



# Grundlagen Leistungsschalter

 **Allen-Bradley**

Ergänzende Informationen  
für den praktischen Umgang  
mit Leistungsschaltern

  
**Rockwell  
Automation**

Bringing Together Leading Brands in Industrial Automation

## Inhalt:

<b>1.</b>	<b>Aufbau, Funktionen und Bauarten von Leistungsschaltern</b>	<b>1.1</b>
<b>1.1.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1.1</b>
<b>1.2.</b>	<b>Schalterarten</b>	<b>1.2</b>
1.2.1.	Motorschutzschalter	1.2
1.2.2.	Leistungsschalter	1.2
1.2.3.	Lastschalter	1.6
1.2.4.	Trenner	1.6
1.2.5.	Hauptschalter	1.7
1.2.6.	NOT-AUS-Schalter	1.8
1.2.7.	Zusammenfassung Leistungsschalter als Lastschalter	1.8
<b>1.3.</b>	<b>Aufbau eines Leistungsschalters</b>	<b>1.9</b>
1.3.1.	Stromfluss im Leistungsschalter	1.9
1.3.2.	Thermische Überstromauslöser	1.10
1.3.3.	Elektromagnetische Überstromauslöser	1.10
1.3.4.	Hauptkontaktsystem	1.12
1.3.5.	Hilfsschalter	1.15
1.3.6.	Schaltschloss	1.15
<b>1.4.</b>	<b>Funktionen eines Leistungsschalters</b>	<b>1.15</b>
1.4.1.	Kurzschlussströme abschalten	1.16
1.4.2.	Motoren sicher schützen	1.17
1.4.3.	Leitungen schützen und optimal ausnutzen	1.18
1.4.4.	Anlagen schützen	1.18
1.4.5.	Integration in Informationsfluss der Steuerung	1.19
1.4.6.	Betriebsmässiges Schalten	1.20
1.4.7.	Trennen	1.20
1.4.8.	Abschliessen mittels Schloss	1.20
<b>2.</b>	<b>Leistungsschaltertechnologie</b>	<b>2.1</b>
<b>2.1.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>2.1</b>
<b>2.2.</b>	<b>Kurzschlussströme im Netz</b>	<b>2.1</b>
2.2.1.	Kurzschlussarten	2.2
2.2.2.	Stosskurzschlussstrom	2.3
2.2.3.	Berechnung von Kurzschlussströmen in Transformatornähe	2.4

2.2.4.	Berechnung von Kurzschlussströmen im Strahlennetz	2.7
2.2.5.	Dynamische Krafteinwirkung auf Leiter im Kurzschlussfall	2.16
<b>2.3.</b>	<b>Kurzschlusschutz</b>	<b>2.18</b>
2.3.1.	Prinzip der Strombegrenzung	2.18
2.3.2.	Schaltvermögen	2.26
2.3.3.	Lebensdauer von Leistungsschaltern	2.26
<b>2.4.</b>	<b>Kurzschlusskoordination</b>	<b>2.28</b>
2.4.1.	Definition nach IEC 947-4-1	2.28
2.4.2.	Folgerung aus der Definition für den Anwender	2.28
2.4.3.	Physikalische Zusammenhänge der Kurzschlusskoordination	2.29
2.4.4.	Anforderung an Leistungsschalter für einfache Koordination nach Typ "2"	2.32
<b>3.</b>	<b>Leistungsschalter für jeden Einsatz</b>	<b>3.1</b>
<b>3.1.</b>	<b>Allgemeines Vorgehen bei der Auswahl und Dimensionierung von Leistungsschaltern</b>	<b>3.1</b>
<b>3.2.</b>	<b>Leistungsschalter für Motorschutz</b>	<b>3.2</b>
3.2.1.	Schutz von Drehstrom-Motoren mit Direktanlauf	3.3
3.2.2.	Schutz von Stern-Dreieck-Startern	3.4
3.2.3.	Schutz bei Schwanlauf	3.8
3.2.4.	Leistungsschalter mit nachgeschaltetem Motorschutz	3.8
3.2.5.	Schutz von Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen	3.12
3.2.6.	Schutz von Motoren mit Phasenanschnitt-Steuerung (Softstarter)	3.13
3.2.7.	Schutz von Motoren mit frequenzvariabler Steuerung (Frequenzumrichter)	3.14
<b>3.3.</b>	<b>Leistungsschalter für Leitungs- und Gruppenschutz</b>	<b>3.16</b>
3.3.1.	Leitungsschutz	3.16
3.3.2.	Gruppenschutz	3.17

<b>3.4.</b>	<b>Leistungsschalter für Kondensatoren</b>	<b>3.17</b>
<b>3.5.</b>	<b>Leistungsschalter für Transformatoren</b>	<b>3.18</b>
3.5.1.	Primärseitiger Schutz von Transformatoren	3.18
3.5.2.	Sekundärseitiger Schutz von Transformatoren	3.18
3.6.	Leistungsschalter für Generatoren	3.19
3.7.	Leistungsschalter für spezielle Netzfrequenzen	3.19
3.7.1.	Schaltvermögen unter 50/60Hz	3.20
3.7.2.	Schaltvermögen über 50/60Hz	3.20
<b>3.8.</b>	<b>Schalten von Gleichstrom</b>	<b>3.21</b>
<b>3.9.</b>	<b>Schalten von hohen Netzspannungen</b>	<b>3.21</b>
<b>3.10.</b>	<b>Selektivität</b>	<b>3.21</b>
3.10.1.	Selektivität zwischen Leistungsschaltern	3.22
3.10.2.	Selektivität zwischen Leistungsschalter und Schmelzsicherung	3.24
3.10.3.	Selektivität zwischen Schmelzsicherungen	3.25
<b>4.</b>	<b>Argumentation für den Leistungsschalter-Einsatz</b>	<b>4.1</b>
<b>4.1.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>4.1</b>
<b>4.2.</b>	<b>Funktionsvergleich Leistungsschalter / Schmelzsicherung</b>	<b>4.2</b>
4.2.1.	Zeit-Stromkennlinien Vergleich	4.2
4.2.2.	Durchlassenergie-Vergleich	4.3
4.2.3.	Grenzstromvergleich	4.4
4.2.4.	Tabellarische Gegenüberstellung	4.4
<b>4.3.</b>	<b>Argumente für den Leistungsschalter</b>	<b>4.6</b>
4.3.1.	Unfallverhütung durch den Einsatz von Leistungsschaltern	4.6
4.3.2.	Schnelle Wiedereinschaltbereitschaft	4.8
4.3.3.	Allpoliges Schalten	4.9
4.3.4.	Alterungsfrei	4.9
4.3.5.	Reduktion von Leiterquerschnitten	4.10
4.3.6.	Vereinfachte Anlagenplanung	4.14
4.3.7.	Kostenverminderung im Anlagenbau und Betrieb	4.14



## 1. Aufbau, Funktionen und Bauarten von Leistungsschaltern

### 1.1. Zusammenfassung



Fig 1.1-1: Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik von 0.1 A ...400 A im Programm von Allen-Bradley

Der Leistungsschalter, wie wir ihn im Folgenden verstehen, besteht aus einem thermischen Überstrom-, einem elektromagnetischen Kurzschlussauslöser, einer Auslösemechanik (Schaltschloss), dem Hauptkontaktsystem und Hilfsschaltern. Dies die wichtigsten Funktionsblöcke.

Die Verknüpfung dieser Blöcke in einer Einheit macht es möglich, mehrere Einzelbauteile in einer Anlage durch ein einziges Gerät, den Leistungsschalter, zu ersetzen. Sicherungen, Schütz und Thermorelais werden durch die Starterkombination Leistungsschalter und Schütz abgelöst.

Ein einziges Gerät wie der Leistungsschalter erfüllt Funktionen wie:

- Kurzschlusschutz
- Motorschutz
- Leitungsschutz

- Anlagenschutz
- Signalisation des Betriebszustands
- Auslösemeldung
- betriebsmässiges Schalten
- Fernschalten
- Trennen
- Abschliessfunktionen mittels Vorhängeschloss (für den Hauptschalter erforderlich)

Dadurch kann er nicht nur als Leistungsschalter, sondern auch als Motorschutzschalter, Lastschalter oder Trenner eingesetzt werden.

