung erfolgt über den Hand- oder Fernantrieb des Schalters nach Abkühlung der Bimetalle unter die Rückschaltsschwelle.

Bei Leistungsschaltern mit thermisch verzögerten Überlastauslösern und niedrigen Einstellströmen (ca. < 20A) ist der Widerstand der Strombahn mit der Heizwicklung des Bimetallstreifens und der Spule des unverzögerten elektromagnetischen Kurzschlussauslösers vergleichsweise gross. Er kann so gross sein, dass er jeden beliebigen (unbeeinflussten) Kurzschlussstrom auf einen Wert dämpft, der vom Schalter noch thermisch und dynamisch beherrscht wird und auch ausgeschaltet werden kann. Solche Leistungsschalter sind eigenkurzschlussfest.

4.2.2.3.2 Elektromagnetische Überstromauslöser

Bei Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik regen Überströme ab einem Wert vom 10 ... 16-fachen des oberen Skaleneinstellwertes praktisch zeitlich unverzögert den elektromagnetischen Überstromauslöser an. Motoren mit hohem Wirkungsgrad können höhere Ansprechwerte bedingen (siehe 1.7.1.2.1). Der genaue Ansprechwert ist entweder einstellbar (Anpassung für Selektivität oder unterschiedliche Einschaltstromspitzen bei Transformator- und Generatorschutz) oder ist konstruktiv fest gegeben. Bei Leistungsschaltern für Anlagen- und Leitungsschutz liegt der Auslösebereich tiefer.

Bei kleineren Leistungsschaltern (meist <100A) ist die Hauptstrombahn zu einer kleinen Spule geformt. Fließt ein hoher Überstrom durch diese Windungen, wirkt eine Kraft auf den von der Spule umschlossenen Anker. Dieser Anker entriegelt das gespannte Schaltschloss, das den Kraftspeicher frei gibt und damit die Öffnung der Hauptkontakte und die Abschaltung des Überstroms bewirkt.

Schlaganker für stark Strom begrenzende Leistungsschalter

Strombegrenzende Leistungsschalter begrenzen den Fehlerstrom und reduzieren damit die mechanische und thermische Beanspruchung im Fehlerfall (siehe Abschnitt 4.1.3.3.2). Leistungsschalter mit Bemessungsströmen bis etwa 100 A werden für eine schnelle Abschaltung des Kurzschlussstroms mit einem Schlagankersystem angeboten, das bei einem Kurzschluss die Hauptkontakte zusätzlich aufschlägt und damit extrem kurze Abschaltzeiten ermöglicht (Fig. 4.2-4).

Eine alternative Lösung zum Schlaganker ist bei grösseren Nennströmen der so genannte Slot-Motor, bei dem die Kontakte überwiegend durch elektrodynamische Kräfte rasch geöffnet werden.

Je schneller ausgeschaltet wird, desto weniger Energie ist im Schalter zu beherrschen, desto kompakter kann er gebaut werden. Dies ermöglicht erst überhaupt, Leistungsschalter mit geringen Aussenabmessungen zu bauen.

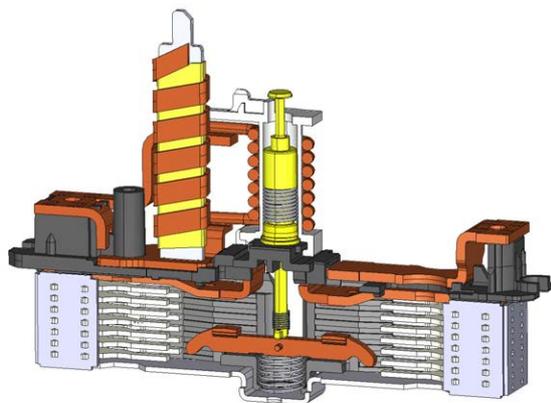


Fig. 4.2-4

Die Kontakte eines hoch Strom begrenzenden Leistungsschalters werden bei einem Kurzschluss von einem Schlaganker aufgeschlagen und der Strom in kürzester Zeit in die Löschkammern geleitet und bereits während des Anstiegs abgeschaltet.

4.2.2.3.3 Hauptkontaktsystem und Schaltvermögen

Die Anforderungen an einen Leistungsschalter-Hauptkontakt sind hohes Einschaltvermögen, hohes Ausschaltvermögen, verlustarme Führung des Betriebsstromes, geringer Kontaktabbrand, geringes Massenträgheitsmoment und optimale Form für eine günstige Lichtbogenwanderung. Der Schaltlichtbogen soll schnell aus dem Bereich der Kontaktflächen geführt, gekühlt, aufgeteilt, verlängert und so zum Löschen gebracht werden. Die Löschkammerbleche müssen bezüglich Form und Anordnung eine funktionelle Einheit mit dem Hauptkontakt bilden.

Diese hohen Anforderungen optimal zu erfüllen, stellt allerhöchste Ansprüche an die konstruktive Gestaltung, die Materialwahl und nicht zuletzt an die Simulations- und Prüftechnik.

Kontaktsysteme werden auf optimales Schaltverhalten bei der Haupt-Bemessungsspannung konstruiert. Die Anzahl der Löschkammerbleche ist massgebend für die Lichtbogenspannung beim Abschaltvorgang und damit für das Schaltvermögen und die Strombegrenzung. Ein z.B. für 400V ausgelegtes Kontaktsystem weist bei Netzspannungen über 400V ein reduziertes Schaltvermögen auf (Netzspannungen unter 400V sind dabei unkritisch). Ein Einsatz bei z. B. 690 V ist daher ggfs. nur mit reduziertem Schaltvermögen möglich. Es sind jeweils die Leistungsdaten bei der gegebenen Betriebsspannung zu beachten.

Leistungsschalter müssen bei der gegebenen Betriebsspannung in der Lage sein, den grösstmöglichen Kurzschlussstrom an der Einbaustelle zu beherrschen. Eigenkurzschlussfeste Leistungsschalter (Abschnitt 4.2.2.4.1) können ohne weitere Nachprüfung an beliebig starken Netzen eingesetzt werden, da ihre innere Impedanz den Kurzschlussstrom auf das Schaltvermögen (oder kleiner) des Schalters begrenzt. Ist das Schaltvermögen des Schalters kleiner als erforderlich, so ist ein Backup-Schutz (Vorsicherung oder Leistungsschalter) vorzusehen. Zusammen mit dem Backup-Schutzgerät muss das erforderliche Schaltvermögen sichergestellt sein. Die Dimensionierung des Backup-Schutzes ist den Produkt-Unterlagen zu entnehmen.

Grenzsaltvermögen und Betriebssaltvermögen

IEC 60947-2 ed. 4.0 unterscheidet das Bemessungs-Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen I_{cu} und das Bemessungs-Betriebs-Kurzschlussausschaltvermögen I_{cs} :

- **Bemessungs-Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen I_{cu}**
("Ultimate" short circuit breaking capacity):
Die Prüffolge ist O-t-CO
Leistungsschalter, die auf das Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen beansprucht wurden sind danach bedingt einsatzfähig. Es kann zu Veränderungen der Überlast-Auslösecharakteristik kommen und zu erhöhter Erwärmung infolge Verlustes von Kontaktmaterial.
- **Bemessungs-Betriebs-Kurzschlussausschaltvermögen I_{cs}**
("Service" short circuit breaking capacity):
Die Prüffolge ist O-t-CO-t-CO
Leistungsschalter, die auf das Betriebskurzschlussausschaltvermögen beansprucht wurden sind danach weiter einsatzfähig.

O Kurzschlussabschaltung aus dem geschlossenen Zustand

t Pause

CO Einschalten auf Kurzschluss mit nachfolgender Kurzschlussabschaltung

Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

In der Regel sind die Werte von Leistungsschaltern für I_{cu} höher als für I_{cs} . Die Mehrzahl der Leistungsschalter wird daher (aus Kostengründen) nach I_{cu} ausgewählt. In Anlagen, in denen Betriebsunterbrechungen möglichst kurz gehalten werden müssen, ist nach I_{cs} zu dimensionieren.

Nach der Abschaltung eines Kurzschlusses empfiehlt es sich generell, sich von der Funktionsfähigkeit des Gerätes zu überzeugen.

Durchlasswerte

Das eigentliche Qualitätsmerkmal bezüglich guten Kurzschlussschutzes stellen die Durchlasswerte (Fig. 4.2-5) dar. Die Höhe von Durchlassstrom und Durchlassenergie in Abhängigkeit vom unbeeinflussten Kurzschlussstrom I_{cp} geben Auskunft über die Qualität der Strombegrenzung des Schalters. Sie zeigen, wie hoch nachgeschaltete Geräte wie Schütze oder Schalter im Kurzschlussfall belastet werden. Die Durchlasswerte beeinflussen direkt die Dimensionierung dieser nachgeschalteten Geräte – z.B. Kurzschlusskoordination Typ 2 ohne Überdimensionierung der Schütze - und bestimmen die weitere bauliche Ausführung der Anlage.

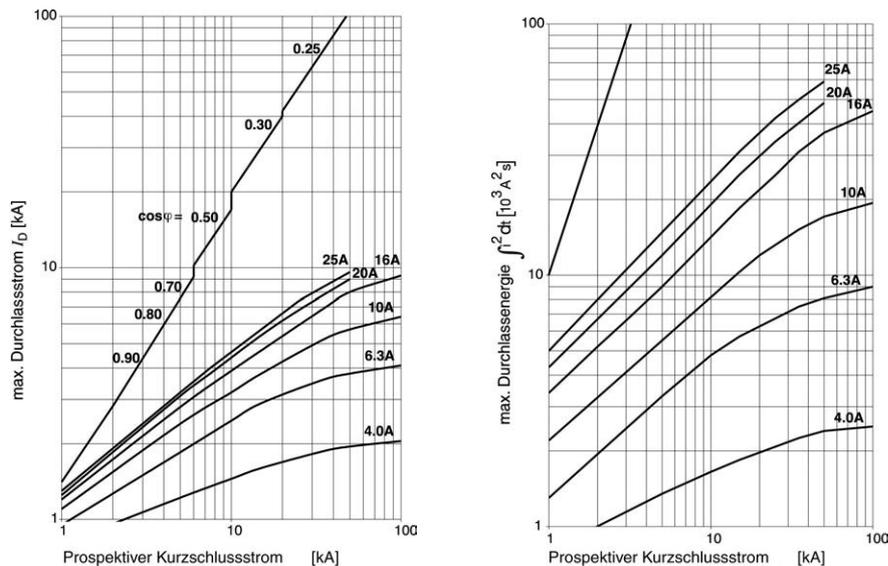


Fig. 4.2-5
 Max. Durchlassstrom und max. Durchlassenergie stark strombegrenzender Leistungsschalter bei einer Bemessungs-Betriebsspannung von 415 V

Lebensdauer von Leistungsschaltern

IEC 60947-2 definiert die Anzahl Schaltspiele, die ein Leistungsschalter ohne Last, bei Normallast, bei Überlast oder bei Kurzschluss zu schalten hat. Die Werte variieren zwischen zwei Ausschaltungen (O-t-CO) für das Bemessungs-Grenz-Kurzschlussauschaltvermögen und ein paar Tausend Schaltungen rein mechanisch für lastloses Schalten.

Die elektrische Lebensdauer (Schaltstücklebensdauer) eines Leistungsschalters ist wie bei den Schützen von der Grösse des auszuschaltenden Stroms abhängig. Kleine Ströme im Nennstrombereich oder im Ansprechbereich der thermisch verzögerten Auslöser wirken sich weitaus weniger auf die Schaltstücklebensdauer aus als Kurzschlussströme in der Höhe des Ausschaltvermögens. Die Kontakte können bereits nach wenigen hohen Kurzschlussströmen derart abgebrannt sein, dass ein Auswechseln des Leistungsschalters angezeigt ist. Die in der Praxis auftretenden Kurzschlussströme liegen meist deutlich unter den berechneten grösstmöglichen Werten und dem Schaltvermögen der eingesetzten Schalter. Sie bewirken dadurch einen geringen Kontaktabbrand.

Betriebsmässiges Schalten

Im unteren Leistungsbereich werden Leistungsschalter auch eingesetzt, um kleinere - vielfach mobile - Anlagen und Geräte (z.B. Tischfräsen, Tischkreissägen, Tauchpumpen) betriebsmässig von Hand zu schalten. Die elektrische Lebensdauer des Schalters wird durch die in diesen Applikationen typisch niedrigen Schaltzahlen kaum ausgenutzt. Der Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik ersetzt die Kombination Sicherung, Motorschutzgerät und Lastschalter.

Hilfsschalter und Anzeigen

Die Hilfsschalter ermöglichen die funktionelle Einbindung des Schutzorgans in die Steuerung. EIN, AUS, Überlast- und/oder Kurzschlussauslösung können mit Hilfe von entsprechenden Hilfsschaltern signalisiert werden. Diese Hilfsschalter lassen sich am Leistungsschalter an- oder einbauen und sind entweder auf Klemmen geführt oder über freie Drahtenden anschliessbar. Zusätzlich zu den Hilfsschaltern verfügen Leistungsschalter vielfach über optische Anzeigen für den Schaltzustand und oft auch für den Ausgelöst-Zustand und die Auslöse-Ursache. Dies sind wertvolle Hilfen für die Diagnose vor Ort bei Inbetriebnahmen und der Störungsbehebung.

Arbeitsstrom- und Unterspannungsauslöser

Der Arbeitsstromauslöser erlaubt eine Ausschaltung von fern mittels eines Steuersignals, z.B. für elektrische Verriegelungen.

Der Unterspannungsauslöser schaltet den Leistungsschalter beim Unterschreiten eines (meist fixen) Wertes der an ihm liegenden Spannung den Leistungsschalter aus und wird z.B. zum Erkennen von Spannungsausfällen verwendet. Sie werden vor allem als Sicherheitselemente eingesetzt, z.B. zur Verhinderung eines Selbstanlaufes nach einer Spannungsunterbrechung, für Verriegelungsschaltungen, für NOT-AUS-Funktionen und zum Fernauslösen.

Motorantriebe

Motor- oder Fernantriebe eröffnen die Möglichkeit, die vollständige Befehlsgebung an den Leistungsschalter von fern vorzunehmen. Die mittels der Handhabe realisierbaren Funktionen können damit ferngesteuert getätigt werden. Leistungsabgänge lassen sich ohne Eingriff einer Bedienperson vor Ort zu- oder abschalten. Die Rückstellung eines ausgelösten Leistungsschalters in einer ferngesteuerten Verteilanlage ist damit möglich.

4.2.2.4 Einsatz von Leistungsschaltern

Leistungsschalter können je nach Bauart und Zubehör folgende Schaltgerätefunktionen übernehmen:

- Leistungsschalter
- Motorschutzschalter
- Lastschalter
- Trennschalter
- Hauptschalter
- NOT-AUS-Schalter

Für die richtige Auswahl von Leistungsschaltern für die jeweilige Anwendung sind die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Bauart zu berücksichtigen. Siehe auch Abschnitt [2.2.1](#).

4.2.2.4.1 Einsatz als Leistungsschalter

Nullpunktlöschende Leistungsschalter

Nullpunktlöschende Leistungsschalter haben geringe Strombegrenzung und schalten den Kurzschluss nahe dem natürlichen Stromnulldurchgang ab. Wegen ihrer hohen Durchlasswerte werden sie hauptsächlich für den Leitungs- und Anlagenschutz eingesetzt. In Ausführung nach Gebrauchskategorie B (mit Abschaltverzögerung) finden sie in selektiven Netzen mit zeitselektiver Staffelung Einsatz.

Strombegrenzende Leistungsschalter

Strombegrenzende Leistungsschalter vereinfachen den Einsatz. Sie erübrigen komplexe Netz-Kurzschlussstromberechnungen für jeden Schalter-Einbauort und machen die Kurzschlusskoordination ähnlich einfach wie bei der Schmelzsicherung.

Eigenschaften von Leistungsschaltern für eine einfache Planungsarbeit:

- Hohes Schaltvermögen erübrigt Netzberechnungen:
Ist das Schaltvermögen des Leistungsschalters höher als das Kurzschluss-Niveau am Einbauort (bei Motorabgängen typisch 1...20 kA), so erübrigen sich Netzberechnungen.
- Geringe Durchlasswerte (Durchlassstrom und $I^2 \cdot t$ -Wert):
Schweissfreie oder schweissarme Starterkombinationen von Leistungsschaltern und Schützen sind oft ohne Überdimensionierung der Schütze möglich und damit kostengünstig. Die Hersteller führen Koordinationsversuche durch und stellen Koordinationstabellen nach z.B. IEC 60947-4-1 Koordinationstyp "1" oder "2" auf.
- Der Nachweis der Kurzschlussfestigkeit gemäss IEC 60439-1 (Niederspannungsschaltgerätekombinationen) entfällt bei Durchlassströmen ≤ 17 kA.

Leistungsschalter für den Schutz von Motoren

Diese weisen mindestens auf den Motorstrom einstellbare Auslöser (Bimetall oder elektronisch) und Motorschutzcharakteristik auf. Moderne Motorschutz-Leistungsschalter verfügen zusätzlich:

- Kompensation der Umgebungstemperatur (bei Bimetall)
- sicheren Schutz bei Phasenausfall (z.B. spezielle Eichung, Differentialauslöseschieber oder elektronische Fehlererfassung). Dies ist auch Voraussetzung für den Einsatz mit Motoren der Zündschutzart „erhöhte Sicherheit“ (EEx e).

Standardleistungsschalter – vor allem im Bereich höherer Bemessungsströme - bieten normalerweise nur Leitungsschutz und sind damit für den Überlastschutz von Motoren nicht geeignet. Beim Einsatz in Motorstromkreisen sind zusätzlich geeignete Motorschutzgeräte vorzusehen. Dabei ist zu beachten, dass die Überlastcharakteristik des Leistungsschalters träger sein muss als die des Motorschutzgerätes, damit bei Überlast das Motorschutzgerät und nicht der Leistungsschalter auslöst (siehe IEC 60947-4-1 Annex B.4).



Fig. 4.2-6
Moderne hoch strombegrenzende Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik

Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik werden als so genannte eigenkurzschlussfeste Motorschutzschalter (self protected; combination motor starter) eingesetzt. Bei kleineren Bemessungsströmen dient der Motorschutzschalter oft als manueller Betriebsschalter und muss dann nach IEC 60947-4-1 als Motorstarter geprüft sein. Moderne Motorschutzschalter haben im Vergleich zu ihrer ursprünglichen Form ein hohes Kurzschluss-Schaltvermögen.

Leistungsschalter für den Anlagen- und Leitungsschutz

Die Anforderungen an Leistungsschalter für den Anlagen- und Leitungsschutz sind im Vergleich zu Leistungsschaltern für Motorschutz unterschiedlich:

- Der Strombereich ist oft fix
- Die thermischen Auslöser sind weniger präzise
- Die Temperatur-Kompensation fehlt in der Regel
- Der Ansprechwert der elektromagnetischen Kurzschlussauslöser ist meist tiefer und vielfach einstellbar
- Schalter der Gebrauchskategorie B verfügen über eine (meist einstellbare) Zeitverzögerung und eine Kurzzeitstromfestigkeit (I_{cw}) und sind somit für zeitselektive Staffelung geeignet

Bei Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik ist automatisch auch der Leitungsschutz gewährleistet, da Leitungen thermisch weniger kritisch sind als Motoren. Je nach nationalem Standard dürfen die Leitungen nach dem am Leistungsschalter eingestellten Strom oder nach der oberen Einstellgrenze dimensioniert werden. Während bei Schmelzsicherungen Typ "gG" eine Überdimensionierung der Sicherung um eine oder zwei Stromstufen und damit des Querschnitts der geschützten Leitung notwendig ist, um eine Auslösung bei Motoranlauf zu verhindern, können durch Leistungsschalter geschützte Motorzuleitungen knapper dimensioniert und damit besser ausgenutzt werden.

Leistungsschalter als Lastschalter

Siehe auch Abschnitt [2.2.1.2](#).

Leistungsschalter erfüllen die Anforderungen an Lastschalter und können als solche eingesetzt werden.

Leistungsschalter als Trennschalter

Siehe auch Abschnitt 2.2.1.1. Leistungsschalter erfüllen vielfach die Trenneigenschaften und können dann als solche eingesetzt werden. Solche Leistungsschalter mit Trenneigenschaft müssen entsprechend geprüft und mit dem Trennersymbol gekennzeichnet sein.



Fig. 4.2-7

Schaltsymbol für Leistungsschalter mit Trennerfunktion. Der waagrechte Strich symbolisiert die Trenneigenschaft, das Kreuz die Leistungsschalter-Funktion.

Leistungsschalter als Hauptschalter

Siehe auch Abschnitt 2.2.1.5.

Leistungsschalter sind gemäss IEC 60204-1 ausdrücklich als Hauptschalter zugelassen, soweit sie über die Trenneigenschaften verfügen.

Leistungsschalter als NOT-AUS-Schalter

Siehe auch Abschnitt 2.2.1.6

Gemäss IEC 60204-1 sind Hauptschalter als lokale NOT-AUS-Vorrichtung zugelassen, wenn sie für das Bedienungspersonal gut zugänglich sind. Für den Einsatz als NOT-AUS-Schalter muss die Handhabe rot auf gelbem Hintergrund sein.

4.2.2.5 Einbau von Leistungsschaltern, Sicherheitsabstände

Siehe auch Abschnitt 2.3.9.

Leistungsschalter beherrschen beim Abschalten von Kurzschlüssen sehr hohe Ströme bei hohen Spannungen. Beim Abschaltvorgang werden in den Kontaktsystemen und Löschkammern in der Folge grosse Leistungen in Wärmeenergie umgesetzt. Neben einer hohen Erwärmung der konstruktiven Teile wie Kontakte, Löschbleche und Wände der Kontaktkammern führt die in den Abschaltlichtbögen umgesetzte Energie zu einem Aufheizen der Luft im Kontaktsystem auf einige tausend Grad Celsius und damit zur Bildung von leitfähigem Plasma. Dieses Plasma wird in der Regel durch Ausblasöffnungen nach aussen gestossen und darf dort auf keine leitfähigen Teile treffen, um Sekundärkurzschlüsse zu vermeiden.

Für Leistungsschalter werden aus diesem Grund jeweils Sicherheitsabstände angegeben (Fig. 4.2-8), innerhalb deren Grenzen sich keine leitfähigen Teile – z.B. metallische Gehäusewände oder nicht isolierte Leiter - befinden dürfen. Häufig werden zusätzliche Isolierteile (Phasentrennwände oder Abdeckungen; z. T. optional) verwendet. Bei manchen Produkten ist nach Herstelleranweisung zusätzliches Isolieren der angeschlossenen Leiter erforderlich. Nichtbeachtung der Sicherheitsabstände kann zu Unfällen mit schwersten Folgen führen.

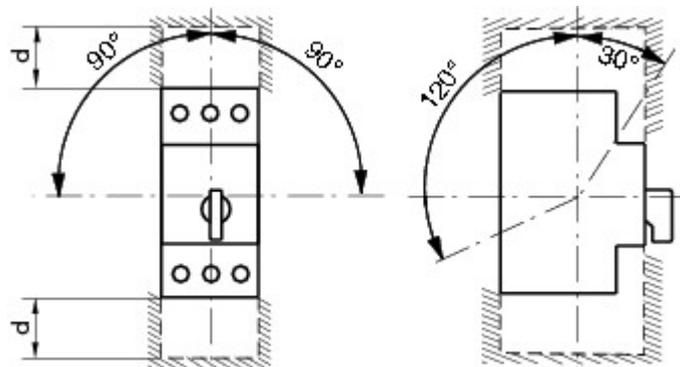


Fig. 4.2-8

Die Sicherheitsabstände sind unbedingt einzuhalten. Innerhalb der schraffierten Zonen dürfen sich keine leitfähigen Teile wie z.B. metallische Wände oder nicht isolierte Leiter befinden.

4.2.3 Leitungsschutzschalter (Miniature Circuit Breaker MCB)

4.2.3.1 Wirkungsweise und Bauformen

Leitungsschutzschalter dienen in erster Linie dem Schutz von Kabeln und Leitungen gegen Überlast (thermisch) und Kurzschluss (elektromagnetisch). Damit übernehmen sie den Schutz dieser elektrischen Betriebsmittel gegen zu hohe Erwärmung und gegen Zerstörung bei Kurzschluss. Leitungsschutzschalter finden ihren Einsatz in Verteilnetzen sowohl im Wohnbau als auch in der Industrie. Den vielfältigen Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungsgebiete und -fälle werden sie durch verschiedene Ausführungen und mit Hilfe von umfassendem Zubehör (z.B. Hilfs- und Signalkontakte, usw.) gerecht.

Die Bauformen aller Leitungsschutzschalter sind ähnlich. Bestimmte Abmessungen sind in Installations-Vorschriften (teils national) vorgegeben. Wesentliche Unterschiede liegen in der Baubreite (z.B. 12.5 und 17.5 mm) oder Bautiefe (z.B. 68 und 92.5 mm). Das Ausschaltvermögen bestimmt u.a. die Baugröße.

4.2.3.2 Vorschriften, Auslösecharakteristiken und Bemessungsschaltvermögen

Leitungsschutzschalter unterliegen der internationalen und nationalen Normung. Die Konstruktions- und Prüfanforderungen sind in der Vorschrift IEC 60898 festgelegt. Für die unterschiedlichen Anwendungen sind in IEC 60898 drei Auslösecharakteristiken B, C und D festgelegt (Fig. 4.2-9):

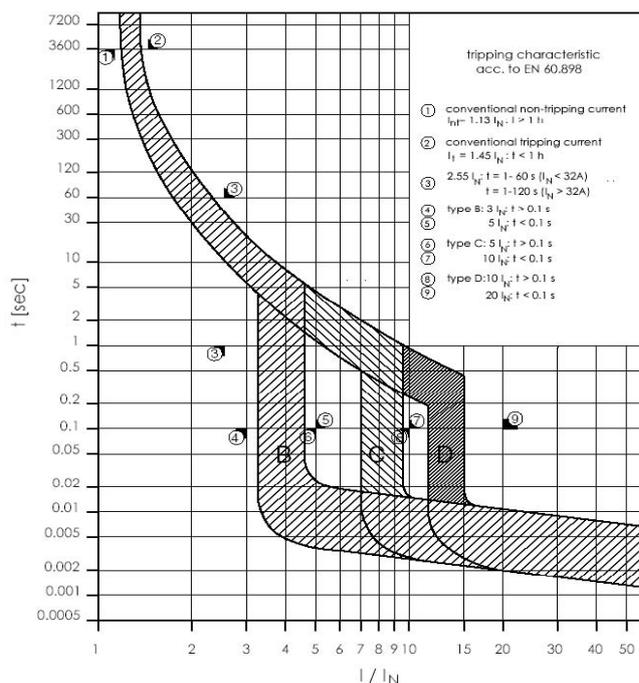


Fig. 4.2-9

Die Auslösecharakteristiken B, C und D nach IEC 60898 unterscheiden sich durch den Ansprechwert des Kurzschlussauslösers

- Auslösecharakteristik **B** ist die Standardcharakteristik für Steckdosenkreise im Wohn- und Zweckbau ($I > \geq 3 \dots 5 \cdot I_e$)
- Auslösecharakteristik **C** ist von Vorteil beim Einsatz von Betriebsmitteln mit höheren Einschaltströmen wie z.B. Lampen und Motoren ($I > \geq 5 \dots 10 \cdot I_e$)
- Auslösecharakteristik **D** ist angepasst an stark stromstoss-erzeugende Betriebsmittel wie Transformatoren, Magnetventile oder Kondensatoren ($I > \geq 10 \dots 20 \cdot I_e$)

Wechselstrom-Leitungsschutzschalter sind normal für Wechsel- und Drehstromnetze bis zu einer Bemessungsspannung von 240 / 415 V und Allstrom-Leitungsschutzschalter zusätzlich für

Gleichspannungsnetze bis zu Bemessungsspannungen von 125 V, 220 V oder 440 V je nach Polzahl geeignet.

Ein wesentliches Leistungsmerkmal der Leitungsschutzschalter ist neben der Kennlinientreue das Bemessungsschaltvermögen. Die Einteilung erfolgt in Schaltvermögensklassen und gibt Auskunft darüber, bis zu welcher Höhe Kurzschlussströme abgeschaltet werden können.

Standardwerte nach IEC 60898 sind 1'500, 3'000, 4'500, 6'000, 10'000, 20'000 und 25'000 A.

Bei der Wahl eines Leitungsschutzschalters zum Schutz von Kabeln und Leitungen müssen die zulässigen Durchlass- I^2t -Werte für Leitungen beachtet werden. Sie dürfen bei der Kurzschlussabschaltung nicht überschritten werden. Deshalb sind die I^2t -Werte in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom wichtige Kenngrößen für Leitungsschutzschalter.

In einigen Ländern besteht eine Klassierung der Leitungsschutzschalter nach den zulässigen I^2t -Werten. Laut den technischen Anschlussbedingungen (TAB) der deutschen Energieversorgungsunternehmen (EVU) z.B. dürfen in Haushalts- und Zweckbauverteilern nach dem Zähler aus Selektivitätsgründen nur Leitungsschutzschalter mit einem Bemessungsschaltvermögen von mindestens 6'000 A und der Energiebegrenzungsklasse 3 eingesetzt werden. Für Industrieanwendungen ist in der Regel ein Schaltvermögen von 10'000 A gefordert.

4.2.3.3 Einbau von Leitungsschutzschaltern, Sicherheitsabstände

Siehe auch Abschnitt 4.2.2.5.

Leitungsschutzschalter als Komponenten von Installationssystemen sind in der Regel so konstruiert, dass die Sicherheitsabstände bei systemkonformem Aufbau gewährleistet sind.

4.2.4 Motorschutzrelais (Überlastrelais)

Überlastrelais werden zum Schutz elektrischer Betriebsmittel, wie Drehstrommotoren und Transformatoren, gegen unzulässig hohe Erwärmung eingesetzt und messen den Strom, um daraus auf den Erwärmungs- und Gefährdungszustand des Schutzobjektes zu schliessen. Die Schutzabschaltung erfolgt über das Motorschaltgerät – in der Regel ein Schütz.

4.2.4.1 Thermische Motorschutzrelais

Wirkungsweise

Bei thermischen Motorschutzrelais sind drei Bimetallstreifen gemeinsam mit einem Auslösemechanismus in ein Isolierstoffgehäuse eingebaut. Im Betrieb werden die Bimetalle vom Motorstrom beheizt, biegen sich aus und führen nach einem bestimmten Weg, der vom eingestellten Strom abhängig ist, zur Auslösung des Schaltmechanismus. Der Schaltmechanismus betätigt einen Hilfsschalter, der den Spulenkreis des Motorschützes unterbricht (Fig. 4.2-10). Eine Schaltstellungsanzeige signalisiert den Zustand „ausgelöst“.

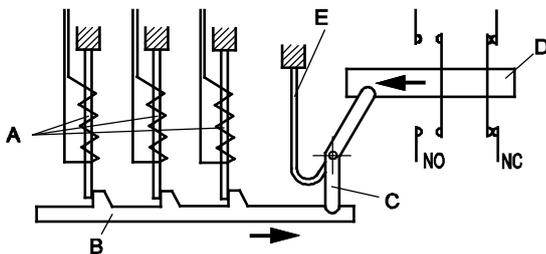


Fig. 4.2-10

Funktionsprinzip eines dreipoligen thermisch verzögerten Bimetall-Motorschutzrelais mit Temperaturkompensation

A = Indirekt beheizte Bimetalle

B = Auslöseschieber

C = Auslösehebel

D = Kontakthebel

E = Kompensationsbimetall

Die Bimetalle können direkt oder indirekt beheizt werden. Im ersten Fall fließt der Strom direkt durch das Bimetall, im zweiten durch eine isolierte Heizwicklung um das Bimetall. Durch die Isolation ergibt sich ein kleiner Wärmestau, so dass die Trägheit indirekt beheizter Thermorelais

bei höheren Strömen grösser ist als bei direkt beheizten. Vielfach werden beide Möglichkeiten kombiniert. Für Motorbemessungsströme über ca. 100 A wird der Motorstrom über Stromwandler geführt. Das thermische Überlastrelais wird dann vom Sekundärstrom des Stromwandlers beheizt. Damit werden einerseits die Verlustleistung reduziert und andererseits die Kurzschlussfestigkeit erhöht.

Der Auslösestrom von Bimetallrelais ist an einer Stromskala - durch Verschiebung des Auslösemechanismus relativ zu den Bimetallen - einstellbar, um im wichtigen Bereich des Dauerbetriebes den Schutz dem Schutzobjekt anzupassen.

Die einfache, wirtschaftliche Konstruktion kann das transiente thermische Verhalten des Motors nur angenähert nachbilden. Für den Anlauf mit anschliessendem Dauerbetrieb schützt das thermische Motorschutzrelais den Motor einwandfrei. Bei häufigen Anläufen im intermittierenden Betrieb bewirkt die gegenüber dem Motor wesentlich kürzere Erwärmungszeitkonstante des Bimetallstreifens eine vorzeitige Auslösung, bei der die thermische Kapazität des Motors nicht genutzt wird.