### 1.2. Schalterarten

Für die richtige Auswahl nachfolgend eine kurze Beschreibung der Geräte:

- Motorschutzschalter
- Leistungsschalter
- Lastschalter
- Trenner
- Hauptschalter
- NOT-AUS-Schalter

#### 1.2.1. Motorschutzschalter

Man versteht darunter meist ein Gerät vorallem für den Überlastschutz von Motoren. In kleineren Strombereichen dient der Motorschutzschalter oft direkt als manueller Betriebsschalter. In seiner ursprünglichen Form weist er nur ein geringes Kurzschluss-Abschaltvermögen auf. Heute versteht man auch unter der Definition Motorschutzschalter einen Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik.

#### 1.2.2. Leistungsschalter

Der Leistungsschalter ist ein mechanisches Schaltgerät, das Ströme unter Betriebsbedingungen im Stromkreis einschalten, führen und ausschalten und auch unter festgelegten aussergewöhnlichen Bedingungen, wie Kurzschluss, einschalten, während einer festgelegten Zeit führen und ausschalten kann (IEC 947-1).

Leistungsschalter haben vorallem das Vermögen Kurzschlüsse abzuschalten. Sie werden daher grundsätzlich nach dem Abschaltvermögen, ihrer Bauart und dem Vermögen Kurzschlussströme zu begrenzen eingestuft. Es ergibt sich die Gruppierung in:

- nullpunktlöschende Leistungsschalter
- strombegrenzende Leistungsschalter

Die Geräte beider Gruppen lassen sich weiter unterteilen nach ihrer Überstrom-Auslösecharakteristik in:

- Leistungsschalter für den Motorschutz
- Leistungsschalter für den Leitungs- und Anlagenschutz

### 1.2.2.1. Gebräuchliche Abkürzungen für Gerätezeichnung im englischen Sprachraum

- ACB: Air Circuit Breaker. Offener, grosser Leistungsschalter, Anlagenschalter für Strombereiche typisch >100A
- CB: Circuit Breaker. Leistungsschalter
- MCB: Miniature Circuit Breaker. Leitungsschutzschalter, ein- oder mehrpolig, für Installationen im Bereich Gebäudetechnik
- MCCB: Moulded Case Circuit Breaker. Kompakter Leistungsschalter (entsprechend dem deutschen Sprachverständnis). Leistungsschalter mit einem tragenden Gehäuse aus Isolierformstoff, das einen integrierten Bestandteil des Leistungsschalters bildet (IEC 947-2).

Nicht zu verwechseln mit:

- MCC: Motor Control Center. Niederspannungs-Schaltanlagen in Einschubtechnik für Motorabzweige mit Hauptschalter und Türverriegelung.
- MCR: Master Control Relay. Hauptsteuerschütz

### 1.2.2.2. Nullpunktlöschende Leistungsschalter

Bei Wechselstrom verlöscht der Lichtbogen bei jedem Stromnulldurchgang selbsttätig. Diese Eigenschaft wird bei nullpunktlöschenden Leistungsschaltern derart ausgenutzt, dass das erneute Zünden des Lichtbogens verhindert wird. Durch Wärmeentzug wird die Lichtbogenstrecke entjonisiert. Es werden ihr die elektrischen Ladungsträger des vorher anstehenden Lichtbogens entzogen. Ein erneutes Durchzünden durch die wiederkehrende Spannung nach dem Nulldurchgang ist verhindert.

Da der Strom erst im natürlichen Nulldurchgang gelöscht wird, weisen nullpunktlöschende Leistungsschalter hohe Durchlasswerte auf. Sie werden eingesetzt für Standardaufgaben wie Leitungs- und Anlagenschutz. Sind ihre Kurzschlussauslöser zeitlich verzögerbar, eignen sie sich besonders für Selektivitätsaufgaben, wo zeitgestaffeltes Ausschalten mehrerer hintereinander geschalteter Leistungsschalter notwendig ist.

### 1.2.2.3. Spezielle Eigenschaften des strombegrenzenden Leistungsschalters

Für die Reduktion der dynamischen und thermischen Beanspruchung des Schutzobjekts muss der Kurzschlussstrom im Entstehen und vor Erreichen des unbeeinflussten Maximalwerts abgeschaltet werden (z.B. für Schutz von Schützen gegen Verschweissen).

Dies wird erreicht durch:

- Schnelles Aufschlagen der Hauptkontakte
- Schneller Aufbau einer hohen Lichtbogenspannung (Lichtbogen in die Löschkammer leiten)

Die reduzierten Durchlasswerte bewirken:

- Reduktion der Stromkräfte auf Sammelschienen (z.B. grössere Trägerabstände)
- Reduktion der thermischen Belastung. Das Verschweissen der Schütz-Kontakte kann verhindert werden. Die Überdimensionierung von Leistungsschützen kann entfallen oder wird verringert. In den Kurzschluss-Koordinationstabellen zeigt sich dies durch kompakte Starterkombinationen mit Komponenten, die meist nach Nennstrom ausgewählt sind.

Strombegrenzende Leistungsschalter vereinfachen deren breiten Einsatz. Es ist das Ziel, nicht mehr komplexe Netzkurzschlussstromberechnungen für jeden Schalter-Einbauort durchführen zu müssen und dass das Thema Kurzschlusskoordination etwa gleich wenig Planungsaufwand fordert wie bei der Schmelzsicherung.

Durch konstruktiven Aufwand soll der Leistungsschalter so gestaltet werden, dass er sich in der Anlage in jeder möglichen Situation unproblematisch bezüglich Abschaltvermögen verhält.

Eigenschaften, die den Leistungsschalter in der Planung so einfach wie eine Schmelzsicherung machen:

- Hohes Schaltvermögen erübrigt Netzberechnungen: In der Praxis ist das Kurzschluss-Niveau am Einbauort eines Leistungsschalters für den Motorabgang meist im Bereich von 1...20 kA. Leistungsschalter mit höherem Schaltvermögen erübrigen Netzberechnungen. Diese Schalter werden an beliebiger Stelle eingesetzt ohne Planung, analog wie Hochleistungs-Schmelzsicherungen.
- Geringe Durchlasswerte: Die Leistungsschütze reagieren auf die vom Schalter stark gedämpften Kurzschlussströme weniger kritisch. Die Kurzschlusskoordination wird vereinfacht, der Blick in

Koordinationsstabellen (der Hersteller führt Koordinationsversuche durch und stellt Koordinationstabellen nach z.B. IEC 947-4-1 Typ "1" oder "2" auf) kann entfallen. Kombinationen aus Schütz und Leistungsschalter, beide ausgewählt nach Nennstrom, können bereits ohne Beachtung einer weiteren Dimensionierungsregel auf schweissfreies Verhalten hin koordiniert sein.

### **1.2.2.4. Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik**

#### **Erkennen von Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik**

Der Einbau von einstellbaren, thermisch verzögerten Überstromauslösern ist noch kein Hinweis, dass dieser Leistungsschalter für den Schutz von Motoren geeignet ist. Die leicht zu Verwirrungen führende Bezeichnung von Leistungsschaltern für den Schutz von Motoren kann auch bedeuten, dass der Schalter sich für den Einsatz zusammen mit einem speziellen Motorschutzgerät eignet (der Schalter soll nicht vor dem Motorschutzgerät auslösen, analog zur Terminologie der aM-Schmelzsicherung, der Sicherung für den Motorschutz).

Echter Motorschutz direkt im Leistungsschalter ist gegeben, wenn die Bimetallauslöser temperaturkompensiert nach IEC 947-4-1 sind und Phasenausfallschutz gewährt ist. Bei elektronischen Auslösern ist auf entsprechende Kennzeichnung für den Motorschutz zu achten. Normalerweise bieten Standardleistungsschalter nur Leitungsschutz.

Leistungsschalter für den Schutz von Motoren weisen mindestens folgende Eigenschaften auf:

- Auf den Motorstrom einstellbare Bimetallauslöser (oder elektronische Auslöser)
- Kompensation der Umgebungstemperatur (bei Bimetall)
- Entsprechende Einrichtungen für sicheren Schutz bei Phasenausfall (z.B. spezielle Eichung, Differentialauslöseschieber oder elektronische Fehlererfassung) und damit Eignung für den EEx e-Bereich

### **1.2.2.5. Leistungsschalter für den Anlagen- und Leitungsschutz**

Die Anforderungen an Leistungsschalter für den Anlagen- und Leitungsschutz sind etwas reduziert:

- Der Strombereich ist oft fix
- Die thermischen Auslöser sind weniger präzise
- Die Temperatur-Kompensation fehlt
- Der Ansprechwert der elektromagnetischen Kurzschlussauslöser ist meist tiefer (z.B.  $3 \dots 4 \times I_N$ )
- Sie schalten gegebenenfalls mit einer Zeitverzögerung ab

Diese oft zeitselektiv staffelbaren Leistungsschalter eignen sich zur Verwirklichung von selektiv abschaltenden Lastabgängen. Ihre meist elektronischen Auslöser erlauben neben den Einstellungen für Überlast- und Kurzschlussansprechwert, die Vorgabe einer Auslöse-Verzögerungszeit (mehrere 10 ms).

Diese Schalter werden für den anlagenseitigen Schutz eingesetzt (Back-up Schutz, Leitungsschutz, Kaskadenschaltung, Selektivität), nicht für den Schutz eines einzelnen Lastabgangs (Motor).

Der Leitungsschutz kann von Bimetallauslösern ohne Temperaturkompensation oder einfachen elektronischen Schutzschaltungen gewährt werden. Für den Schutz eines Motors sind Anlagenschalter zusammen mit einem zusätzlichen Motorschutzgerät einzusetzen.

### **1.2.3. Lastschalter**

Der Lastschalter ist ein mechanisches Schaltgerät, das 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 kann.

Ein Lastschalter darf ein Kurzschluss-Einschaltvermögen, muss jedoch kein Kurzschluss-Ausschaltvermögen haben (IEC 947-1). Kurzschlussströme können geführt (hohe Kurzschlussfestigkeit), nicht aber abgeschaltet werden.

### **1.2.4. Trenner**

Der Trennschalter ist ein mechanisches Schaltgerät, das in geöffneter Stellung den für die Trennfunktion festgelegten Anforderungen entspricht (IEC 947-1). Die Trennfunktion hat die Abschaltung der Spannungsversorgung der gesamten Anlage oder eines Anlagenteils zur Aufgabe, wobei die Anlage oder der Anlagenteil aus Sicherheitsgründen von jeglicher elektrischen Energiequelle getrennt wird. Wichtig ist hier die Öffnungsdistanz. Die Trennung von Pol zu Pol und von Eingang zu Ausgang muss gewährt sein, sei dies durch eine sichtbare Trennstelle oder durch entsprechende konstruktive Massnahmen geräteintern (mechanische Verriegelungseinrichtung) realisiert.

Ein Gerät erfüllt nach IEC 947-1 die Trenneigenschaft, wenn es in der Stellung "Offen" eine Trennstrecke sicherstellt, in der die festgelegte Spannungsfestigkeit zwischen den offenen Kontakten des Hauptstromkreises des Schaltgeräts 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 "Ausgelöst"-Stellung nur dann die Position "Offen" anzeigen, wenn alle beweglichen Schaltstücke in der Position "Offen" sind.

Ein Trenner muss einen Stromkreis nur öffnen und schliessen können, wenn entweder nur ein Strom von vernachlässigbarer Grösse aus- oder eingeschaltet wird oder wenn zwischen den beiden Anschlüssen jeder Strombahn keine merkliche Spannungsdifferenz vorhanden ist. Er kann unter normalen Bedingungen Betriebsströme sowie grössere Ströme bei anormalen Bedingungen, z.B. Kurzschlussströme, während einer bestimmten Dauer führen.

### 1.2.5. Hauptschalter

Jeder elektrische Apparat muss mit einem manuellen Hauptschalter versehen sein, der den Apparat vollständig vom Netz 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 947-3 ausgelegt sein (Lastschalter mit Trennfunktion, siehe oben) und mindestens die Forderungen der Anwendungskategorie AC-23 erfüllen.
- Ein Hauptschalter muss manuell betätigt werden und darf nur eine "AUS"- und eine "EIN"-Stellung haben, die deutlich mit 0 bzw. I markiert ist.
- Ein Hauptschalter muss entweder eine sichtbare Trennstelle oder eine deutliche Anzeige der Schalterstellung haben, die nur "AUS" anzeigen kann, nachdem die Kontaktabstände gemäss IEC 947-3 erreicht worden sind.
- Sofern der Hauptschalter nicht gleichzeitig als NOT-AUS-Schalter dient, darf er keinen roten Griff haben.
- Es muss möglich sein, den Griff in der "AUS"-Stellung mit einem Schloss (z.B. Vorhängeschloss) zu verriegeln.

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.

Ein Hauptschalter, der sich in der Reichweite des Bedienpersonals befindet, muss die Forderung für NOT-AUS-Schalter erfüllen.

## 1.2.6. 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.

- Der NOT-AUS-Schalter muss imstande sein, den Blockierstrom des grössten angeschlossenen Motors plus die Summe der Nennströme der restlichen Lasten gleichzeitig zu unterbrechen.
- Die Kontakte müssen die Trennfunktion erfüllen.
- Der Schalthebel oder -knopf muss von der Position des Bedienpersonals aus gut sichtbar und gut erreichbar sein.
- Der Schalthebel oder -knopf muss rot sein. Die Fläche dahinter oder darunter muss gelb sein, damit der Schalthebel oder -knopf sich deutlich vom Hintergrund abhebt.
- Der NOT-AUS-Schalter darf diejenigen Stromkreise nicht unterbrechen, die zu einer Gefährdung des Personals oder der Maschine führen könnten, wenn sie unterbrochen würden.
- Er muss imstande sein, den totalen Nennbetriebsstrom sämtlicher angeschlossener Geräte zu führen.

## 1.2.7. Zusammenfassung Leistungsschalter als Lastschalter

Anforderungen an Lastschalter (nach IEC 204)	Haupt- schalter	NOT-AUS- Schalter	NOT-AUS Haupt- schalter
Betätigungselement:			
- Schwarzer oder Grauer Hebel und Frontplatte	Ja	Nein	Nein
- Roter Hebel, gelbe Frontplatte	Nein	Ja	Ja
- Abschliessbar	Ja	Nein	Ja
Handbetätigung von Aussen	Nein	Ja	Ja
Leicht zugänglich	Ja	Ja	Ja
Nur eine "EIN" und eine "AUS" Position	Ja	Ja	Ja
Stellungsanzeigen nur "0" und "I"	Ja	Ja	Ja
Abschliessbar in "0"-Stellung von Aussen	Ja	Nein	Ja
Geschützte Eingangsklemmen mit Warn-Symbol	Ja	Nein	Ja

## 1.3. Aufbau eines Leistungsschalters

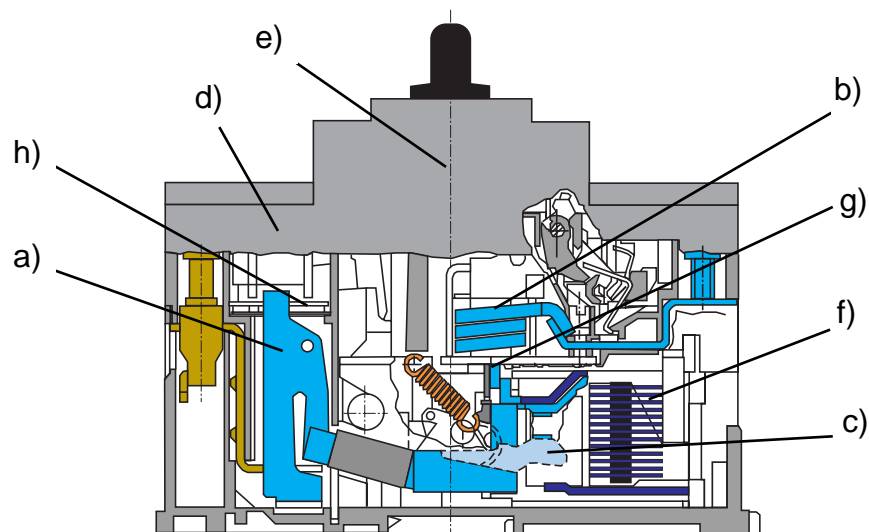


Fig. 1.3-1: Die Hauptfunktionsblöcke des Leistungsschalters

- a) Thermische Überstromauslöser
- b) Elektromagnetische Überstromauslöser
- c) Hauptkontaktsystem
- d) Hilfsschalter
- e) Schaltschloss
- f) Löschkammer (Bleche)
- g) Schlaganker (Hammer)
- h) Differentialauslöseschieber

Die im Bild 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.