Die Abkühlzeitkonstante von Thermorelais ist kürzer als jene normaler Motoren. Auch dies trägt dazu bei, dass im intermittierenden Betrieb der Unterschied zwischen der tatsächlichen Temperatur des Motors und der Simulation durch das Thermorelais immer grösser wird (**Fig. 4.1-3** Abschnitt **4.1.2.1**). Aus diesen Gründen ist der Schutz der Motoren bei intermittierendem Betrieb ungenügend.

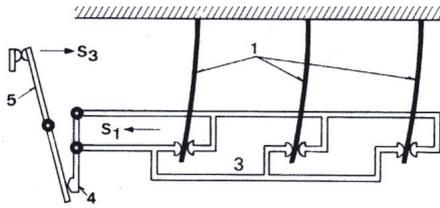
Temperaturkompensation

Das Wirkungsprinzip thermischer Motorschutzrelais beruht auf Erwärmung. Deshalb beeinflusst die Umgebungstemperatur des Gerätes die Auslösedaten. Da der Einsatzort und damit die Umgebungstemperatur des zu schützenden Motors in der Regel von jener des Schutzgerätes abweicht, ist es Industriestandard, dass die Auslösecharakteristik von Bimetallrelais temperaturkompensiert, d.h. weitgehend unabhängig von dessen Umgebungstemperatur ist (**Fig. 4.1-5**). Dies wird durch ein Kompensations-Bimetall erreicht, das die Position des Auslösemechanismus temperaturabhängig korrigiert.

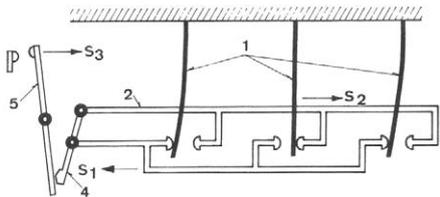
Phasenausfallempfindlichkeit

Die Auslösekennlinie eines dreipoligen Motorschutzrelais gilt unter der Voraussetzung, dass alle drei Bimetallstreifen gleichzeitig mit dem gleichen Strom belastet werden. Werden bei Unterbrechung eines Polleiters nur zwei Bimetallstreifen beheizt, dann müssen diese zwei Streifen allein die zur Betätigung des Auslösemechanismus erforderliche Kraft aufbringen. Dies erfordert einen höheren Strom bzw. führt zu einer längeren Auslösezeit (Kennlinie c in **Fig. 4.2-13**).

Werden grössere Motoren (≥ 10 kW) mit diesen höheren Strömen längere Zeit beansprucht, muss mit einem Schaden gerechnet werden (siehe Abschnitt **4.1.2.4.3**). Um auch bei Netzasymmetrie und Ausfall einer Phase den thermischen Überlastschutz des Motors sicherzustellen, weisen hochwertige Motorschutzrelais einen Mechanismus für Phasenausfallempfindlichkeit (Differentialauslösung) auf.



Auslösung bei 3poliger Belastung



Auslösung bei 2poliger Belastung, mittleres Bimetall unbeheizt

- 1 = Bimetallstreifen
- 2 = Phasenausfallschieber
- 3 = Überlastschieber
- 4 = Differenzhebel
- 5 = Kontakthebel
- S_1 = Auslösebewegung bei Überlast
- S_2 = Auslösebewegung bei Phasenausfall
- S_3 = Öffnen des Auslösekontaktes

Fig. 4.2-11

Prinzip der Differentialauslösung bei thermischen Motorschutzrelais

Die Motorschutzrelais haben hierfür eine Doppelschieber-Anordnung in Form eines Phasenausfallschiebers und eines Überlastschiebers. Bei Phasenausfall bewegt das stromlose, sich abkühlende Bimetall den Phasenausfallschieber gegenläufig zum Überlastschieber. Über einen Differentialhebel wird diese gegenläufige Bewegung in eine zusätzliche Auslösebewegung umgewandelt (Fig. 4.2-11).

Bei Phasenausfall bewirkt diese Doppelschieber-Einrichtung eine Auslösung bei einem niedrigeren Strom als bei dreiphasiger Belastung (Kennlinie b in Fig. 4.2-13).

Einphasiger Betrieb

Beim Schutz von Einphasen-Wechselstrom- oder Gleichstromverbrauchern sind alle Pole in Serie zu schalten, um die für die Auslösung des Schaltmechanismus erforderliche Kraft sicher zu stellen und eine Auslösung durch den Phasenausfallschutz zu vermeiden (Fig. 4.2-12).

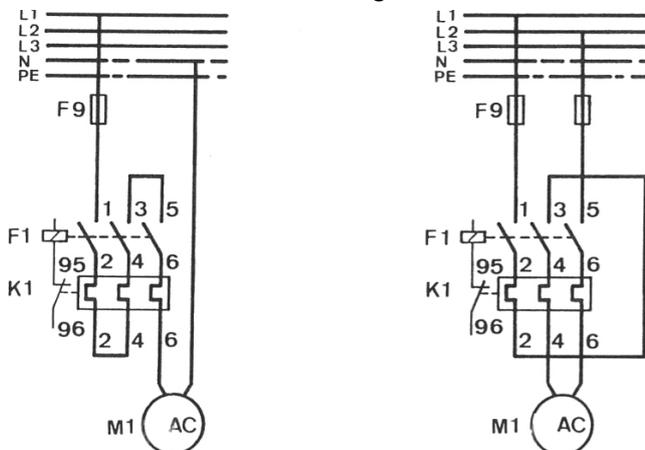


Fig. 4.2-12

Serieschaltung der Motorschutzrelais-Pole bei einphasigem Betrieb

Auslösekennlinien

Die Auslösekennlinien geben die Abhängigkeit der Auslösezeit vom Auslösestrom als Vielfaches des Einstellstromes (in der Regel Bemessungsbetriebsstrom I_e des Motors) wieder (Fig. 4.2-13). Sie werden für symmetrische dreipolige und für zweipolige Belastung aus kaltem Zustand angegeben.

Der kleinste Strom, bei dem eine Auslösung erfolgt, wird Grenz-Auslösestrom genannt. Er muss nach IEC 60947-4-1 in bestimmten Grenzen liegen (siehe Abschnitt 4.1.2.2).

Ein betriebswarmer Motor hat eine geringere Wärmereserve als ein Motor in kaltem Zustand. Dem trägt das Verhalten der Motorschutzrelais Rechnung. Wird das Motorschutzrelais längere Zeit mit dem Einstellstrom I_e belastet, so verringern sich die Auslösezeiten auf etwa ein Viertel.

Fertigungs-, Material- und Eichtoleranzen führen zu Streuungen der Auslösezeiten. Jedem Einstellbereich ist daher ein Auslösestreuband zugeordnet. Nach Vorschrift müssen vom 3- bis 8-fachen Einstellstrom I_e die Auslösezeiten in einem Toleranzband von $\pm 20\%$ der angegebenen Werte liegen.

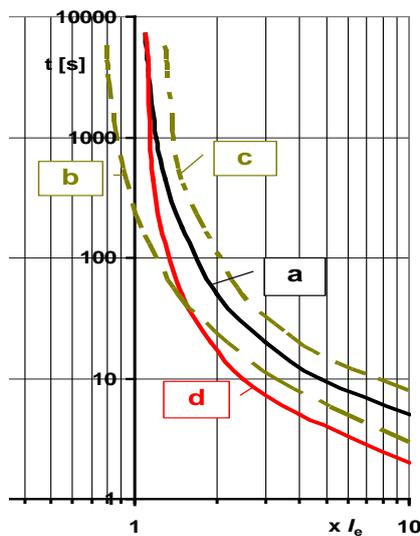


Fig. 4.2-13

Typische Auslösekennlinien eines Motorschutzrelais

I_e = Auf Skala eingestellter Nennstrom

t = Auslösezeit

Aus dem kalten Zustand:

a = 3polige Belastung, symmetrisch

b = 2polige Belastung mit Differentialauslöser

c = 2polige Belastung ohne Differentialauslöser

Aus dem warmen Zustand:

d = 3polige Belastung, symmetrisch

Rückstellung nach Auslösung

Motorschutzrelais benötigen nach einer Auslösung eine bestimmte Zeit, bis sich die Bimetallstreifen wieder bis zum Rückschaltpunkt abkühlen. Diese Zeit bezeichnet man als Wiederbereitschaftszeit. Erst danach lassen sie sich wieder zurücksetzen.

Die Wiederbereitschaftszeit ist abhängig von der Höhe des Stromes, der zur Auslösung führte, und der Auslösekennlinie des Motorschutzrelais. Sie beträgt etwa 30 bis 50 s nach einer Auslösung beim 2- bis 6-fachen Wert des Einstellstromes.

Moderne Motorschutzrelais haben eine Automatik- und Hand-Reset-Funktion. Die gewünschte Funktion ist an den Relais wählbar. In der Stellung Hand-Reset wird ein selbsttätiges Wiedereinschalten vermieden. Erst nach ausreichender Abkühlung der Bimetallstreifen lassen sich die Relais durch Drücken der Reset-Taste zurückschalten. Die Hilfsschalter kehren dann in ihre Ausgangslage zurück und ermöglichen ein Einschalten des zugeordneten Schützes.

Wie von den IEC- und nationalen Vorschriften verlangt, verfügen die Motorschutzrelais über eine Freiauslösung, d.h. es erfolgt eine normale Schutz-Auslösung, sollte bei gedrückter Rücksteltaste eine Überlast auftreten.

In der Automatik-Reset-Stellung schalten die Kontakte bei Abkühlung der Bimetallstreifen automatisch zurück.

Motorschutzrelais mit Automatik-Reset sollen aus Sicherheitsgründen nur in Schaltungen verwendet werden, deren Schütze mit Impulskontaktgabe (Taster) betätigt werden. Bei Hand-Reset dürfen sie auch in Schaltungen mit Dauerkontaktgabe der Schütze verwendet werden.

Zur Fernrückstellung von Motorschutzrelais sind Rückstellmagnete erhältlich, die auf die Motorschutzrelais montiert werden können.

Test-Funktion und O-Taste

Mit der Test-Funktion kann das Funktionieren der Hilfsschalter und des angeschlossenen Steuerstromkreises eines betriebsbereiten Überlastrelais überprüft werden. Es wird damit eine Auslösung des Relais simuliert.

Mit der O -Taste wird der Öffner geöffnet solange die Taste gedrückt ist. Dadurch kann das nachgeschaltete Schütz und damit der Motor abgeschaltet werden. Diese Funktion wird vielfach bei einfachen Startern im Kleingehäuse verwendet.

Kurzschlussfestigkeit

Siehe auch Abschnitt **2.3.4.5**. Gemäss IEC 60947-4-1 müssen Motorschutzrelais gegen Kurzschluss so geschützt sein, dass sie durch den Kurzschlussstrom entweder funktionsunfähig werden und auszutauschen sind (Koordinationstyp 1) oder ihre volle Funktionsfähigkeit erhalten (Koordinationstyp 2). Gegen Beschädigung durch Kurzschlussströme müssen die thermischen Motorschutzrelais durch Leistungsschalter oder Sicherungen geschützt werden. Die Sicherungswerte für den jeweiligen Koordinationstyp sind den technischen Unterlagen zu entnehmen. Die Kurzschlussfestigkeit von direkt beheizten Motorschutzrelais ist höher als die von indirekt beheizten.

4.2.4.2 Elektronische Motorschutzrelais

Elektronische Motorschutzrelais decken ein breites Spektrum von Geräten zum Schutz und zum optimalen Betrieb von Motoren und Anlagen ab. Aufgrund dieser Vielfalt kann nachstehend nur auf einige wesentliche Aspekte eingegangen werden, die bei der Auswahl und beim Einsatz von elektronischen Motorschutzrelais von Bedeutung sind. Abschnitt **4.1.2.4** zeigt eine Auswahl von Funktionen, die von elektronischen Motorschutzrelais angeboten werden. Das Angebot von Geräten reicht von einfachen und kostengünstigen Ausführungen, die für den Einsatz anstelle von thermischen (z.B. Bimetall-) Motorschutzrelais konzipiert sind, bis zu sehr komplexen Geräten mit einer Vielfalt von Funktionen, Kommunikationsanbindung etc.

4.2.4.2.1 Wirkungsweise

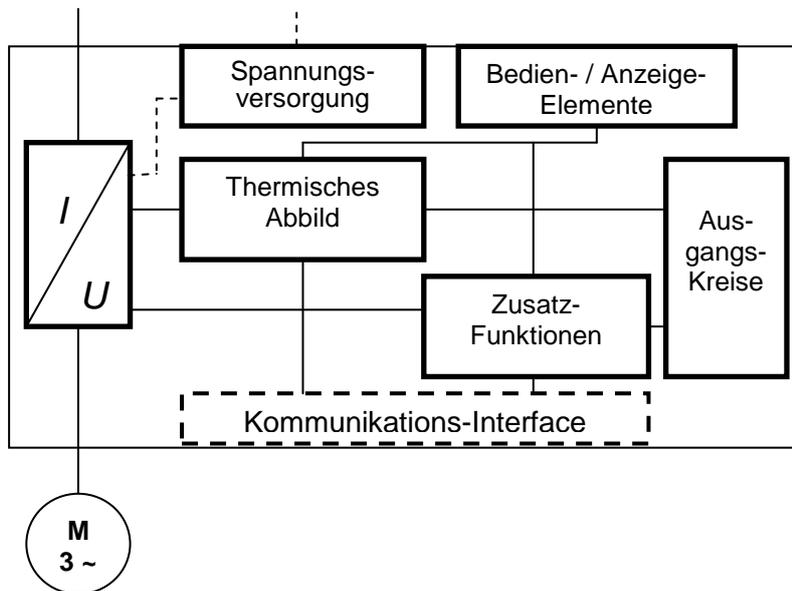


Fig. 4.2-14
Grundsätzliche Funktionsbausteine von elektronischen Motorschutzrelais

Strommessung

Zur Verarbeitung in den nachgeschalteten elektronischen Kreisen wird der Motorstrom gemessen und in ein Elektronik-kompatibles Signal umgewandelt. Je nach Funktionsweise der Elektronik kann dieses Signal ein analoges (eher bei einfachen Geräten) oder ein digitales (bei komplexeren Geräten) sein. Für die Messung werden meist Stromwandler oder Magnetfeld-Sensoren (z.B. Hall-Sensoren) eingesetzt. Da die Signalverarbeitung elektronisch erfolgt, ist beinahe leistungslose Messung möglich. Dies trägt zu einem wesentlichen Anwendungsvorteil elektronischer Motorschutzrelais bei, der geringen Verlustleistung, die die Schaltschrankklimatisierung erleichtert.

Ein weiterer Vorteil der elektronischen Signalverarbeitung sind breite Strombereiche der Geräte, was zu einer wesentlichen Reduktion der Anzahl Varianten im Vergleich zu thermischen Motorschutzrelais führt und die Projektierung und Lagerhaltung vereinfacht. Dazu kommt in der Regel eine höhere Grenzstromgenauigkeit dank enger Toleranzen der verwendeten Komponenten. IEC 60947-4-1 hat mit der Einführung zusätzlicher Auslöseklassen den technischen Möglichkeiten elektronischer Motorschutzrelais Rechnung getragen ([Tab. 4.1-3](#)).

Je nach Funktionsprinzip der Stromerfassung bestehen Einschränkungen bezüglich des zulässigen Frequenzbereiches. Bei Verwendung von Stromwandlern sind Frequenzen deutlich unter der Netzfrequenz wegen Sättigung nicht zulässig, im Besonderen sind auch Anwendungen bei Gleichstrom nicht möglich. Anwendungen mit frequenzgesteuerten Antrieben bedürfen besonderer Abklärung.

Die Kurzschlussfestigkeit der Hauptstromkreise ist in der Regel sehr hoch. Ausnahmen können Varianten mit kleinen Nennströmen sein, wenn Leiter mit kleinen Querschnitten verwendet werden.

Stromversorgung / interne Speisung

Einfache elektronische Motorschutzrelais, die für den Einsatz anstelle von Bimetall-Thermorelais gedacht sind, beziehen die Spannungsversorgung der elektronischen Kreise direkt aus der Messtrecke und bedürfen damit keiner Zuführung einer getrennten Steuerspannung. Die Einfachheit in der Anwendung schliesst eine Beschränkung auf die Grundfunktionen des Motorschutzes – im Wesentlichen den thermischen Schutz und den Phasenausfallschutz – ein. Soweit weitere Schutzfunktionen angeboten werden ist zu beachten, dass der Aufbau der

internen Spannungsversorgung eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen kann, während der diese Funktionen nicht zur Verfügung stehen.

Komplexere elektronische Motorschutzrelais bedürfen einer eigenen Steuerspannungsversorgung, die z.B. auch über den Kommunikationsanschluss erfolgen kann.