In den oberen Strombereichen der Schalter findet zunehmend die Mikroprozessortechnik ihre Anwendung (ca. >250 A). Elektronische Auslöser für Überlast und Kurzschluss werden eingesetzt, Kommunikationsschnittstellen zu speicherprogrammierbaren Steuerungen oder Leitsystemen werden geschaffen.

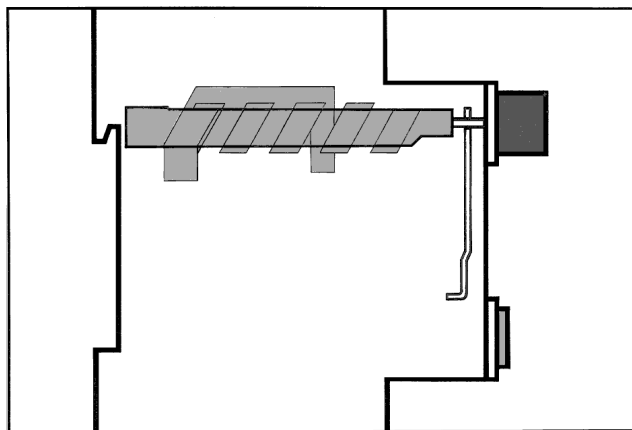
### 1.3.1. Stromfluss im Leistungsschalter

Der Nennbetriebs-, sowie der Kurzschluss- oder Überlaststrom fließt zwischen den oberen und unteren Anschlussklemmen des Leistungsschalters seriell durch die elektromagnetischen und die thermischen Auslöser sowie die Hauptkontakte.

Jedes elektrische Bauteil wird vom selben Strom durchflossen. Unterschiedliche Ströme in Höhe und Dauer, bewirken in den einzelnen Auslösern unterschiedliche Reaktionen.

### 1.3.2. Thermische Überstromauslöser

Betriebsmäßige Überlastungen führen nicht unverzüglich zu gefährlichen Überbeanspruchungen. Der eingebaute Motorschutz mit thermisch verzögerten Bimetallauslösern eignet sich gut, einfache Überlast-Schutzaufgaben zu erfüllen.



*Fig. 1.3-2: Das durch den Motorstrom erwärmte Bimetall des thermischen Überstromauslösers krümmt sich und drückt seiner Skaleneinstellung entsprechend auf die Auslöseklappe des Schaltschlusses.*

Auch im Leistungsschalter fließt der Strom durch thermisch verzögerte Bimetallauslöser. Die Bimetallstreifen biegen sich in Funktion zu ihrer Temperatur und drücken auf eine Klinke im Schaltschloss. Die Höhe der Temperatur ist abhängig von der Heizleistung, hervorgerufen durch den Strom, welcher durch den Leistungsschalter fließt. Die Auslösegrenze, also der zurückzulegende Weg der Bimetallspitzen bis zum Ansprechen der Auslöseklappe, wird durch die Stromeinstellung am Skalenknopf eingestellt.

Ist die Auslöseklappe gedrückt, löst das Schaltschloss aus, die Hauptkontakte werden geöffnet, der Überstrom abgeschaltet bevor ein Schaden an Motorwicklung, Leitungen, etc. entstehen kann.

### 1.3.3. Elektromagnetische Überstromauslöser

Bei Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik regen Überströme ab einem Bereich des 10...16 fachen des maximalen Skaleneinstellbereiches zeitlich praktisch unverzüglich den elektromagnetischen Überstromauslöser an. 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  $<100\text{ A}$ ) ist die Hauptstrombahn hier 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, die Hauptkontakte springen in Stellung AUS, der Überstrom ist abgeschaltet.

### Lösung für sehr schnelle, stark strombegrenzende Leistungsschalter

Mechanische Systeme haben eine gewisse Trägheit. Diese liegt im Bereich von wenigen Millisekunden und scheint daher auf den ersten Blick als vernachlässigbar. Will man aber strombegrenzende Leistungsschalter bauen, welche hohe Kurzschlussströme bereits im Entstehen eingrenzen und limitieren, muss man sich eingehend mit den Massenträgheitsmomenten von beweglichen Kontakten, Federn und Hebeln befassen und Millisekunden im Ausschaltablauf einsparen. Denn ein Kurzschluss hat bereits nach einem Viertel einer Sinus-Periodendauer, also etwa 5 Millisekunden bei 50 Hz (USA 4.2 ms, da 60Hz), seinen maximalen Wert erreicht (Annahme Kurzschlussbeginn im Strom-Nulldurchlauf). Dies gilt es ja zu verhindern.

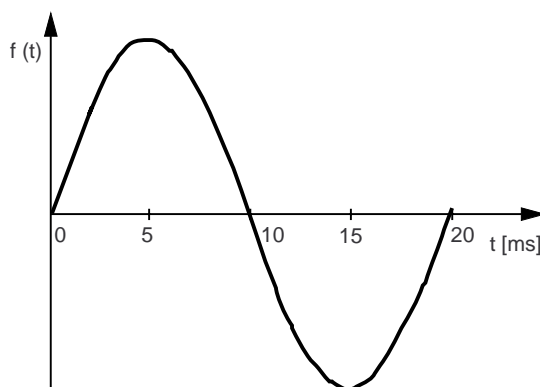


Fig. 1.3-3: Sinusperiode bei 50 Hz. Das Amplitudenmaximum ist bereits nach einer Viertel-Periode erreicht.

Der elektromagnetische Überstromauslöser seinerseits reagiert fast unverzögert ( $<1\text{ ms}$ ) auf den schnell ansteigenden Strom. Nur die dahintergeschaltete Auslösemechanik arbeitet zu träge. So wird diese einfach überbrückt, indem zusätzlich der nun als Schlaghammer ausgebildete Anker des Magnetauslösers bei strombegrenzenden Leistungsschaltern direkt auf die Hauptkontakte wirkt. Die Kontakte werden bereits magnetisch aufgeschlagen, bevor das Schaltschloss anspricht. Dieses muss nun lediglich die Kontakte am Zurückfallen hindern und in AUS-Stellung fixieren.

Erst das Öffnen der Kontakte, das Zünden eines Lichtbogens schliesslich, bewirkt eine Reduktion des Stromes und ein Abschalten des Kurzschlusses. Gebaut mit Schlaganker werden Leistungsschalter in den unteren Strombereichen bis ca. 100 A.

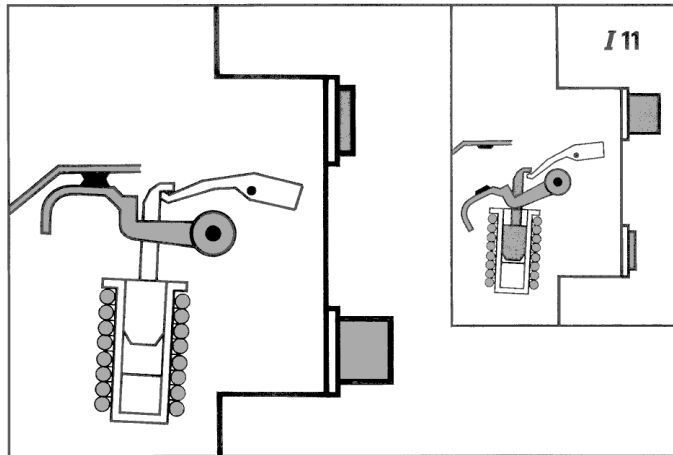


Fig. 1.3-4: Prinzip Schlaganker. Durch das starke Magnetfeld, erzeugt von einem hohen Stromfluss, werden die Hauptkontakte fast unverzögert aufgeschlagen.

### 1.3.4. Hauptkontaktsystem

Die Anforderungen an einen Leistungsschalter-Hauptkontakt:

- Hohes Einschaltvermögen
- Hohes Ausschaltvermögen
- Verlustarme Stromführung des Nennbetriebsstromes
- Geringer Kontaktabbrand
- Kleiner Kontaktwiderstand
- Geringes Massenträgheitsmoment
- Optimale, die Lichtbogenwanderung begünstigende Form
- Kostengünstig realisierbar

Diese zu erfüllen, stellt einige Anforderungen an die Konstruktion und erfordert fundierte Kenntnisse der Physik und Werkstofftechnik. Kaum ein Material oder eine Ausführungsform erfüllt alle Anforderungen ideal. Kompromisse müssen geschlossen und ihre Auswirkungen anhand komplexer Rechenmodelle simuliert und aufwendig im Kurzschlusslabor bewiesen werden.

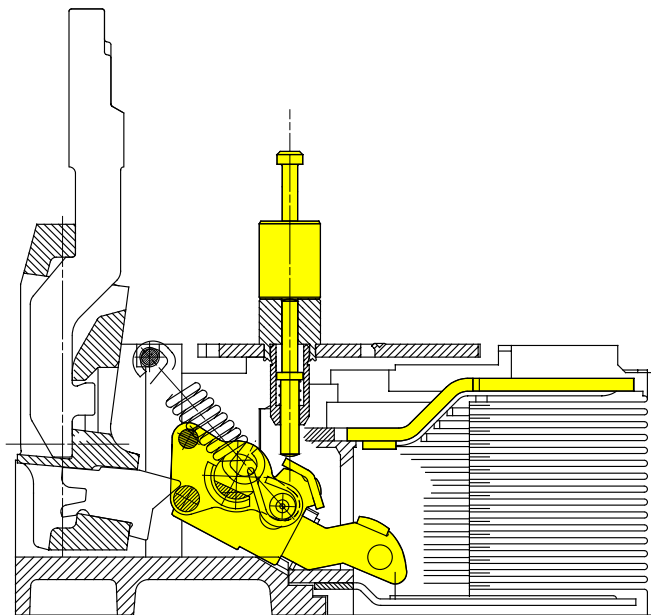


Fig. 1.3-5: Hauptkontakt des Leistungsschalters 140-CMN

Ähnliches gilt für die Ausbildung der Löschkammer. Soll der Schaltlichtbogen schnell aus dem Bereich der Kontaktflächen geführt, gekühlt, aufgeteilt, verlängert und so zum Löschen gebracht werden, müssen die Löschkammerbleche mit ihrer Form und Anordnung eine funktionelle Einheit mit dem Hauptkontakt bilden.

Ein Kontaktsystem ist auf gutes Schaltverhalten bei einer bestimmten Netzspannung konstruiert. Ein z.B. für 400 V ausgelegtes Kontaktsystem weist bei Netzspannungen über 400 V ein reduziertes Schaltvermögen auf (Netzspannungen unter 400 V sind dabei unkritisch). Diese Reduktion führt daher, dass zur Kurzschlusslöschung im Kontaktsystem zur Netzspannung eine Gegenspannung aufgebaut wird (Lichtbogenspannung). Die Höhe der Lichtbogenspannung ist gegeben durch die Konstruktion des Kontaktsystems (Anzahl Löschkammerbleche). Nur solange diese Gegenspannung höher als die Netzspannung ist, können Kurzschlussströme schnell begrenzt und gelöscht werden.

Für 400 V ausgelegte Leistungsschalter sind daher bei 690 V nur mit reduziertem Ausschaltvermögen einsetzbar.

## Ausschaltvorgang im Kurzschlussfall:

Technische Stromkreise verhalten sich fast ausschliesslich induktiv. In der Induktivität  $L$ , dazu gehört auch die Leitungsinduktivität, ist bei Stromfluss in jedem Moment im Strom  $i$  eine magnetische Energie nach Gleichung (1) enthalten, die den Ausschaltvorgang nach Gleichung (2) beeinflusst:

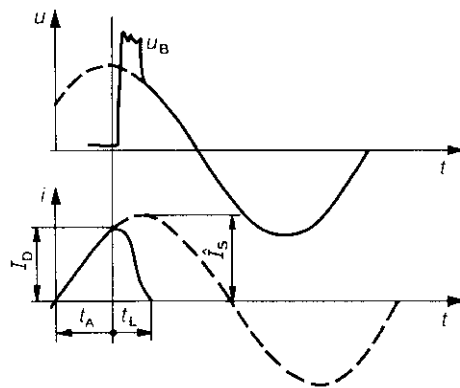
$$E_{\text{magn}} = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1)$$

$$u_n = Ri + L \frac{di}{dt} + u_s \quad (2)$$

$$\int u_n idt = \int Ri^2 dt + \frac{1}{2} Li^2 + \int u_s idt \quad (3)$$

Beim Ausschalten muss nach Gleichung (3) sowohl die magnetische als auch die vom Netz während der Ausschaltung noch nachgelieferte Energie berücksichtigt werden. Im folgenden Bild ist eine Kurzschlussabschaltung mit einem Leistungsschalter gezeigt. Den vor dem Kurzschluss geflossenen Betriebsstrom kann man vernachlässigen, so dass die Betrachtung des Kurzschlussstromkreises allein ausreicht. Bei einem Fehler steigt, solange das Schutzgerät noch nicht reagiert, der Kurzschlussstrom mit grosser Steilheit an. Nach einer gewissen Verzögerung, aufgrund der Reaktionszeit des Schalters, beginnt nach der Kontaktöffnung die Spannung am Schalter infolge Lichtbogenverlängerung und -bewegung anzusteigen, begrenzt den steilen Stromanstieg und reduziert anschliessend den Strom bis auf Null. Der Verlauf der Schaltspannung  $u_s$  charakterisiert einerseits Art und Wirkung des Schaltgeräts und beschreibt andererseits die Wirkung im elektrischen Stromkreis.

a) Verlauf von Strom und Spannung



b) Ersatzschaltbild

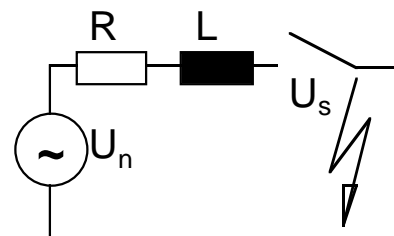


Fig. 1.3-6: Kurzschlussauschaltung in einem Niederspannungsstromkreis  
 $U_B$  Lichtbogenspannung,  $\hat{I}_S$  Stosskurzschlussstrom,  $I_D$  Durchlassstrom,  
 $t_A$  Ausschaltverzögerung,  $t_L$  Lichtbogendauer;

## 1.3.5. Hilfsschalter

Die Hilfsschalter ermöglichen die funktionelle Einbindung des Schutzorgans in die Steuerung. EIN, AUS, Überlast- oder Kurzschlussauslösung kann mit Hilfe von entsprechenden Hilfsschaltern signalisiert werden. Diese Hilfsstromschalter lassen sich am Leistungsschalter an- oder einbauen und sind entweder auf Klemmen geführt oder über freie Drahtenden extern weiter verwendbar.

## 1.3.6. Schaltschloss

Das Schaltschloss ist ein Federkraftspeicher, der beim Einschalten gespannt wird und beim Ausschalten die Hauptkontakte in die Offenstellung führt.

Als eigentliches Schaltzentrum des Schalters werden im Schaltschloss Informationen betreffend Überstrom und Kurzschluss, aber auch Aktionen durch manuelles Schalten am Leistungsschalter oder eines Fernantriebs, an die Haupt- und Steuerkontakte weitergegeben. Die mit hohem Kontaktdruck geschlossen gehaltenen Hauptkontakte müssen mit niedrigen Auslösekräften geöffnet werden. Optische Signalisationen über Schaltzustand oder Ausgelöststellung werden an der Schalterfront gesetzt.

Zusätzlich muss eine Freiauslösung gewährleistet sein, die ein Ausschalten des Leistungsschalters auch bei äusserlich blockiertem Schalthebel ermöglicht oder z.B. beim Einschalten auf einen Kurzschluss die Kurzschlussabschaltung zulässt.

## 1.4. Funktionen eines Leistungsschalters

Leistungsschalter vereinigen mehrere Hauptfunktionen und bilden leistungsfähige Funktionseinheiten in Verteilungen und Anlagen.