Thermisches Abbild

Das thermische Abbild, d.h. die Simulation der Motorerwärmung aufgrund des gemessenen Motorstroms, ist bei einfacheren Relais in der Regel ein Ein-Körper-Abbild ähnlich wie bei Bimetallrelais. Bei komplexeren Geräten kommen auch komplexere thermische Abbilder zur Anwendung, die die Motorerwärmung enger nachbilden und z.B. die unterschiedlichen Kühlverhältnisse des laufenden und stehenden Motors berücksichtigen. Damit ist eine verbesserte Eignung bei intermittierendem Betrieb gegeben. Motorschutzrelais ohne thermisches Gedächtnis sind gemäss IEC 60947-4-1 als solche (am Gerät) zu kennzeichnen (siehe auch Abschnitt 4.1.2.2).

Geräte der Top-Klasse berücksichtigen vielfach auch den Einfluss asymmetrischer Speisung auf die Motorerwärmung (siehe auch Abschnitt 4.1.2.4.2).

Ein wesentlicher Vorteil elektronischer Motorschutzrelais ist die Auslösezeit bei hohen Überströmen (Motoranlauf). Die Bildung der verschiedenen Auslöseklassen (Tab. 4.1-3) ist mit elektronischen Mitteln einfach. Der breite Toleranzbereich der einzelnen Klassen muss nicht ausgenutzt werden und die Auslösezeiten liegen in der Regel nahe der oberen Klassengrenze. Damit sind die Relais gut für Schweranlauf-Anwendungen geeignet. Bei komplexeren Relais ist die Auslöseklasse (Auslösezeit bei $7.2 \cdot I_e$) oft einstellbar und kann damit dem Motor und der Applikation angepasst werden.

Der Phasenausfallschutz führt bei elektronischen Motorschutzgeräten in der Regel zu einer kurzverzögerten (einige Sekunden) Auslösung, weil der Ausfall einer Phase an den gemessenen Signalen unmittelbar erkennbar ist. Die Kurzverzögerung dient der Vermeidung von Fehlauflösungen, z.B. bei Kurzunterbrechungen des speisenden Netzes.

Zusatzfunktionen

Abschnitt 4.1.2.4 gibt einen Überblick über Funktionen, die vielfach von elektronischen Motorschutzrelais angeboten werden. Die Vielfalt des Angebotes ist gross und im Einzelfall sind die Unterlagen des jeweiligen Gerätes massgebend.

Ein Vorteil elektronischer Motorschutzgeräte ist die Verfügbarkeit verschiedener Funktionen in einem Gerät und Zugang zu Geräte-internen Signalen. So werden z.B. Strom messende Motorschutzgeräte mit Eingängen für Temperaturfühler angeboten.

Ausgänge - z.B. für den gemessenen Motorstrom - erübrigen gesonderte Messkreise und insbesondere der Zugang zum „Erwärmungszustand“ des thermischen Abbildes gestattet die Einbindung der Geräte in die Steuerungsumgebung. So können durch Abgabe von Vorwarnungen Schutzauflösungen vermieden werden oder – soweit es die Prozesse zulassen – die Motorbelastung gemäss gemessener Erwärmung gesteuert werden. Eine Einbindung in das Kommunikationssystem der Anlage macht das Motorschutzgerät zur integrierten Steuerungskomponente.

Für die Fehlersuche nach Schutzabschaltungen oder für den Unterhalt können Speicherfunktionen nützlich sein, die z.B. die Betriebsdaten vor einer Schutzabschaltung festhalten oder statistische Daten über den Betrieb des Antriebs sammeln. Solche Daten werden vielfach von microprozessor-gestützten Geräten angeboten.

4.2.4.3 Thermistor-Schutzrelais

Siehe auch Abschnitt 4.1.2.3.

4.2.4.3.1 Relais für PTC-Fühler

PTC-Fühler (**P**ositive **T**emperature **C**oefficient) werden weitaus am häufigsten bei Niederspannungsmotoren zur Messung der Wicklungstemperatur eingesetzt. Sie weisen bei der Bemessungs-Ansprechtemperatur TNF eine steile Zunahme ihres Widerstandes auf (Fig. 4.2-15) und ermöglichen damit einfache und kostengünstige Auslösegeräte. Die Fühler – normal je 1 pro

Phase - werden vom Motorhersteller in die Wicklungen eingelegt und in Serie geschaltet auf Klemmen geführt. Die Bemessungs-Ansprechtemperatur TNF wird gemäss Isolationsklasse gewählt. Wird eine Vorwarnung vor Auslösung gewünscht, ist der Einbau eines zweiten Satzes Temperaturfühler mit niedrigerer Ansprechtemperatur erforderlich, der an ein zweites Auslösegerät angeschlossen wird.

Um die Funktionsfähigkeit des Schutzes sicher zu stellen, überwachen moderne Auslösegeräte den Messkreis auf Kurzschluss und Unterbrechung.

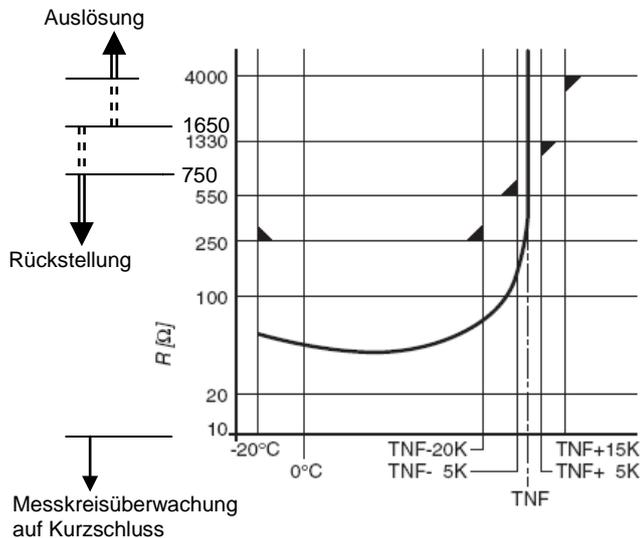


Fig. 4.2-15

Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines Typ-A-Kaltleiterfühlers und Schaltschwellwerte des Auslösegerätes gemäss IEC 60947-8 ed. 1.1. Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch. (TNF = Bemessungsansprechtemperatur)

4.2.4.3.2 Relais für NTC-Fühler

Die Charakteristik von NTC-Fühlern (**N**egative **T**emperature **C**oefficient) weist abnehmenden Widerstand bei steigender Temperatur auf. Sie werden in Sonderfällen eingesetzt und bedürfen eines Auslösegerätes mit einstellbarer Ansprechschwelle. Mit einem Satz Fühler können Vorwarnung und Auslösung realisiert werden.

4.2.4.3.3 Metallwiderstands-Fühler

Diese Fühler – z.B. Pt 100, Ni 100, Ni 120, Cu 10 - finden vor allem bei Mittel- und Hochspannungsmotoren Anwendung. Sie werden sowohl für die Messung der Wicklungstemperaturen wie auch anderer Maschinenteile wie z.B. den Lagern eingesetzt. Auslösegeräte haben eine entsprechend grössere Anzahl von Eingängen. Die Ansprech- und Warnniveaus sind einstellbar. Vielfach werden wichtige Temperaturwerte auch auf Anzeigen geführt.

5 Steuerstromkreise

5.1 Gebrauchskategorien

IEC 60947-5-1 legt die Anforderungen an elektromechanische Geräte für Steuerstromkreise fest. Mit den Gebrauchskategorien AC-12 bis AC-15 und DC-12 bis DC-14 sind auch für Schaltgeräte in Steuerstromkreisen Referenzanwendungen festgelegt, die die Geräteauswahl erleichtern (**Tab. 5.1-1**; siehe auch **Tab. 1.1-1** in Abschnitt **1.1**).

Stromart	Gebrauchskategorie	Typische Anwendung	Zutreffende IEC-Gerätenorm
Wechselspannung	AC-12	Steuern von ohmscher Last und Halbleiterlast mit Trennung durch Optokoppler	60947-5-1
	AC-13	Steuern von Halbleiterlast mit Trenntransformatoren	
	AC-14	Steuern von kleiner elektromagnetischer Last (≤ 72 VA)	
	AC-15	Steuern von elektromagnetischer Last bei Wechselspannung (> 72 VA)	
Gleichspannung	DC-12	Steuern von ohmscher Last und Halbleiterlast mit Trennung durch Optokoppler	60947-5-1
	DC-13	Steuern von Elektromagneten bei Gleichspannung	
	DC-14	Steuern von elektromagnetischer Last bei Gleichspannung mit Sparwiderständen im Stromkreis	

Tab. 5.1-1

Gebrauchskategorien für Steuerstromkreise gemäss IEC 60947-5-1 ed.3.0
Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Die Norm legt auch die Prüfbedingungen für die einzelnen Gebrauchskategorien fest, so dass die Leistungen gemäss Gebrauchskategorie definiert und vergleichbar sind. Die Bemessungswerte eines Kontaktes umfassen neben der Gebrauchskategorie die Bemessungsspannung und den Bemessungsstrom bzw. die Bemessungs-Scheinleistung. Bei der Geräteevaluation sind diese Daten mit jenen der zu schaltenden Last zu vergleichen.

Die Leistungsdaten gemäss Gebrauchskategorie kennzeichnen die maximale Belastbarkeit der Schaltelemente. In Anwendungen mit elektronischen Geräten ist wegen der niedrigen Pegel von Spannung und Strom die Kontaktsicherheit das Hauptkriterium für die Auswahl, d.h. die Zuverlässigkeit, mit der kleine Signalpegel geschaltet werden. Siehe Abschnitt **5.3.5**.

5.2 Steuerspannungen

5.2.1 Wechselspannung

Als Steuerspannungen kommen Wechsel- und Gleichspannung in Frage. Im Fall von Wechselspannung schreibt IEC 60204-1 (Maschinensicherheit – Elektrische Ausrüstung von Maschinen) vor, dass die Steuerspannung über Transformatoren mit getrennten Wicklungen gespeist werden muss. Bei Verwendung mehrerer Steuertransformatoren oder eines Steuertransformators mit mehreren Sekundärwicklungen ist empfohlen, die Schaltungen so auszulegen, dass die Sekundärspannungen in Phase sind. Auf Steuertransformatoren kann bei Maschinen mit nur einem (1) Motorstarter und/oder maximal zwei Befehlsstellen verzichtet werden. Die maximale Nennspannung ist 277 V, übliche Vorzugswerte sind 110 V und 230 V. Auch 24 V gewinnt zunehmenden Anteil.

Die Verwendung von Steuertransformatoren hat u.a. den guten Grund, dass im Fall eines Kurzschlusses im Steuerstromkreis der prospektive Kurzschlussstrom durch die Impedanz des Steuertransformators begrenzt wird und damit Verschweissungen von Steuerkontakten weitgehend vermieden werden können. Dies findet seinen Ausdruck auch darin, dass die Kurzschlussprüfungen für Steuerkontakte gemäss IEC 60947-5-1 bei einem prospektiven Kurzschlussstrom von 1000 A durchgeführt werden.

Die Wahl der Steuerspannung hat u.a. Einfluss auf die Höhe der fließenden Ströme. Hier sind insbesondere die Anzugsströme grosser magnetischer Lasten (z.B. grosser Schütze) zu beachten. Schaltkontakte und Leiterquerschnitte sind entsprechend zu wählen bzw. zu dimensionieren, um Belastungsgrenzen einzuhalten und den Spannungsabfall in zulässigen Grenzen zu halten.

5.2.1.1 Steuertransformatoren für Steuerungen mit Schützen

Schütze haben gemäss IEC 60947-4-1 einen normalen Steuerspannungsbereich von 85 % – 110 % der Bemessungssteuerspeisespannung, d.h. sie schliessen und halten innerhalb dieser Spannungsgrenzen zuverlässig. Vielfach sind Schütze mit erweitertem Steuerspannungsbereich erhältlich, z.B. 80 % - 110 % oder 115 %. Wegen der hohen Anzugsströme von Wechselstrommagneten ist – vor allem beim Einsatz grosser Schütze und beim gleichzeitigen Schalten mehrerer Schütze - darauf zu achten, dass die untere Spannungsgrenze nicht unterschritten wird. Dies könnte dazu führen, dass Schütze nicht voll anziehen und über einen längeren Zeitraum der hohe Anzugsstrom fliesst. Ein Verbrennen der Spule und / oder Verschweissen der Hauptkontakte kann die Folge sein.

Für Steuertransformatoren, die elektromagnetische Lasten wie Schütze speisen, ist die Kurzzeitleistung $P_{S(S6)}$ ein wichtiges Auswahlkriterium. Der Einbruch der Sekundärspannung im Vergleich zur Bemessungsspannung darf bei dieser Leistung höchstens 5% sein. Im Einzelfall ist die Spitzenbelastung des Steuertransformators zu ermitteln und der Steuertransformator in Anbetracht zu erwartender Netzspannungsschwankungen entsprechend zu wählen. Vielfach kann man als Worst-Case davon ausgehen, dass das grösste Schütz einer Steuerung bei einer gewissen Grundbelastung des Transformators noch sicher anziehen muss.

5.2.1.2 Frequenzen <50 Hz und >60 Hz

Übliche Wechselstromantriebe sind für 50 Hz bzw. 60 Hz bemessen. In der Regel finden sich die Spannungsangaben für beide Frequenzen in den technischen Unterlagen. Vielfach sind auch bifrequente Ausführungen erhältlich, d.h. die Geräte sind bei der gleichen Bemessungsspannung in Netzen mit 50 Hz und 60 Hz einsetzbar. Bifrequente Ausführungen sind für die Exportindustrie vorteilhaft, können doch die gleichen Geräte für alle Märkte – allenfalls mit einer Anpassung der Spannungshöhe (Anzapfung des Steuertransformators) – verwendet werden. Für Steuerungen, bei denen diese Flexibilität nicht relevant ist, empfiehlt es sich, Schütze für eine (1) Bemessungsfrequenz zu bevorzugen, da der Toleranzbereich der Steuerspannung und die mechanische Lebensdauer enger bzw. günstiger sind.

Für Bahnanwendungen bei 16 2/3 Hz und Anwendungen bei 400 Hz (Flughäfen, Militär) müssen Geräte mit Gleichstromantrieben verwendet werden und – soweit eine Gleichstromversorgung nicht ohnehin schon vorhanden ist – die Wechselspannung gleichgerichtet werden.

5.2.2 Gleichspannung

Gleichspannung als Steuerspannung wird in einem grossen und wachsenden Bereich eingesetzt. Typische Anwendungen sind Anlagen auf Fahrzeugen (z.B. Kühlaggregate), stationäre batteriebetriebene Anlagen (EVU-Bereich) und stetig wachsend elektronische Steuerungen in der Industrie und Gebäudetechnik.

Bevorzugte Gleichspannungen sind 24 V (Industrie, Fahrzeuge), 48 V (Fahrzeuge) und 110 V, 220 V ... 250 V (EVU-Bereich, Hochvoltbatterien, regenerative Energiegewinnung).

In Hinblick auf den breiten Variationsbereich von Batteriespannungen auf Fahrzeugen (Überladung und tiefe Entladung) werden Schütze mit erweitertem Spannungsbereich angeboten (z.B. $0.7 \dots 1.25 U_N$).

Qualität der Gleichspannung

Bei Gleichspannung als Steuerspannung ist zusätzlich zum Toleranzbereich der Spannung der Oberschwingungsgehalt (Welligkeit) zu beachten. Batteriegespeiste Systeme verfügen in dieser Hinsicht über eine ideale Spannungsquelle ohne Oberschwingungen. Auch geschaltete Netzteile weisen gut geglättete Gleichspannungen auf.

Wird die Gleichspannung aus Wechselfspannung durch Gleichrichtung gewonnen, ist der Oberschwingungsgehalt je nach Schaltung verhältnismässig gross und zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist in diesen Fällen zu beachten, dass der arithmetische Mittelwert der Spannung die massgebende Grösse für das Anzugsverhalten von konventionellen Elektromagneten ist. Zweiweg-Gleichrichtung (Graetz-Gleichrichter) ist zur Speisung von konventionellen Schützspulen in der Regel zulässig. Drehstrombrückenschaltungen mit einer Welligkeit von etwa 5 % ebenfalls.