Folgende Funktionen lassen sich mit entsprechendem Schalterzubehör in einem einzigen Gerät vereinen:

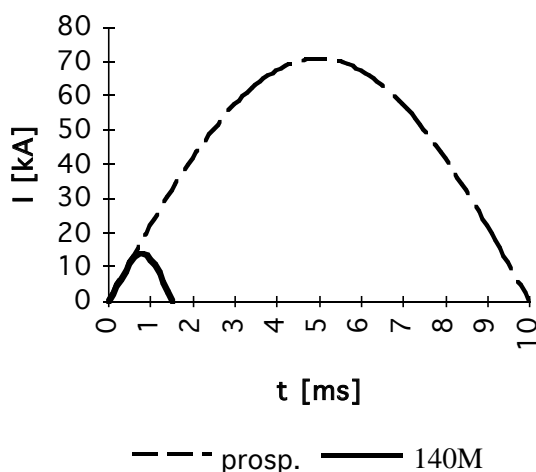
- Kurzschlusschutz
- Motorschutz
- Leitungsschutz
- Anlagenschutz
- Betriebszustandssignalisation
- Auslösemeldung
- Fernschalten
- Trennen
- Abschliessen mittels Schloss

Besonders im unteren Leistungsbereich übernimmt er oft auch das betriebsmäßige Schalten als manueller Schalter.

## 1.4.1. Kurzschlussströme abschalten

Als Beispiel sei der oben erläuterte, schnelle Leistungsschalter mit Strombegrenzung betrachtet.

Um einen Kurzschluss im Entstehen zu begrenzen, müssen die Kontakte durch den Schlaganker in wenigen Tausendstel einer Sekunde geöffnet werden. Hochleistungsfähige Geräte benötigen dazu weniger als 1 Millisekunde. Sofort zündet ein Lichtbogen, der - sobald in die Löschkammer geleitet - eine hohe Lichtbogenspannung aufbaut. Die Lichtbogenspannung kann vereinfacht als Widerstand betrachtet werden, der sofort in den Stromkreis geschaltet wird und den entstehenden Kurzschlussstrom unverzüglich begrenzt.



*Fig. 1.4-1: Durchlassstrom des schnellen Leistungsschalters 140M. Ein theoretischer Kurzschlussstrom von 50 kA effektiv (gestrichelte Linie), wird vom schnell öffnenden Leistungsschalter bereits am Entstehen gehindert (schwarze Linie). Nullpunktlöscher lassen den vollen Kurzschlussstrom einer ganzen Sinushalbperiode durch.*

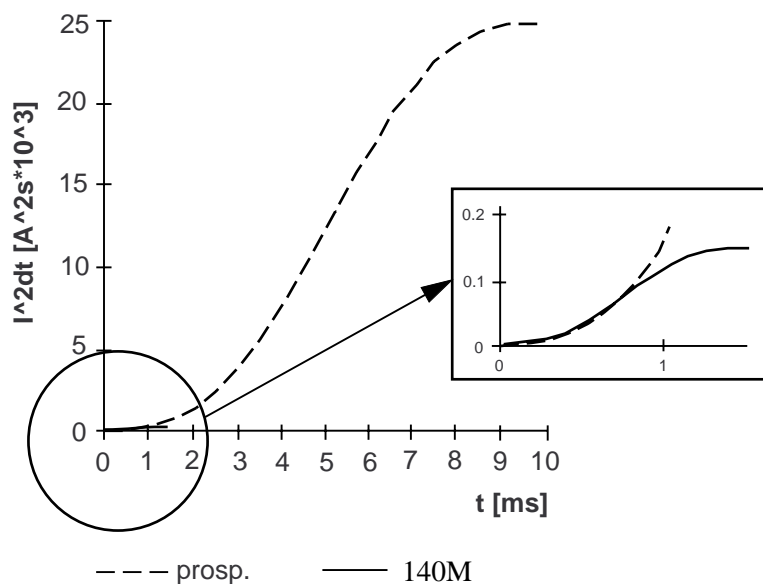


Fig. 1.4-2: Durchlassenergie des schnellen Leistungsschalters 140M. Die Kurzschlussenergie über eine Zeit aufsummiert, auch Durchlassintegral  $I^2t$  bezeichnet, verdeutlicht noch weiter wie Anlageteile und besonders Schaltgeräte wie Schütze geringeren Belastungen ausgesetzt sind, geschützt durch strombegrenzende Leistungsschalter an Stelle von Nullpunktlöschern.

Bemerkung: Obwohl in der Umgangssprache Durchlassenergie genannt, stellt das Joule-Integral nur ein Mass für die Durchlassenergie dar, hat aber nicht die Dimension einer Energie. Das Joule-Integral multipliziert mit dem Widerstand des Strompfades ergibt strenggenommen die Energie.

Die dadurch geringen Durchlasswerte der strombegrenzenden Leistungsschalter bewirken, dass nachfolgende Geräte und Anlageteile keinen oder nur wenig Schaden nehmen. Verschweisste Kontakte der Leistungsschütze oder großflächige Zerstörungen an Kabeln und Stromschiene durch wandernde Störlichtbögen können bei richtiger Geräteabstimmung nicht entstehen.

## 1.4.2. Motoren sicher schützen

Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik nach IEC 947-4-1 erfüllen die Ansprüche an einen thermischen Motorschutz. Einstellbare, stromabhängig verzögerte Überstromauslöser schützen vor thermischer Überlast. Die Temperaturkompensation und die präzise Eichung jedes Überlastauslösers sichern eine genaue und zuverlässige Auslösung. Oft ist auch eine Differentialauslösung für den Schutz bei Einphasenlauf miteingebaut. Nach einer Kurzschluss-Abschaltung darf die Auslösecharakteristik nicht unbemerkt beeinträchtigt sein.

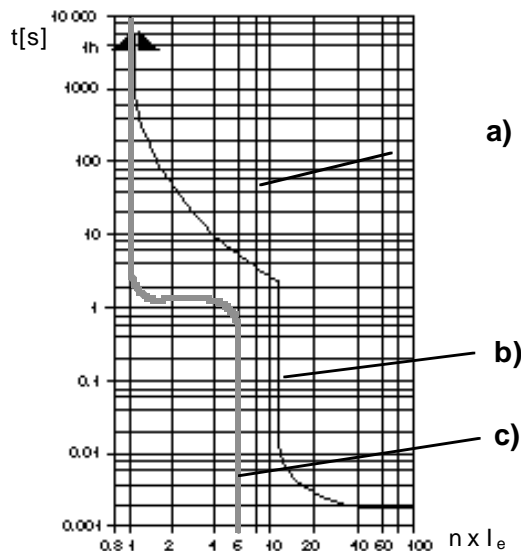


Fig. 1.4-3: Auslösekennlinie eines Leistungsschalters mit Motorschutzcharakteristik. Die graue Linie zeigt den Stromverlauf eines Normmotors. Nach Erreichen der Nenndrehzahl (hier nach ca. 1.5 Sekunden) reduziert sich der Anlaufstrom ( $6 \times I_n$ ) auf den Motornennstrom ( $1 \times I_n$ ).

- a) Kennlinie Bimetallauslöser
- b) Kennlinie elektromagnetischer Auslöser
- c) Motorenkennlinie

### 1.4.3. Leitungen schützen und optimal ausnutzen

Für Leitungsschutz genügen Leistungsschalter mit einfachen Überstromauslösern ohne Temperaturkompensation.

Bei Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik ist automatisch auch der Leitungsschutz gewährleistet (Leitungen sind thermisch weniger kritisch als Motoren). Durch die Möglichkeit, den Leistungsschalter auf den Motornennstrom einzustellen, dürfen die Leitungen je nach nationalem Standard nach dem Leistungsschalter-Einstellwert oder nach der oberen Einstellgrenze dimensioniert werden. Während bei Schmelzsicherungen Typ gI eine leichte Überdimensionierung der Sicherung um eine oder zwei Stromstufen und damit des Querschnitts notwendig ist (Verhindern einer Auslösung bei Motoranlauf), können durch Leistungsschalter geschützte Motorzuleitungen geringer dimensioniert und damit besser ausgenutzt werden.

### 1.4.4. Anlagen schützen

Für den Anlagenschutz sind Schalter ohne Temperaturkompensation zulässig. Meist müssen diese nicht strombegrenzend sein, dafür kann zusätzlich Selektivität gefragt sein.

Strombegrenzende Leistungsschalter mit niedrigen Durchlasswerten im Kurzschlussfall beanspruchen aber nicht nur die nachgeschalteten Geräte weniger, auch Anlagenteile, wie Stromschienen, Kabelinstallationen, etc., werden geschont im Sinne von reduzierter thermischer und dynamischer Belastung. Besonders die geringeren dynamischen Kräfte auf benachbarte, parallelgeführte Leitungen erlauben oft eine mechanisch weniger anspruchsvolle Befestigung als bei nullpunktlöschenden Schaltern notwendig. Durch strombegrenzende Leistungsschalter geschützte Leitungen und Stromschienen müssen weniger oft abgestützt und mechanisch verbunden werden. Grössere Stützträgerabstände sind zulässig (Stützträgerabstände sind abhängig vom Kurzschlussstrom, bei vorgeschaltetem Leistungsschalter also von dessen Durchlassstrom. Hinweise des Schienensystemherstellers befolgen).

### 1.4.5. Integration in Informationsfluss der Steuerung

Die Anforderung, Betriebszustände von Schalt- und Schutzorganen zu erfassen, gewinnt mit zunehmender Automatisierung an Bedeutung. Der Leistungsschalter lässt sich in den Informationsfluss einer Anlage leicht integrieren. Er kann mit der Steuerung kommunizieren.

- Hilfsschalter signalisieren den Zustand des Leistungsabgangs ob dieser ein- oder ausgeschaltet ist.
- Signalschalter geben Information über den Ausgelöstzustand des Schalters. Oft ist die Information auch getrennt abrufbar, ob eine Abschaltung magnetisch (Kurzschluss) oder thermisch (Überlast) erfolgte. Direkt zielgerichtete, die Störung behebende Aktionen lassen sich einleiten (rasche Ortung ergibt Zeitersparnis).
- Arbeitsstromauslöser erlauben eine Ausschaltung von fern, z.B. für elektrische Verriegelung von Leistungsschaltern untereinander.
- Unterspannungsauslöser für sicherheitstechnische Anwendungen verhindern z.B. einen Selbstanlauf nach einem Spannungsunterbruch oder ermöglichen NOT-AUS-Funktionen.
- Motor- oder Fernantriebe eröffnen die Möglichkeit, die vollständige Befehlsgabe an den Leistungsschalter von fern vorzunehmen. Die von Hand am Drehhebel realisierbaren Manipulationen können ferngesteuert getätigt werden. Leistungsabgänge lassen sich ohne Eingriff einer Bedienerperson vor Ort zu- oder abschalten. Die Rückstellung eines ausgelösten Leistungsschalters in einer ferngesteuerten Verteilanlage ist möglich. Auch kann der ein- und ausschaltbare Leistungsschalter ein verlinktes Schütz in manchen Applikationen ersetzen (z.B. Schaltaufgaben in Netzen mit grossen Spannungseinbrüchen, Impulsschaltung ohne Aufwand an Halteleistung, Notstromversorgungen).

### **1.4.6. Betriebsmässiges Schalten**

Im unteren Leistungsbaubereich werden Leistungsschalter auch eingesetzt, um kleinere, eventuell mobile Anlagen betriebsmässig von Hand zu schalten. Die elektrische Lebensdauer des Schalters wird durch die in diesen Applikationen niedrigen Schaltzahlen kaum ausgenutzt. Der Kompaktleistungsschalter ersetzt die Kombination Sicherung, Motorschutzgerät plus Lastschalter (z.B mobile Tischfräse, tragbare Tauchpumpe).

### **1.4.7. Trennen**

Die in der Norm IEC 947-1 festgehaltene Anforderungen an Trenner (siehe Definition vorne), können auch von Leistungsschaltern mit abschliessbarem Handhebel erfüllt werden (Angaben des Herstellers bezüglich Einhaltung der Trenneigenschaft beachten).

### **1.4.8. Abschliessen mittels Schloss**

Wo an Maschinen oder Anlageteilen gearbeitet wird, muss der Hauptschalter durch Vorhängeschlösser abschliessbar sein. Leistungsschalter mit Abschliessvorrichtung erfüllen auch diese Vorschrift ohne grösseren Zusatzaufwand.

## 2. Leistungsschaltertechnologie

### 2.1. Zusammenfassung

Beim Einsatz von Leistungsschaltern im Motorstarter kommt es auf technische Themenbereiche an wie Berechnung von Netzkurzschlussströmen, Geräteauswahl nach Schaltvermögen, Selektivitätsbetrachtungen, Einsatz bei erschwerten Anlauf- oder Betriebsbedingungen und Dimensionierung für richtige Kurzschlusskoordination.

Vorteilhaft ist, dass die Anwendung moderner Leistungsschalter, mit guten, den Kurzschlussstrom eingrenzenden Eigenschaften, in den meisten Fällen die aufwendige Klärung all dieser technischen Fragen erübrigen kann. Heute werden spezielle Leistungsschalter direkt für ihre Aufgabe als Komponente in Startern konstruiert.

Die Kurzschlusskoordination nach IEC 947-4-1 Typ "2" (keine Beschädigung der Starterteile, nach Kurzschlussabschaltung für weiteren Betrieb geeignet) kann mit Standardkomponenten (z.B. Leistungsschalter 140M + Schütz), nach Motornennstrom ausgewählt, automatisch gegeben sein, ohne oder nur mit leichter Überdimensionierung der Leistungsschütze.

Ist das Kurzschluss-Abschaltvermögen ausreichend hoch (z. B.  $I_{cu}$  50 kA, 400 V), kann der Leistungsschalter unabhängig von seinem Installationsort im Netz, jeden möglichen Kurzschlussstrom stets sicher und in kürzester Zeit erkennen, begrenzen und ausschalten. Aufwendige, oft nur ungenau durchführbare Netzkurzschlussstromberechnungen entfallen.

Die aktuelle Leistungsschaltertechnologie vereinfacht die schmelzsicherungslose Anlagenplanung, speziell im Bereich Motorstarter. Um sämtliche Aspekte rund um die Leistungsschalter trotzdem zu verstehen, wird im Folgenden auf Themen eingegangen wie:

- Netzkurzschlussstromberechnung an der Schaltereinbaustelle
- Schaltvermögens- und Selektivitätsbetrachtungen im Kurzschlussfall
- Überlastschutz unter Spezialbedingungen
- Kurzschlusskoordination

### 2.2. Kurzschlussströme im Netz

Ein Kurzschluss in einen Stromkreis ist ein Störfall, der durch Beschädigung oder Überbrückung der Betriebs-Isolation entsteht. Aufgabe des Kurzschlusschutzorgans ist, die Auswirkungen dieses Fehlers zu begrenzen und Schäden als Folge davon zu reduzieren.

Um Schutzorgane richtig entsprechend ihrem Schaltvermögen oder den Selektivitätsansprüchen auszuwählen, muss der zu erwartende Kurzschlussstrom bekannt sein. Dies gilt für einen Leistungsschalter wie auch für eine Schmelzsicherung. Übersteigt der tatsächlich auftretende Kurzschlussstrom das Schaltvermögen des Schutzorgans, ist das korrekte Kurzschlussabschalten nicht gewährleistet. Massive Zerstörungen und Betriebsunterbrüche können die Folge sein.

Die Höhe des grösstmöglichen Kurzschlussstroms, des unbeeinflussten (prospektiven) Kurzschlussstromes, hängt wesentlich ab von der Impedanz der Fehlerstelle, der Entfernung zur Netzeinspeisung, der dazwischenliegenden Leiterquerschnitte und Geräte, von der Grösse der Speisung (Leistung von Trafo, Generator) und der Netzart.