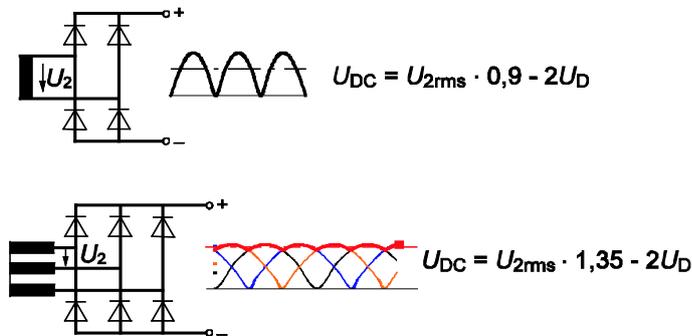


Fig. 5.2-1
Gleichrichterschaltungen zur Speisung von elektromagnetischen Kreisen

Bei der Ansteuerung und Speisung von Schützen mit elektronischer Spulenansteuerung ist zu beachten, dass der Augenblickswert der Gleichspannung einen gewissen Minimalwert nicht unterschreiten darf. Dies in Hinblick auf die Funktion der elektronischen Schaltung. Es sind die Angaben zum jeweiligen Produkt bezüglich Qualität der Gleichspannung zu beachten. Besonders bei grossen Schützen und kleiner Steuerspannung (z.B. 24 V) kann die Stromaufnahme der Geräte kurzzeitig in den Bereich von weit über 10 A gehen. In diesen Fällen ist dafür zu sorgen, dass entsprechend leistungsfähige Speisegeräte verwendet werden und auf den Verbindungen zwischen Speisung und Schütz möglichst geringe Spannungsabfälle entstehen (kurze Verbindungen, grosser Querschnitt, kein Schlaufen, gute Qualität der Klemmverbindungen). Unstabilisierte Speisegeräte mit Zweiweg-Gleichrichtung und Glättungskondensator stossen in diesen Anwendungen bald an ihre Grenze.

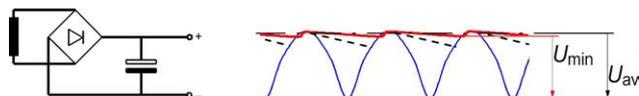


Fig. 5.2-2
Einfache Graetz-Gleichrichter mit kapazitiver Glättung führen bei höheren Belastungströmen zu tiefer Entladung zwischen den Halbperioden (strichliert), die bei elektronisch gesteuerten Schützen und anderen elektronischen Geräten Fehlfunktionen verursachen können.

5.3 Schalten von Schützen

5.3.1 Wechselstromantriebe

5.3.1.1 Konventionelle Wechselstromantriebe

Wechselstrom-Magnetantriebe zeichnen sich durch einen hohen Einschaltstrom aus, der bei geöffnetem Magnetsystem fliesst und durch die geringe Spulenimpedanz (grosser Luftspalt) bedingt ist. Die Gebrauchskategorien AC-14 und AC-15 berücksichtigen dieses Verhalten. Der hohe Einschaltstromstoss belastet die Spule thermisch und begrenzt die zulässige Schalthäufigkeit. Besonders bei kleinen Steuerspannungen und grossen Schützen sind die Spannungsabfälle im Steuerstromkreis zu beachten, um sicheres Anziehen zu gewährleisten.

Beim Abschalten von Schützen ist die Induktivität wegen des geringen Restluftspalts gross. Dies führt zu entsprechender Lichtbogenbelastung des Steuerkontaktes und zu Schaltüberspannungen. Externe Überspannungsschutzbeschaltungen können erforderlich sein (siehe Abschnitt 5.3.3.1).

5.3.1.2 Elektronische Spulenansteuerung

Mittels elektronischer Schaltmittel ist es möglich, die Betriebsbedingungen für ein Schütz-Magnetsystem zu optimieren und die Ansteuerung optimal den Anwenderbedürfnissen anzupassen. So können Spannungsschwankungen vom Magnetsystem ferngehalten werden, damit die Leistungsaufnahme optimiert und die Anzugs- und Abfallwerte klar definiert werden. Nach Wahl des Anwenders kann die Ansteuerung konventionell durch Anlegen der Steuerspannung erfolgen oder durch ein SPS-Signal direkt oder auch via einen Steuereingang.

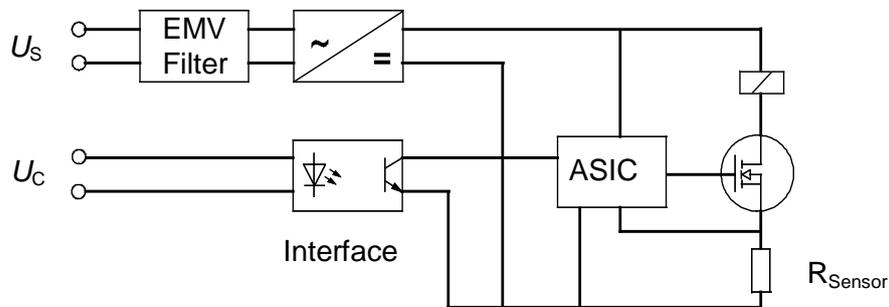


Fig. 5.3-1

Beispiel einer elektronischen Ansteuerung eines Schütz-antriebes mit separatem Steuereingang

U_s Steuerspeisespannung
 U_c Steuerspannung (SPS)

Die Vorteile elektronisch angesteuerter Schütz-magnetsysteme sind:

- Weiter Steuerspannungsbereich
- Geringe Leistungsaufnahme
- Klare Anzugs- und Abfallspannungen
- Gute Unterspannungssicherheit
- Direkte SPS-Ansteuerung
- Integrierte Überspannungs-Schutzbeschaltung
- EMV-Kompatibilität
- Geringe Baugrösse (meist gleich wie Schütze mit konventionellem Antrieb)
- Geringe Geräusentwicklung

5.3.2 Gleichstromantriebe

5.3.2.1 „Konventionell“

Um die erforderlichen Kräfte für das Anziehen der Schütze zu erzielen und die Halteenergie zu optimieren braucht es bei Gleichstrom grössere Magnetsysteme mit spezieller Formgebung der Pole. Dies führt einerseits zu einer grösseren Tiefe der Geräte über der Grundfläche, andererseits zu einem sanfteren Einschalten und vergleichsweise geringer Stromaufnahme beim Anziehen. Die Anzugsleistung ist gleich der Halteleistung. Die Beanspruchung der Ansteuerkontakte beim Ausschalten ist wegen der hohen Induktivität der Spulen verhältnismässig gross und in der Gebrauchskategorie DC-13 berücksichtigt.

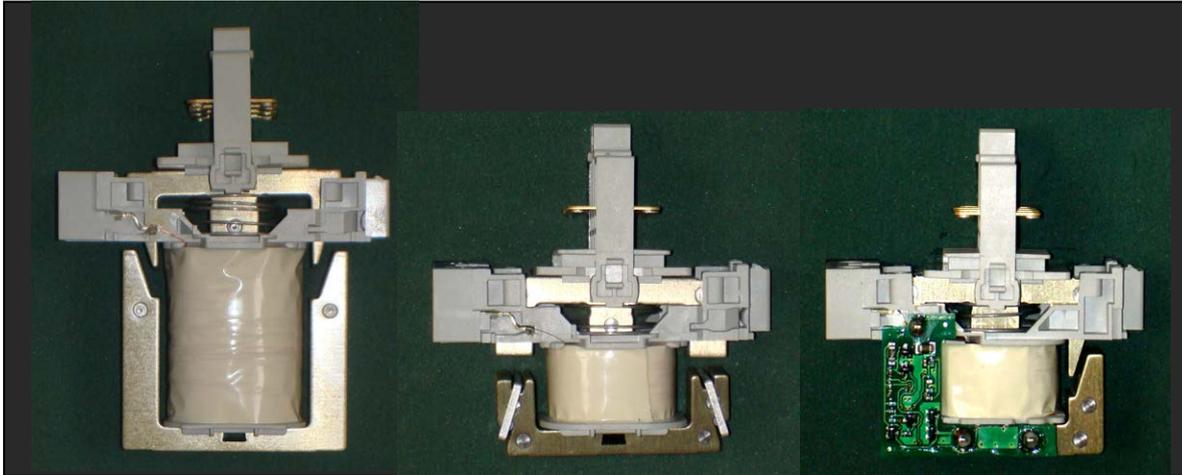


Fig. 5.3-2
 Konventionelles Gleichstrom-Magnetsystem im Vergleich zu einem Wechselstrom-Magnetsystem und zu einem Magnetsystem mit elektronischer Spulenansteuerung (Baugröße gleich für Wechsel- und Gleichstrom)

5.3.2.2 Doppelwicklungs-Spulen

Gleichstrom-Schütze mit Doppelwicklungsspule sind Schütze mit Wechselstrommagneten und einer Anzugs- und Haltewicklung. Die Baugröße ist gleich wie bei Wechselstromschützen. Die Schütze schalten mit Hilfe einer Anzugswicklung mit niedriger Impedanz und entsprechend höherem Anzugsstrom ein. Nach dem Schliessen des Magnetsystems wird die Erregung durch einen Hilfsschalter auf die niedrigere Halteleistung umgeschaltet. Der Hilfsschalter kann im Gerät integriert oder – meist bei kleineren Schützen – angebaut sein.

5.3.2.3 Elektronische Spulenansteuerung

Elektronische Spulenansteuerung ist auch für Schütze mit Gleichstromspeisung erhältlich. Die Charakteristiken und Vorteile entsprechen jenen mit Wechselstromspeisung. Siehe Abschnitt [5.3.1.2](#).

5.3.3 Elektromagnetische Verträglichkeit und Schutzbeschaltung

Konventionelle Schaltgeräte ohne aktive elektronische Schaltungen wie geschaltete Regler zur Ansteuerung von Schützspulen werden aus EMV-Sicht zur normalen Steuerungsumgebung gezählt. Obwohl diese Geräte beim Schalten kurzzeitig sehr hohe und steile Überspannungen erzeugen können, sind aus EMV-Sicht keine Gegenmassnahmen vorgeschrieben. Die Pegel der Immunitätsprüfungen im Industriebereich sind derart angelegt, dass andere Geräte bei diesen Störpegeln in der Regel zuverlässig arbeiten.

Geräte mit aktiven elektronischen Schaltungen wie Schütze mit elektronischer Spulenansteuerung sind wie alle anderen elektronischen Geräte den einschlägigen Immunitäts- und Emissionssprüfungen unterworfen. Für Industrieschaltgeräte entsprechen die Pegel dem **Umgebungsbereich A „Industrie“** (hohe Störimmunität, hohe Störausstrahlungen). Werden Geräte wie Schütze mit elektronischer Spulenansteuerung im **Umgebungsbereich B „Wohnbereich/Gewerbe/Kleinindustrie“** (geringere Störimmunität, geringere Störausstrahlungen) verwendet, so ist darauf zu achten, dass die Geräte auch für diesen Anwendungsbereich geprüft sind. Umgekehrt sind Geräte für den Umgebungsbereich 1 nicht für den Einsatz in der Industrie mit dem dort höheren Störpegel geeignet und zugelassen.

Neben der Auswahl von Geräten für den gegebenen Umgebungsbereich sind die Anweisungen der jeweiligen Gerätehersteller bezüglich Montage und Anschluss (z.B. geschirmte Leitungen) zu beachten, um EMV-Kompatibilität der Schaltgerätekombination zu erzielen.

5.3.3.1 Schutzbeschaltung in Spulenkreisen

Beim Schalten magnetischer Lasten mit hoher Induktivität wie z.B. Schützspulen, können trotz obenstehender Ausführungen Schaltüberspannungen in Höhe von einigen kV und mit Flankensteilheiten im Bereich von μs bis ns auftreten, die die Funktion anderer Geräte stören. Während des Öffnungsvorgangs des ansteuernden Kontaktes kommt es zu wiederholten Rückzündungen (Schauerentladungen), da die Induktivität der Spule den Stromfluss aufrecht erhält und der sich öffnende Kontakt nicht schlagartig seine Spannungsfestigkeit gewinnt (Fig. 5.3-3). Diese Schauerentladungen führen auch zu erhöhtem Verschleiss am schaltenden Steuerkontakt. Bezüglich Störwirkung ist nicht nur die Höhe der erzeugten Überspannungen entscheidend, sondern in Hinblick auf die extrem kurzen Reaktionszeiten von elektronischen Kreisen auch deren Anstiegs- und/oder Abfallzeit. Rasche Signale koppeln sich über Streukapazitäten in andere Signalkreise ein.

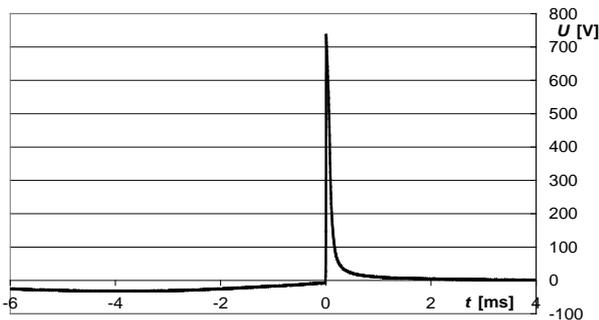


Fig. 5.3-3
Oszillogramm des Spannungsverlaufs bei der Abschaltung einer 24 V-Spule ohne Schutzbeschaltung

Die beste Gegenmassnahme ist die Behebung der Störung am Entstehungsort. Dafür werden Beschaltungselemente für die störenden Spulen angeboten, als An- oder Aufbauelemente (steckbar oder zu verdrahten) oder im Schütz integriert. Tab. 5.3-1 gibt einen Überblick über die Alternativen und deren wichtigste Merkmale. Beschaltungsmassnahmen, die an sich nur die Amplitude der Überspannungen begrenzen sind insofern auch bezüglich der dynamischen Störungen (begrenzt) wirksam, als sie die Dauer der Schauerentladungen verkürzen und deren Amplitude begrenzen.

Technische Lösung		Eignung für		Begrenzung von		Funktionsmerkmale
		a.c.	d.c.	Amplitude	Steilheit	
RC-Glied		X	X	X	X	Begrenzungen von der Dimensionierung abhängig
Varistor		X	X	X		Amplitudenbegrenzung bei der Ansprechspannung des Varistors. Max. Spannungshub $\hat{U}_C + U_V$
Diode		---	X	X		Polaritätsrichtig anzuschliessen. Verlängerte Abschaltzeit. Max. Spannungshub U_C
Bidirektionale Z-Diode			X	X		Geringe Verlängerung der Abschaltzeit. Max. Spannungshub $U_C + U_Z$

Tab. 5.3-1
Schutzbeschaltungsmassnahmen für Schütze

U_C Steuerspannung
 U_V Varistor-Ansprechspannung
 U_Z Begrenzungsspannung der Z-Diode

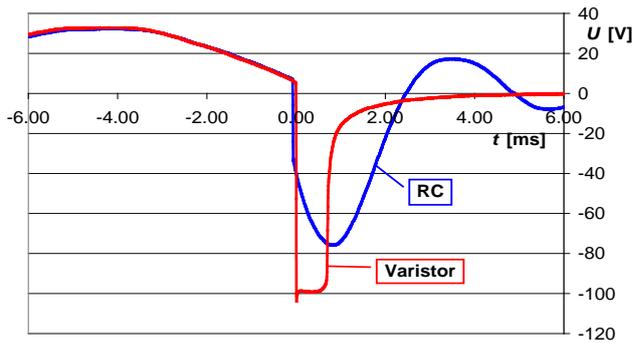


Fig. 5.3-4
Oszillogramm des Spannungsverlaufs bei der Abschaltung einer 24 V-Spule mit Schutzbeschaltung

5.3.4 Einfluss langer Steuerleitungen

5.3.4.1 Spannungsabfall

Gemäss IEC 60947-4-1 und IEC 60947-5-1 ist der normale Steuerspannungsbereich von Leistungs- und Steuerschützen 85 ... 110 % der Bemessungs-Steuerspannung. Innerhalb dieser Grenzen ziehen Schütze einwandfrei an. Vielfach werden Schütze mit erweitertem Steuerspannungsbereich angeboten, so z.B. bei Schützen mit elektronischer Spulenansteuerung. Die technischen Unterlagen der verwendeten Geräte sind massgebend.

Bei kleinen Steuerspannungen und langen Steuerleitungen kann der Spannungsabfall in den Leitungen zum Schütz (Hin- und Rückleitung!) so gross werden, dass ein sauberes Anziehen nicht mehr gewährleistet ist. Die Folge davon kann neben verbrannten Spulen auch ein Verschweissen der Hauptkontakte sein. Es ist daher darauf zu achten, dass unter Einbezug von

- Netzspannungsschwankungen
- Spannungseinbruch am Steuertransformator bei Spitzenbelastung (siehe Abschnitt 5.2.1.1) und
- Spannungsabfall an den Steuerleitungen

die minimale Anzugsspannung stets gewährleistet ist.

Für den Spannungsabfall auf den Steuerleitungen gilt näherungsweise:

$$u_R = \frac{S \cdot 100 \cdot l}{U_C^2 \cdot \kappa \cdot A} [\%]$$

bzw. für die maximale Leitungslänge bei gegebenem zulässigem Spannungsabfall

$$l_{\max} \approx \frac{u_R}{100} \cdot \frac{U_C^2}{S} \cdot \kappa \cdot A$$

l	Leitungslänge (Hin- und Rückleitung) [m]
l_{\max}	maximale Leitungslänge (Hin- und Rückleitung) [m]
u_R	prozentualer Spannungsabfall [%]
U_C	Bemessungssteuerspannung [V]
S	Anzugsleistung des Schützes [VA]
κ	Leitfähigkeit des Leitermaterials [$\text{m} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$] = 57 für Kupfer
A	Leiterquerschnitt [mm^2]

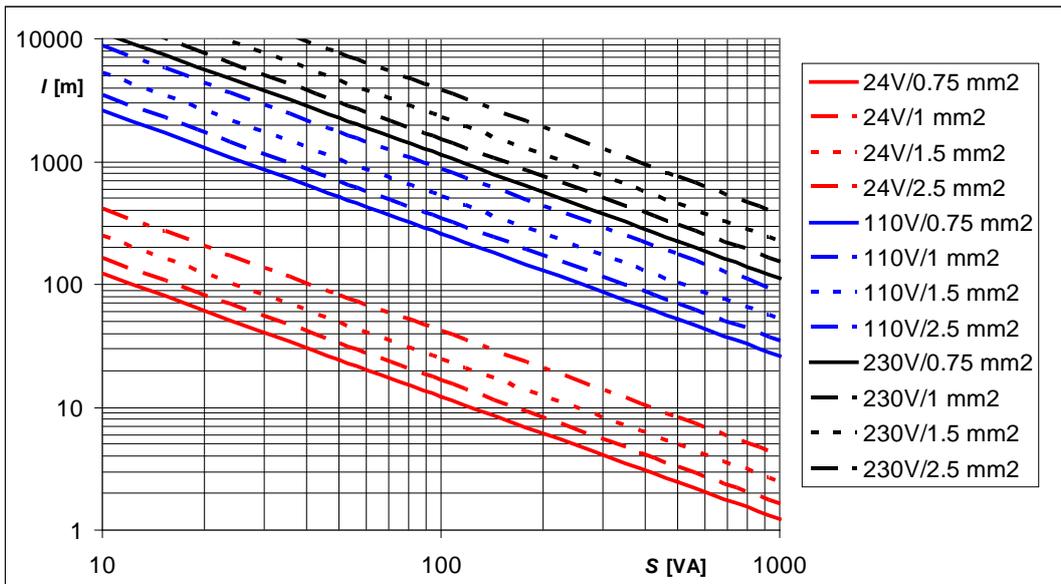


Fig. 5.3-5
 Leitungslängen für einen Spannungsabfall von 5 % und Kupferleitungen
 l Leitungslänge (Hin- und Rückleitung)
 S Scheinleistung der Last

5.3.4.2 Einfluss der Kabelkapazität

Bei Wechselstromsteuerungen mit langen Steuerleitungen, kleinen Spulenleistungen der Schütze und hoher Steuerspannung kann je nach Art der Schaltung die Kapazität der Steuerleitung parallel zum ansteuernden Kontakt liegen und diesen im geöffneten Zustand quasi überbrücken. Das kann dazu führen, dass bei geöffnetem Steuerkontakt über die Kabelkapazität ausreichend Strom fließt, dass das Schütz nicht abfällt. Als Beispiel sei ein Schütz genannt, das von einem weit entfernten Sensor (z.B. Endschalter) angesteuert wird.

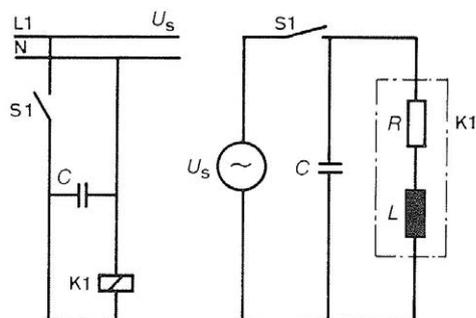


Fig. 5.3-6
 Wenn der Steuerkontakt beim Abschalten das Kabel zum Schütz spannungslos schaltet, bewirkt die Kapazität der Leitung höchstens eine geringe Abfallverzögerung.

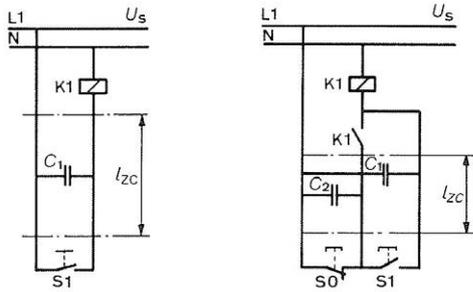


Fig. 5.3-7

Bleibt die lange Steuerleitung zum Schütz bei geöffnetem Steuerkontakt unter Spannung, kann der Strom über die Kabelkapazität ein Abfallen des Schützes verhindern. Bei Impulskontaktsteuerung wird die Kapazität der Leitungen zweimal wirksam, wodurch sich die zulässige Leitungslänge halbiert.

Unter den vereinfachenden Annahmen von

$$I_H = 0.25 I_{CN}$$

$$U_H = 0.6 U_C$$

$$\cos \varphi = 0.3$$

I_H Haltestrom des Schützes

I_{CN} Nennstrom der Schützspule

U_H Abfallspannung des Schützes

U_C Steuerspannung

$\cos \varphi$ Leistungsfaktor der Schützspule (angezogen)

errechnet sich die zulässige Kabelkapazität bei 50 Hz näherungsweise zu

$$C_Z \approx 500 \cdot S_H / U_C^2 \text{ [}\mu\text{F]}$$

C_Z zulässige Kabelkapazität [μF]

S_H Halteleistung bei U_C [VA]

U_C Steuerspannung [V]

Bei einer mittleren Kabelkapazität von 0.3 $\mu\text{F}/\text{km}$ ergibt sich eine zulässige Leitungslänge bei Dauerkontaktsteuerung von

$$l_z = \frac{500 \cdot 10^3}{0.3} \cdot \frac{S_H}{U_c^2} \text{ [m]}$$

Bei Impulskontaktsteuerung halbiert sich die Leitungslänge. Grafische Darstellung für die Steuerspannungen 110 V und 230 V siehe [Fig. 5.3-8](#).

Da die Kabelkapazität sehr von der Art des Kabels abhängt, empfiehlt es sich, im Zweifelsfall den konkreten Wert beim Hersteller nachzufragen oder ihn zu messen.

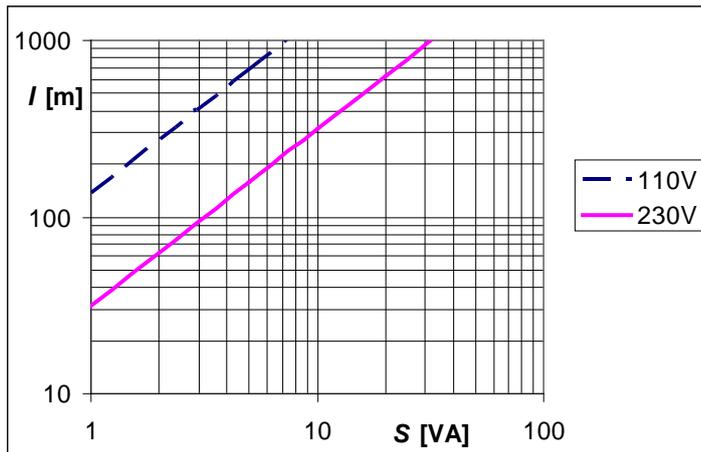


Fig. 5.3-8

Zulässige Leitungslänge gemäss obenstehenden Voraussetzungen bei Dauerkontaktsteuerung für die Steuerspannungen 110 V und 230 V bei 50 Hz

l Leitungslänge

S Scheinleistung (Halteleistung) des Schützes

Bei Problemen bezüglich der zulässigen Leitungslänge wegen der Leitungskapazität bieten sich gemäss obenstehenden Ausführungen die folgenden Massnahmen an:

- Anbringen einer Zusatzlast (Widerstand parallel zur Schützspule)
- Einsatz eines grösseren Schützes mit höherer Halteleistung
- Verwendung einer tieferen Steuerspannung
- Verwendung von Gleichspannung

5.3.5 Kontaktsicherheit

Elektronische Geräte und Schaltkreise wie sie im Industriebereich z.B. bei speicherprogrammierbaren Steuergeräten und Sicherheitsrelais üblich sind, stellen hohe Anforderungen an die Funktionssicherheit der sie ansteuernden Kontakte, seien es Hilfsschalter von Leistungsschaltern oder z.B. Steuerkontakte von Befehlsgeräten, Sensoren, Funktionsrelais etc. Die zu schaltende Spannung ist meist 24 V oder sogar darunter und die Schaltströme liegen im Bereich weniger mA. Bei in Serie geschalteten Kontakten (z.B. bei Sicherheitsrelais) kommt es vielfach vor, dass sie stromlos schliessen und öffnen und so nie ein Schaltvorgang unter elektrischer Last stattfindet.

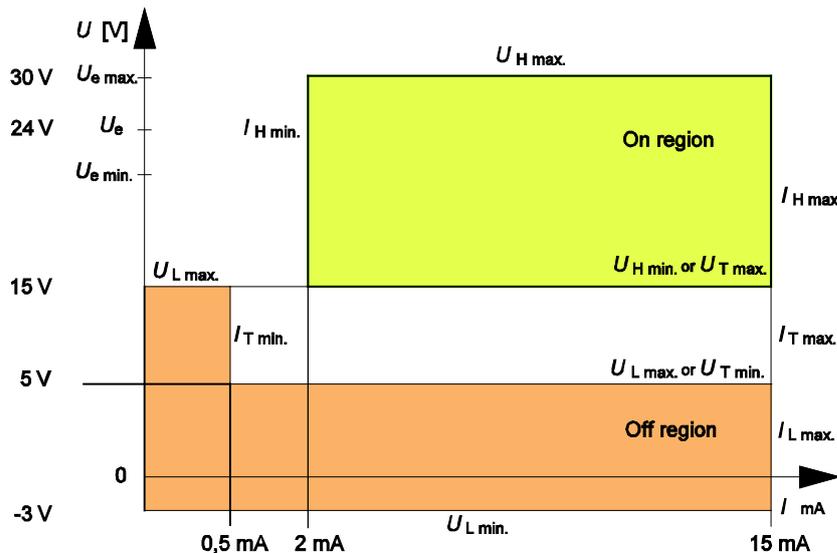


Fig. 5.3-9

Arbeitsbereich von SPS-Eingängen gemäss IEC 61131-2 (Speicherprogrammierbare Steuergeräte – Teil 2: Anforderungen und Prüfungen) und IEC 60947-1 ed. 5.0 Annex S (Digitale Ein- und Ausgänge) für Eingänge von Kontakten (Typ 1) bei einer Bemessungssteuerspannung von 24 V. Die Kontaktbelastung für EIN kann zwischen 30 und 15 V sowie 15 und 2 mA liegen.

Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Während beim Schalten höherer Spannungen und Leistungen bei jeder Schaltung durch den Lichtbogen ein Reinigungsvorgang erfolgt, sind bei kleinen Signalen besondere Massnahmen erforderlich, um eine hohe Qualität der Kontaktgabe sicher zu stellen, also eine hohe Kontaktsicherheit zu gewährleisten. Bei einem typischen SPS-Eingangswiderstand von einigen $k\Omega$ geht es dabei nicht um $m\Omega$ wie bei Leistungskontakten. Eine gute Kontaktgabe kann beispielsweise verhindert sein durch

- Fremdschichten auf der Kontaktoberfläche, die durch Reaktion mit umgebenden Gasen (z.B. Oxidation, Bildung von Sulfidschichten) oder durch Ablagerungen von flüchtigen Bestandteilen der umgebenden Atmosphäre (z.B. aus dem Betrieb des Standortes stammend oder Ausdünstungen aus Kunststoffen im Schaltschrank) entstehen. Solche Fremdschichten sind meist nur mit speziellen Geräten erkennbar und die Ursache oft schwer zu eruieren und zu eliminieren.
- Fremdschichten auf der Kontaktoberfläche, die durch Materialwanderung aus dem Basismaterial entstehen und vielfach in Wechselwirkung mit dem erstgenannten Punkt und dem Schaltvorgang stehen.
- Verunreinigungen auf der Kontaktoberfläche, die aus der Umgebung (offene Schaltschränktüren bei der Inbetriebnahme!) aus dem Schaltschrankinneren oder aus dem Gerät selber stammen können. Eine nicht zu vernachlässigende Problematik ist die Erzeugung von störenden Partikeln durch den Betrieb des Gerätes selbst, z.B. aufgrund von Abrieb.

Massnahmen, um eine gute Kontaktsicherheit zu gewährleisten sind u.a.

- Wahl geeigneter Kontaktmaterialien (Grundmaterial und ggf. Oberflächenbeschichtungen wie Gold)
- Vermeidung interner Quellen (z.B. Materialien und/oder Abrieb), die einen negativen Einfluss auf die Kontaktsicherheit haben können.
- Anwendung hoher Kontaktdrücke, die in der Lage sind, Fremdschichten zu durchbrechen, durch geeignete Formgebung der Kontaktoberflächen.
- Relativbewegung der Kontaktoberflächen beim Schliessen, die Fremdschichten durchbrechen und Verunreinigungen beseitigen können. Dabei ist zu beachten, dass dadurch Abrieb entsteht, der der Lebensdauer und der Kontaktsicherheit entgegenstehen kann.
- Verwendung von Mehrfachkontakten (Doppelkontakte, H-Kontakte), bei denen durch die Parallelschaltung von Kontaktstellen die Wahrscheinlichkeit einer guten Kontaktgabe vergrößert wird.
- Vermeidung zu geringer Kontaktbelastung und von Reihenschaltung einer grösseren Anzahl von Kontakten.
- Vermeidung von störenden äusseren Einflüssen (Fremdpartikel, chemische Einflüsse) am Einsatzort.

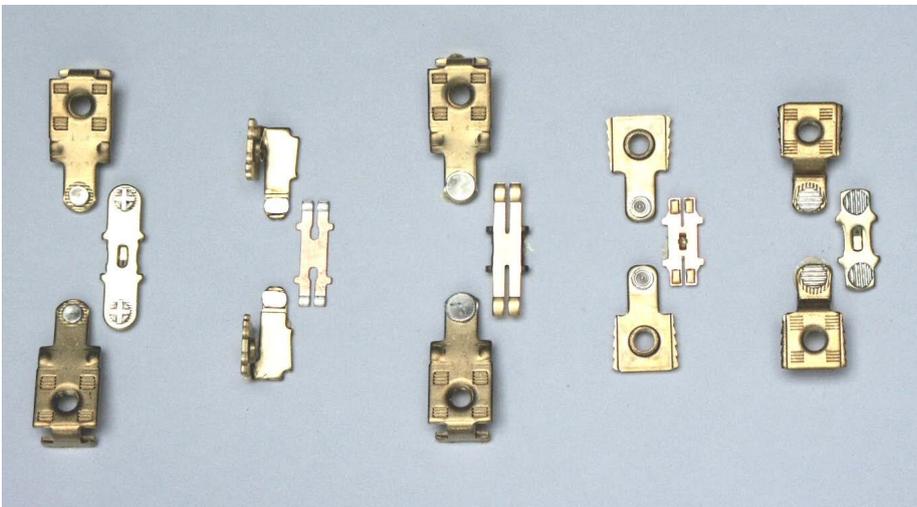


Fig. 5.3-10

Doppelkontakte, Erhöhung des Kontaktdruckes (z.B. durch Riffelung der Kontaktoberfläche) und Vergoldung sind – neben anderen - geeignete Massnahmen zur Erzielung einer hohen Kontaktsicherheit

Zur Erzielung einer befriedigenden Kontakt- und damit Funktionssicherheit bedarf es geeigneter Massnahmen beim Gerätehersteller und beim Anwender. Seitens Anwender ist es die Auswahl der geeigneten Kontaktausführung für die jeweilige Anwendung aus dem Angebot des Herstellers, die Beachtung der Herstellerangaben und der oben angeführten Massnahmen, die eine gute Kontaktsicherheit positiv beeinflussen. Vorsicht ist geboten mit jeder Art von chemischen Substanzen im Schaltschrank. So mögen Kontaktsprays gut sein für eine oxidierte Steckdose – für Schaltkontakte sind sie Gift!

Universal-Steuerkontakte sind über einen weiten Bereich von Spannung und Leistung einsetzbar. Sie eignen sich sowohl für das Schalten von Schützantrieben bei 230 V oder 110 V wie auch zur Ansteuerung von SPS bei 24 V. Zur Erzielung einer hohen Kontaktsicherheit sollten bei kleinen Steuerspannungen wie bei SPS-Ansteuerung üblich keine Kontakte in Serie geschaltet werden. Bei speziell für niedrige Signalpegel konzipierten Kontakten ist zu beachten, dass selbst einzelne Schaltungen bei höherer Leistung die Oberflächenstrukturen zerstören können und damit die Elektronik-Tauglichkeit verloren geht oder zumindest stark reduziert wird.

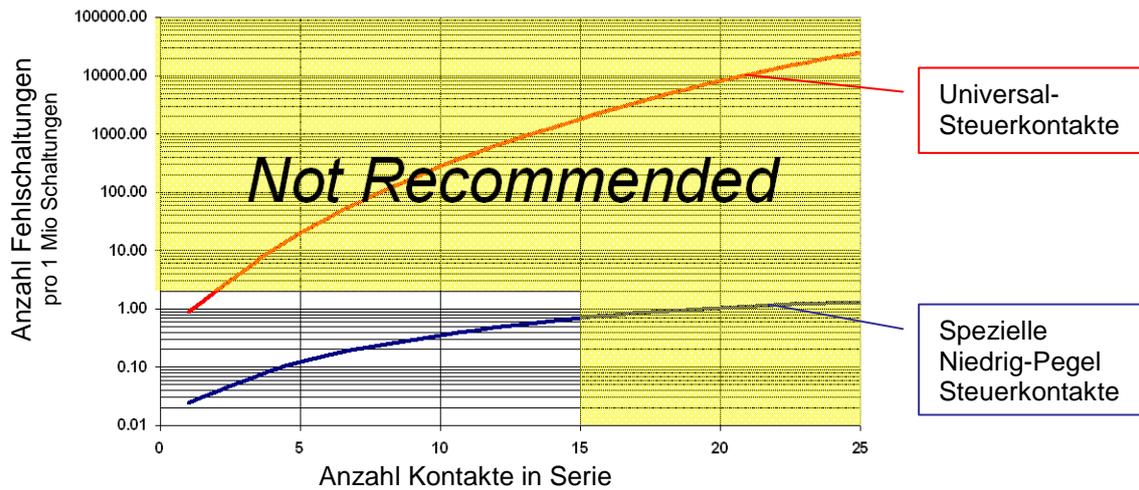


Fig. 5.3-11
 Typische Kontaktsicherheitswerte bei 15 V / 5 mA für Universal-Steuerkontakte und spezielle Niedrig-Pegel-Kontakte

6 Spezielle Aspekte des Baus von Steuerungen und Schaltgerätekombinationen

6.1 Erwärmung

Die Temperatur der Geräte im Schaltschrank und jene berührbarer Teile ist ein wesentlicher Aspekt bezüglich Funktionszuverlässigkeit, Lebensdauer und Personensicherheit. Sie hängt u.a. von der Umgebungstemperatur der Schaltgerätekombination ab, der Wärmeabfuhr über eine allfällige Kapselung und/oder Klimatisierung, der Art des Einbaus der Geräte (gegenseitige Erwärmung, Wärmeabfuhr, Bildung von Hot-Spots), der Verdrahtung (Wärmeabfuhr über die Leiter) und nicht zuletzt der Verlustleistung (Belastung) der Geräte.

6.1.1 Erwärmungsgrenzwerte

Die einschlägigen Vorschriften wie IEC 60947-1 (Niederspannungs-Schaltgeräte) und IEC 60439-1 (Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen) definieren Grenzwerte für die Temperaturen der relevanten Konstruktionsteile. IEC 60204 (Maschinensicherheit; Elektrische Ausrüstung von Maschinen) bezieht sich auf IEC 60439-1.

Teil	Erwärmungs-Grenzwert 1)	Bezugs-(Umgebungs-) Temperatur	Absoluter Temperatur-Grenzwert 1)
Metallische Betätigungsorgane	15 ... 25 K	40 °C	55 ... 65 °C
Nicht-metallische Betätigungsorgane	25 ... 35 K	40 °C	65 ... 75 °C
Berührbare metallische Teile, die nicht zur Betätigung vorgesehen sind	30 ... 40 K	40 °C	70 ... 80 °C
Berührbare nicht-metallische Teile, die nicht zur Betätigung vorgesehen sind	40 ... 50 K	40 °C	80 ... 90 °C
Metallische Oberflächen, die nicht berührt werden müssen	40 ... 50 K	40 °C	80 ... 90 °C
Nicht-metallische Oberflächen, die nicht berührt werden müssen	50 ... 60 K	40 °C	90 ... 100 °C
Klemmen für externe Verbindungen (Cu versilbert oder vernickelt oder Messing)	70 ... 80 K	40 °C	110 ... 120 °C
1) Der höhere Wert gilt für Geräte im gebrauchten Zustand oder für Teile die selten berührt oder betätigt werden.			

Tab. 6.1-1

Erwärmungsgrenzwerte gemäss IEC 60947-1 ed. 5.0, IEC 60947-2 ed. 4.0 und IEC 60439
Copyright © IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Die zulässigen Erwärmungen bzw. Temperaturen scheinen zum Teil hoch, z.B. jene für die Erwärmung von Klemmen. Dieser Grenzwert ist auf den Anschluss von Leitermaterial mit einer zulässigen Dauer-Isolationstemperatur von 70 °C hin ausgelegt. Die hohe Temperatur der Anschlussstelle selbst ist zulässig, weil durch den Wärmeabfluss aus der Klemmstelle über den angeschlossenen Leiter die Leitertemperatur bereits in geringer Entfernung stark absinkt. Die Erfahrung über viele Jahrzehnte und Milliarden von Klemmstellen bestätigt die Richtigkeit des Grenzwertes.

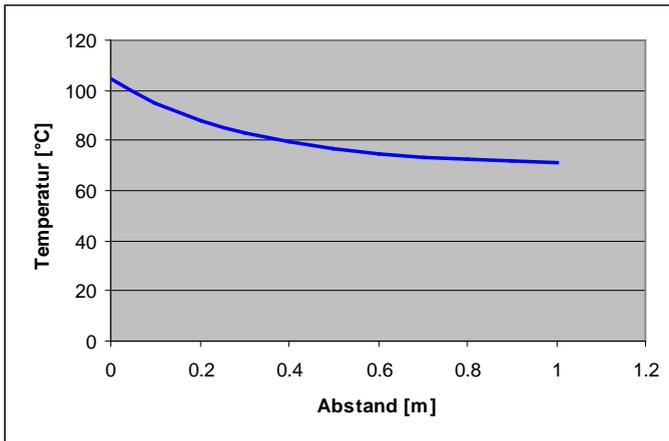


Fig. 6.1-1
Typische Abnahme der Leitertemperatur mit zunehmender Entfernung von der Klemmstelle

Entscheidend für die Funktionsfähigkeit von Geräten, deren Lebensdauer oder die Unfallgefahr ist nicht die Erwärmung, sondern die absolute Temperatur. Die Vorschriften definieren Erwärmungsgrenzwerte aus praktischen Gründen, damit Versuche in normaler Laborumgebung durchgeführt werden können. Die Referenz-Umgebungstemperatur gemäss Vorschriften ist dabei 35 °C im 24 h-Mittel bei einem Maximalwert von 40 °C. Übersteigt die Umgebungstemperatur der Geräte im praktischen Betrieb diese Werte – z.B. weil sie in einem Schaltschrank eingebaut sind – so ist ihre Belastung entsprechend zu reduzieren, um die Werte der zulässigen absoluten Temperaturen einzuhalten. Dies betrifft insbesondere die Temperaturen von internen Teilen der Geräte in Hinblick auf die Temperaturbeständigkeit der verwendeten Materialien. Reduktionsfaktoren siehe Hersteller-Unterlagen.

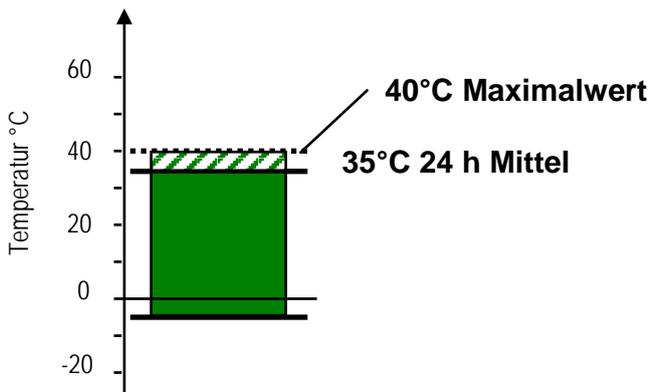


Fig. 6.1-2
Der normale Temperaturbereich für Geräte ist gemäss IEC 60947 identisch mit dem normalen Temperaturbereich für Schaltgeräte kombinationen gemäss IEC 60439, in die die Geräte eingebaut sind.

6.1.2 Labor-Prüfbedingungen und reale Einsatzumgebung

Die Erwärmungsprüfung von Niederspannungs-Geräten und damit die Ermittlung ihrer zulässigen thermischen Belastungsdaten findet gemäss Vorschriften unter genau definierten Bedingungen statt. Dies ist wichtig, um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten.

Die Prüfbedingungen sind:

- Aufbau des zu prüfenden Gerätes in freier Umgebungsluft
- Messung der Umgebungstemperatur in 1 m horizontaler Entfernung
- Verbindungen zur Stromquelle und zwischen den Klemmen mit definierten Leiterquerschnitten (abhängig vom Bemessungsstrom)
- Verbindungen zur Stromquelle und zwischen den Klemmen mit einer minimalen Länge von 1 m bis Querschnitt 35 mm², darüber 2 m und über 800 A Bemessungsstrom 3 m.

Die realen Einsatzbedingungen weichen in der Regel von den Prüfbedingungen ab. So sind die Geräte meist verhältnismässig eng mit anderen zusammengebaut und mit kurzen Leitern miteinander verbunden. Vielfach sind die Leiter mehrerer Stromkreise miteinander geführt, so dass sie sich gegenseitig aufheizen. Dazu kommt, dass die Geräte meist in ein Gehäuse eingebaut sind, dessen Inneres eine Übertemperatur gegen die Umgebung annimmt. Dabei ist zu beachten, dass der normale Umgebungstemperaturbereich für die Geräte identisch ist mit dem normalen Umgebungstemperaturbereich für Schaltgerätekombinationen.

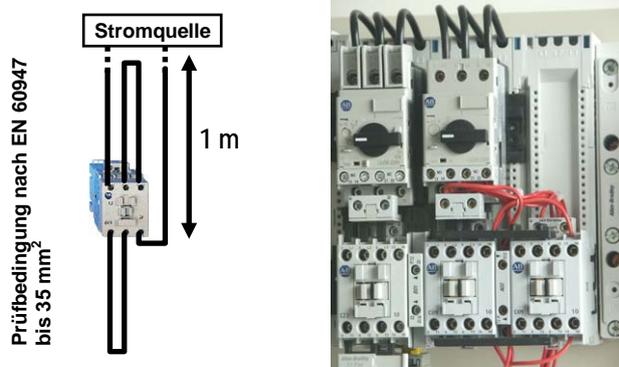


Fig. 6.1-3

Die praktischen Einsatzbedingungen bezüglich Verbindungen (Beispiel rechts) weichen wesentlich von den Anordnungen bei der Typprüfung ab.

Es liegt in der Verantwortung des Erbauers einer Schaltgerätekombination oder einer Steuerung dafür zu sorgen, dass die vorgeschriebenen Temperaturgrenzen unter den realen Einsatzbedingungen eingehalten werden. Besondere Aufmerksamkeit ist bei Geräten geboten, die nahe am thermischen Dauerstrom betrieben werden, insbesondere bei Leistungsschaltern und thermischen Überlastrelais. Bei Betriebsarten wie AC-3 und AC-4, bei denen das Schaltvermögen der Geräte die massgebende Auswahlgrösse ist, ist die Erwärmung durch den Dauerbetriebsstrom meist weniger kritisch.

6.1.3 Erwärmungsnachweis

Für Steuerungen und Schaltgerätekombinationen ist generell ein Erwärmungsnachweis zu erbringen. Dieser kann auf Messungen basieren (z.B. bei Serien-Geräten und -Anlagen und modularen Systemen) oder auf Berechnung bzw. auf einer Ableitung von gemessenen Systemen. Zur Berechnung der Erwärmung von Schaltgerätekombinationen bietet IEC 60890 eine Methode, die mit wenig Aufwand gestattet, die Übertemperatur in einem Gehäuse zu ermitteln, soweit die darin erzeugte Verlustleistung bekannt ist. Zusätzlich müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein, z.B. eine weitgehend gleichmässige Verteilung der Verlustquellen im Gehäuse. Rockwell Automation hat mit der Software TRCS (Temperature Rise Calculation Software) basierend auf IEC 60890 ein sehr nützliches Hilfsmittel zur Berechnung der Erwärmung in Gehäusen und Schaltschränken geschaffen. TRCS gestattet auch eine effiziente Ermittlung der Verlustleistung von Komponenten und Leitern im Schaltschrank auf Basis ihrer Betriebsdaten. Die Erfahrung zeigt, dass der Erwärmungsbeitrag der Leiter wesentlich ist (bis zu 50 %), soweit sie nahe dem Bemessungsstrom und damit nahe der Nenn-Isolationstemperatur (z.B. 70 °C) betrieben werden.

6.1.4 Wichtige Aspekte bezüglich Geräte-Erwärmung; Empfehlungen

6.1.4.1 Bemessungsstrom

Für viele Niederspannungs-Komponenten (z.B. Leistungsschalter, Lastschalter, Schütze, Sicherungen, Leiter) sind die Stromwärmeverluste die dominante Verlustquelle. Sie sind dem Quadrat des Betriebsstroms proportional. Massgebend ist der Effektivwert. Bei variablen Belastungsbedingungen (z.B. intermittierender Betrieb) kann der Effektivwert über die Zeit gemittelt werden, soweit die Zyklusdauer kleiner als die Erwärmungszeitkonstante der Geräte ist. Im Leistungsbereich bis etwa 40 A ist die zulässige Integrationszeit (= Zyklusdauer) etwa 15 ... 20 Minuten.

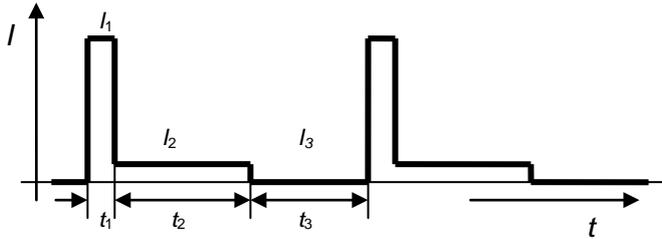


Fig. 6.1-4

Beispiel der Berechnung des Effektivwertes bei intermittierendem Betrieb eines Motors.

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

t_1 Anlaufzeit bei Anlaufstrom I_1
 t_2 Betriebszeit bei Betriebsstrom I_2
 t_3 Pausenzeit bei Strom $I_3=0$
 $t_1 + t_2 + t_3$ Zykluszeit

Da die Betriebsbedingungen vielfach von jenen bei der Ermittlung des konventionellen thermischen Stroms in freier Luft I_{th} abweichen (siehe oben), empfiehlt es sich als generelle Richtlinie, die Geräte nicht über 80 % I_{th} zu betreiben. Bei 80 % Strom reduzieren sich die Stromwärmeverluste auf etwa 64 %.

6.1.4.2 Thermische Schutzgeräte

Bei Schutzgeräten wie Leistungsschaltern oder Motorschutzrelais mit engen Einstellbereichen kann der 80 % - Empfehlung oft nicht gefolgt werden, da die Geräte auf den Bemessungsstrom des Schutzobjektes eingestellt werden müssen und vielfach keine ausreichende Überlappung der Strombereiche verfügbar ist. Soweit möglich, sollte jedoch ein Strombereich gewählt werden, der eine Einstellung und damit einen Betrieb im unteren bis mittleren Bereich der Skala ermöglicht.

Bei Schutzgeräten mit Bimetallen ist zu beachten, dass die in den Bimetallen umgesetzte Wärme, die für die Qualität des Schutzes erforderlich ist, bei allen Strombereichen einer Baugröße in etwa gleich ist. Ein 1A-Bimetallrelais setzt also bei 1A etwa gleich viel Verlustleistung um wie ein 10A-Bimetallrelais der gleichen Bauart bei 10A.

6.1.4.3 Leiterquerschnitte

Über den Querschnitt der angeschlossenen Leiter wird substantiell Wärme aus den Geräten abgeführt. Je grösser der Querschnitt, desto besser ist die Kühlwirkung.

Beim Erwärmungsversuch des Herstellers wird sowohl auf die Einhaltung der Erwärmungsgrenzen gemäss **Tab. 6.1-1** geachtet, als auch auf die Erwärmung geräteinterner Teile und deren Verträglichkeit mit den verwendeten Materialien. Bei erhöhter Geräte-Umgebungstemperatur wie sie beim Einbau in Kästen und Schränke auftreten, sind grössere Querschnitte der angeschlossenen Leiter erforderlich als sie bei den Typprüfungen verwendet werden und den üblichen Installationstabellen entsprechen, die auf eine Umgebungstemperatur von 30 °C abgestimmt sind. In der Praxis empfiehlt sich die Wahl eines grösseren Leiters, mindestens um eine Querschnittsstufe. Dies bringt auch den Vorteil mit sich, dass der Wärmeeintrag in den Schaltschrank und der Energieverbrauch der Anlage wegen der geringeren Stromdichte im Leiter reduziert werden. Gegebenenfalls können zwei Leiter parallel geführt werden.

Bei Bimetallrelais und Leistungsschaltern mit Bimetallauslösern beeinflusst der Querschnitt des angeschlossenen Leiters den Auslösegrenzstrom. Typisch kann ein grösserer Anschlussquerschnitt je nach Temperaturkompensation der Bimetalle in der Praxis zu einer Erhöhung des Grenzstroms bis zu etwa 5 % führen. Aus dieser Sicht ist es auch vorteilhaft, anstelle des Gerätes mit dem höchsten Strombereich einer Baugröße von Bimetallrelais oder Leistungsschaltern ein Gerät der nächsten Baugröße zu wählen.

Die Wahl von Leitern mit höherer Isolationsklasse hat keinen Einfluss auf die Wärmeabfuhr aus den Geräten. Ihr Querschnitt ist aus den oben beschriebenen Gründen gleich zu wählen wie jener von Leitern mit 70 °C Grenztemperatur.

Bei Stromschienen ist zu beachten, dass die Belastbarkeit von Schienen, die an Geräte angeschlossen werden, aus denselben Gründen geringer ist als die Belastbarkeit von Schienen, die ausschliesslich der Stromverteilung dienen. Im Anhang zu IEC 60890 finden sich entsprechende Tabellen.

6.1.4.4 Leiterlänge

Wie in Abschnitt 6.1.2 dargestellt, werden bei der Geräte-Typprüfung vergleichsweise lange Anschlussleitungen an den Klemmen verwendet, die substantiell Wärme aus den Geräten abführen. Bei kurzen Verbindungen entfällt diese Wärmeabfuhr. In der Folge steigen die Temperaturen der Klemmen, im Geräte-Innenen und des Leiters selbst bei gleich bleibender Belastung. Bei kompakten Geräte-Kombinationen wie z.B. Motorstartern bestehend aus einem Leistungsschalter und einem Schütz werden aus diesem Grund Typprüfungen des kompletten Starters einschliesslich der Verbindungskomponenten durchgeführt. Die Verbindungskomponenten haben eine höhere Temperaturbeständigkeit als normales Verdrahtungsmaterial und die Prüfung stellt sicher, dass die Erwärmungsgrenzen aller Komponenten eingehalten werden.



Fig. 6.1-5

Bei kompakt gebauten Motorstartern mit Verbindungskomponenten sichert die Typprüfung, dass die Grenztemperaturen aller Komponenten eingehalten werden.

Bei kurzen Verbindungen in individuell verdrahteten Anlagen ist durch Belastungsreduktion und/oder forcierte Kühlung für eine Einhaltung der Temperaturgrenzen zu sorgen. Die Wahl grösserer Verbindungsquerschnitte verstärkt den Wärmeaustausch miteinander verbundener Geräte und reduziert die Wärmeerzeugung im Leiter selbst. Die Wärmeabfuhr wird damit nicht verbessert.

6.1.4.5 Anzugsdrehmomente

In den Katalogen und auf Geräten werden vielfach Bereiche für das Anzugsdrehmoment der Anschlussstellen angegeben. Diese beziehen sich dann auf alle Strom-Varianten und die damit verknüpften Querschnitte einer Baugrösse. Aus Sicht der Geräteerwärmung empfiehlt es sich, stets einen Wert im oberen Teil des Bereiches anzuwenden, da dadurch der elektrische und thermische Übergangswiderstand und damit die Wärmeerzeugung und –abfuhr positiv beeinflusst werden. Siehe Fig. 6.1-6. Die obere Bereichsgrenze soll nicht überschritten werden, um die mechanische Festigkeit der Klemmen nicht unzulässig zu beanspruchen.

6.1.4.6 Leiterführung

Wie aus den einschlägigen Tabellen (siehe auch RALVET) für die Leiterauswahl ersichtlich ist, hat die Art der Verlegung – ob frei, auf Trassen, im Kabelkanal etc. – und die Häufung von Leitern einen grossen Einfluss auf deren Belastbarkeit. Je stärker die Wärmeabfuhr an die umgebende Luft behindert wird, desto geringer ist die Belastbarkeit oder – mit anderen Worten – desto grösser ist der erforderliche Querschnitt für einen gegebenen Strom. Aus erwärmungstechnischen Gründen empfiehlt sich daher eine möglichst lockere Führung von Leitern für

Hauptstromkreise. Leiter, die in kurzer Entfernung von der Anschlussstelle in einen Kabelkanal geführt werden, haben eine geringe freie Länge, über die Wärme abgeführt werden kann und heizen sich im Kabelkanal gegenseitig auf.

6.1.4.7 Betriebsfrequenz und Oberschwingungen

Alle normalen technischen Daten und Prüfungen beziehen sich auf die normale Netzfrequenz von 50/60 Hz. Bei höheren Frequenzen treten zusätzliche Verluste auf, die die Verlustbilanz belasten bzw. die Belastbarkeit der Geräte reduzieren. Siehe Abschnitt **2.4.3**.

6.1.4.8 Anreihung von Geräten

In realen Schaltgerätekombinationen werden Schaltgeräte vielfach seitlich eng aneinander gereiht. Eine Zirkulation der Umgebungsluft zwischen den Geräten ist dann nicht möglich und in der Folge die Kühlung der Geräte im Vergleich zu den Standard-Prüfbedingungen reduziert (siehe **Fig. 6.1-5**). Dies führt zu einer Verringerung der Belastbarkeit, soll eine unzulässige Erwärmung vermieden werden.

In der Praxis werden benachbarte Geräte vielfach nicht gleichzeitig belastet oder werden die Geräte mit Strömen deutlich unter dem konventionellen thermischen Strom in freier Luft (I_{th}) betrieben. In solchen Fällen kann eine Geräteanreihung aus Erwärmungssicht zulässig sein.

Vorsicht ist geboten beim Betrieb benachbarter Geräte nahe dem I_{th} und bei einer Kumulation von ungünstigen Einflüssen bezüglich Erwärmung wie vorstehend beschrieben. In solchen Fällen empfiehlt sich eine seitliche Distanzierung der Geräte, um ein gegenseitiges Aufheizen zu vermindern. Vielfach finden sich in den Herstellerunterlagen entsprechende Hinweise – z.B. bei den Masszeichnungen (Katalog, Verpackung, Anwendungsanweisung). Zur Vermeidung von Wärmenestern (Hot Spots) ist auch eine Umwälzung der Luft in der Schaltgerätekombination von Vorteil.

6.1.4.9 Einbaulage

In den Herstellerunterlagen finden sich Angaben bezüglich der zulässigen Einbaulagen und allfälligen Auswirkungen eines von der Normallage abweichenden Einbaus auf die Betriebsparameter. Bezüglich Erwärmung ist zusätzlich zu beachten, dass die Verlustleistung innerhalb der Geräte nicht gleichmässig verteilt entsteht, sondern schwerpunktmässig an spezifischen Bauteilen wie z.B. den Bimetallen von Leistungsschaltern oder Motorschutzrelais. Bei von der Normallage abweichender Einbaulage kann sich die Beeinflussung benachbarter Geräte dadurch ändern.

6.1.5 Wärmebildkameras

Wärmebildkameras werden zunehmend zur Überprüfung der Erwärmung in Schaltgerätekombinationen eingesetzt. Sie sind ein sehr nützliches Hilfsmittel, um Gefahrenstellen zu erkennen, bergen aber auch ein gewisses Risiko der Fehlinterpretation von Messungen. So kann eine scheinbar hohe gemessene Oberflächentemperatur durch die Strahlung heisser innerer Teile verursacht sein, obwohl sie de facto – z.B. mit Thermoelementen gemessen - tiefer liegt. Fehlmessungen sind aufgrund der unterschiedlichen Emissionsfaktoren der verschiedenen Materialien möglich. Es empfiehlt sich der Beizug einer kompetenten Fachperson, wenn vermutlich unzulässig hohe Temperaturen gemessen werden.

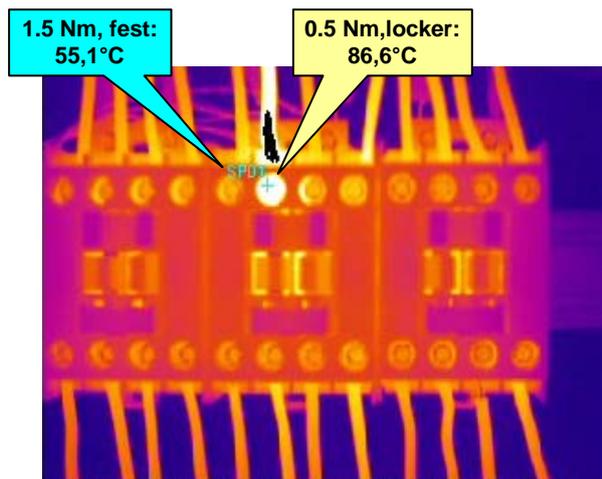


Fig. 6.1-6

Aufnahme eines Gerätes mit einer Wärmebildkamera. Einfluss des Anzugsdrehmoments auf die Klemmenerwärmung. Die verschiedenen Temperaturen werden durch Farben dargestellt. Bei der Interpretation sind die Emissionsfaktoren der verschiedenen Oberflächen zu beachten.

Mit Wärmebildkameras können die Temperaturen der sichtbaren Oberflächen gemessen werden. Übererwärmungen im Geräte-Innenen können sich in der erhöhten Temperatur einer sichtbaren Oberfläche manifestieren. So kann ein abgenutzter Hauptkontakt durch eine erhöhte Temperatur der zugehörigen Anschlussstelle angezeigt werden. Die erhöhte Anschlusstemperatur kann aber auch auf einen schlechten Anschluss hinweisen (siehe Fig. 6.1-6).

Nützlich ist die Durchführung von Erwärmungsmessungen in grösseren zeitlichen Abständen, um Veränderungen festzustellen, sei es Veränderungen an Geräten, an Anschlüssen oder bezüglich deren Belastung.

6.2 Kurzschlussfestigkeit

Gemäss IEC 60439-1 ist der Nachweis der Kurzschlussfestigkeit einer Schaltgerätekombination zwingend ab einem prospektiven Kurzschlussstrom von $10 \text{ kA}_{\text{eff}}$ oder $17 \text{ kA}_{\text{pk}}$ (Scheitelwert). Unter diesen Grenzwerten entfällt er, weil die Beanspruchung durch die auftretenden Kräfte als unkritisch angesehen wird.

Für Hilfsstromkreise, die an Steuertransformatoren angeschlossen sind, gelten die Obergrenzen von 10 kVA bei $\geq 110 \text{ V}$ und 1.6 kVA bei $< 110 \text{ V}$ bei einer minimalen Kurzschlussspannung von 4%, bis zu denen ein Nachweis der Kurzschlussfestigkeit entfällt.

Wichtig ist die Festlegung, dass ein Nachweis der Kurzschlussfestigkeit auch für alle Komponenten entfällt, für die die Kurzschlussfestigkeit für die Bedingungen, unter denen sie in der betreffenden Schaltgerätekombination eingesetzt sind, bereits einer vorgehenden Typprüfung nachgewiesen wurde. Als Beispiele werden genannt: Stromschienen, Stromschienenträger, Verbindungen zu Stromschienen, Eingangs- und Ausgangseinheiten, Schaltgeräte, etc.. Dies bedeutet in der Praxis, dass typgeprüfte Geräte oder Baugruppen (z.B. Schütze, Motorstarter, Motorschutzgeräte, Stromschienensysteme) ohne weiteren Nachweis der Kurzschlussfestigkeit eingesetzt werden können, soweit ihre Typprüfung die Beanspruchung in der Schaltgerätekombination einschliesst.

Liegt z.B. für einen Zwei-Komponenten-Motorstarter bestehend aus einem Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik und einem Schütz eine Koordinationstabelle für 400 V bei einem bedingten Bemessungskurzschlussstrom $I_q=50 \text{ kA}$ vor, so können Starter dieser Tabelle für alle Applikationen mit $I_q \leq 50 \text{ kA}$ ohne weiteren Nachweis der Kurzschlussfestigkeit eingesetzt werden. Allfällige Anweisungen des Herstellers sind zu beachten.

Literaturquellen

- [1] IEC 60947-1; Niederspannungsschaltgeräte Teil 1: Allgemeine Festlegungen
- [2] IEC 60947-2; Niederspannungsschaltgeräte Teil 2: Leistungsschalter
- [3] IEC 60947-3; Niederspannungsschaltgeräte Teil 3: Lastschalter, Trennschalter, Lasttrennschalter und Schalter-Sicherungs-Einheiten
- [4] IEC 60947-4-1; Niederspannungsschaltgeräte Teil 4-1: Schütze und Motorstarter - Elektromechanische Schütze und Motorstarter
- [5] IEC 60947-4-2; Niederspannungsschaltgeräte Teil 4-2: Schütze und Motorstarter - Halbleiter-Motor-Steuergeräte und -Starter für Wechselspannungen
- [6] IEC 60947-5-1; Niederspannungsschaltgeräte Teil 5-1: Steuergeräte und Schaltelemente - Elektromechanische Steuergeräte
- [7] IEC 60947-6-2; Niederspannungsschaltgeräte Teil 6-2: Mehrfunktions-Schaltgeräte – Steuer- und Schutz-Schaltgeräte (CPS)
- [8] IEC 60204; Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [9]¹⁾ IEC 60439-1; Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen Teil 1: Typgeprüfte und partiell typgeprüfte Kombinationen
- [10] IEC 60890; Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen. Verfahren zur Ermittlung der Erwärmung von partiell typgeprüften Niederspannung-Schaltgerätekombinationen (PTSK) durch Extrapolation
- [11] IEC 61921; Leistungskondensatoren - Kondensatorbatterien zur Korrektur des Niederspannungsleistungsfaktors
- [12] VDE-Schriftenreihe Nr. 28; L. Zentgraf, Niederspannung-Schaltgerätekombinationen
- [13] Rockwell Automation Low Voltage Engineering Tool RALVET
- [14] Rockwell Automation; Temperature Rise Calculation Software TRCS
- [15] Rockwell Automation; Introduction to North American Standards; UL-WP001A-EN-P
- [16] Rockwell Automation; AC Drives Using PWM Techniques; DRIVES-WP002A-EN-P
- [17] Rockwell Automation; Bulletin 150 SMC-Flex™ Application Guide; 150-AT002A-EN-P
- [18] Rockwell Automation; SMC-Flex-Controller with Pump Control; 150-WP003A-EN-P
- [19] Rockwell Automation Configuration Software MCS Star
- [20] Rockwell Automation; Grundlagen für die Praxis – Drehstromasynchronmotoren; WP-Motors DE Nov.96, 6.0
- [21] Rockwell Automation; Grundlagen Leistungsschalter;140-2.4DE, April 1996
- [22] Rockwell Automation; Grundlagen für die Praxis; Starten von Motoren; WP Start DE Januar 1998
- [23] Rockwell Automation; Grundlagen für die Praxis; Motorschutz; WP Protect DE Januar 1998
- [24] ATEX 100a (Richtlinie 94/9/EG für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen)
- [25] Motor MEPS Guide; Boteler / Brunner / De Almeida / Doppelbauer / Hoyt Zurich, 1st edition 2009

¹⁾ IEC 60439-1 wird künftig durch IEC 61439-1 und IEC 61439-2 abgelöst

www.rockwellautomation.com

Hauptverwaltung für Antriebs-, Steuerungs- und Informationslösungen

Amerika: Rockwell Automation, 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204 USA, Tel: +1 414 382 2000, Fax: +1 414 382 4444

Europa/Naher Osten/Afrika: Rockwell Automation NV, Pegasus Park, De Kleetlaan 12a, 1831 Diegem, Belgien, Tel: +32 2 663 0600, Fax: +32 2 663 0640

Asien/Australien/Pazifikraum: Rockwell Automation, Level 14, Core F, Cyberport 3, 100 Cyberport Road, Hong Kong, China, Tel: +852 2887 4788, Fax: +852 2508 1846

Deutschland: Rockwell Automation, Düsselberger Straße 15, D-42781 Haan, Tel.: +49 (0)2104 960 0, Fax: +49 (0)2104 960 121

Schweiz: Rockwell Automation AG, Industriestrasse 20, CH-5001 Aarau, Tel.: +41(62) 889 77 77, Fax: +41(62) 889 77 11, Customer Service – Tel: 0848 000 277

Österreich: Rockwell Automation, Kotzinastraße 9, A-4030 Linz, Tel.: +43 (0)732 38 909 0, Fax: +43 (0)732 38 909 61