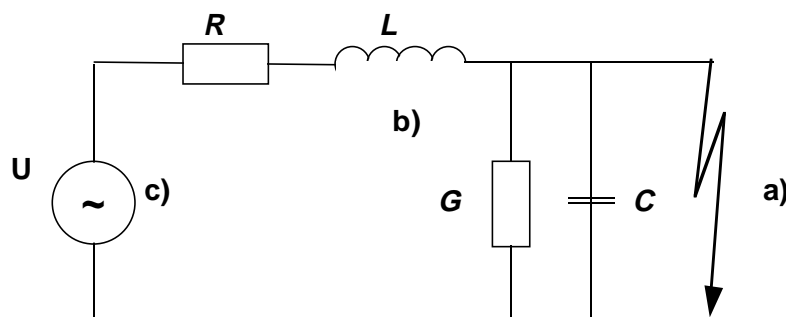


Fig. 2.2-1: Einflussfaktoren auf die Höhe des effektiven Kurzschlussstroms. a) Impedanz der Fehlerstelle, b) Schleifen- und Geräteinnenwiderstand, c) Grösse der Quelle

Es muss unterschieden werden zwischen den:

## 2.2.1. Kurzschlussarten

In einem Drehstromnetz können Kurzschlüsse zwischen drei Aussenleitern, zwischen zwei Aussenleitern oder zwischen einem Aussenleiter und dem Neutral-Leiter oder Erde auftreten. Je weiter die Kurzschlussstelle von der Speisung entfernt ist, umso geringer sind die Kurzschlussströme. Die dazwischenliegenden Leitungen und Geräte wirken als Dämpfung. Der höchste Strom tritt bei dreipoligem sowie einpoligem Kurzschluss unmittelbar an den niederspannungsseitigen Klemmen des Transformators auf, wenn der Transformator die einzige Speisequelle für den Kurzschluss ist.

Vereinfachend kann ein starres Netz angenommen werden, d.h. der Einschwingvorgang wird vom Verhalten des Hochspannungsnetzes nicht beeinflusst.

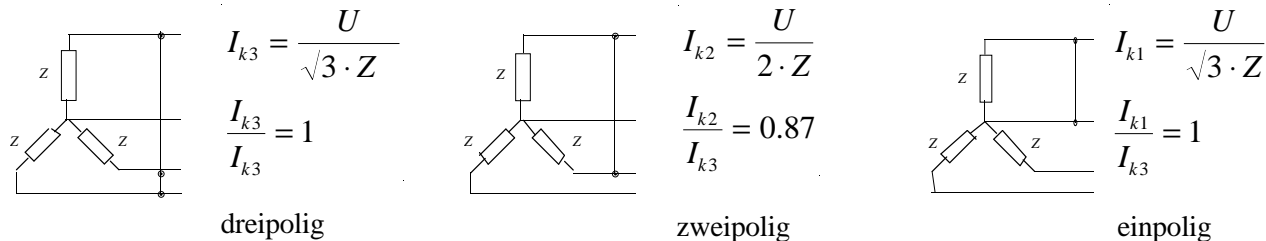


Fig. 2.2-2: Arten von Kurzschlüssen und Höhe ihrer Kurzschlusswechselströme im Drehstromnetz.

Die Höhe des Kurzschlussstroms hängt von der Kurzschlussart und der Entfernung vom speisenden Transformator ab. Der höchste Kurzschlussstrom tritt bei dreipoligem sowie einpoligem Kurzschluss unmittelbar an den niederspannungsseitigen Klemmen des Transformators auf.

### 2.2.2. Stosskurzschlussstrom

Ein Kurzschluss entsteht meist nicht im Zeitpunkt des natürlichen Stromnulldurchgang des Dauerkurzschlussstromes. Dadurch erhält sein Verlauf eine asymmetrische Komponente (Gleichstromanteil)

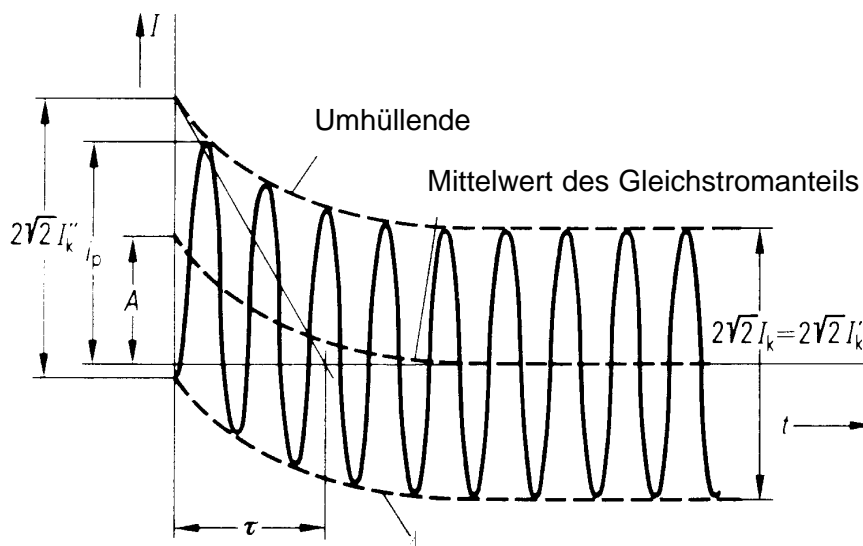


Fig. 2.2-3: Einschwingen des Kurzschlussstroms  
Verlauf des Kurzschlusswechselstroms bei generatorfernem Kurzschluss.  
Kurzschlussbeginn im Spannungsnulldurchgang, asymmetrischer Stromverlauf.

Der Anfangswert des Kurzschlussstroms, der Stosskurzschlussstrom, ist bei asymmetrischem Stromverlauf um einen Faktor grösser, als der Spitzenwert des Dauer-Kurzschlussstroms. Dieser vom Verhältnis zwischen Widerstand und Induktivität des Netzzweiges abhängige Faktor  $\kappa$  (Kappa), ist für die Berechnung des Stosskurzschlussstromes  $I_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_K''$  aus folgendem Diagramm zu entnehmen.

Der Stosskurzschlussstrom  $I_s$  ist massgebend für die dynamische Beanspruchung der Schaltanlage.

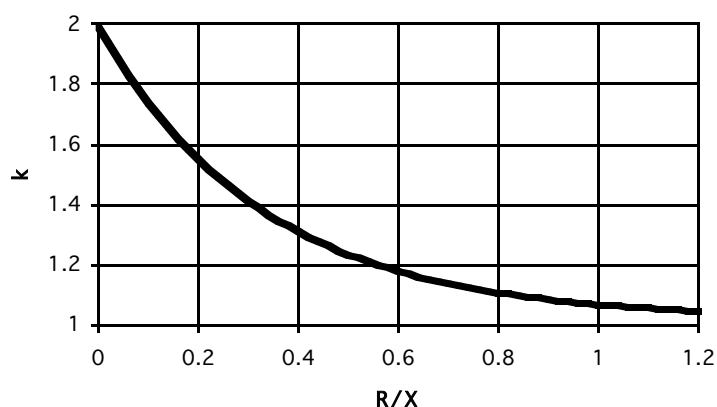


Fig. 2.2-4: Der Faktor  $\kappa$  beeinflusst den Stosskurzschlussstrom (Stossfaktor) in Abhängigkeit von  $R/X$  ( $\kappa = 1.022 + 0.96899 \cdot e^{-3.0301 \cdot R/X}$ )

In der Praxis liegt der Faktor  $\kappa$  meist im Bereich von ca. 1,1...1,5.

### 2.2.3. Berechnung von Kurzschlussströmen in Transformatornähe

Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass das den Transformator speisende Mittel- oder Hochspannungsnetz eine sehr grosse, sogar unendlich grosse Kurzschlussleistung hat (kritischster Fall, Vernachlässigung einer primärseitigen Dämpfung).

Wird der Leistungsschalter als Einspeise-, Kuppel oder Verteilerschalter in Transformatornähe eingesetzt, ist die überschlagsmässige Ermittlung des Kurzschlussstroms ausreichend (keine relevanten Dämpfungsfaktoren). Mit Hilfe der dem Leistungsschild entnommenen Kurzschlussspannung  $U_k$  des Transformators lässt sich eine Faustformel ableiten: Der Transformator-Nennstrom dividiert durch die Kurzschlussspannung ergibt den Kurzschlussstrom.

$$I_k'' = I_{N \text{ Trafo}} \times 100 / U_k$$

Wobei gilt:

$I_K''$  Anfangskurzschlusswechselstrom in A

$I_{N \text{ Trafo}}$  Nennstrom in A

$U_K$  Kurzschlussspannung in %

Der Transformator-Nennstrom  $I_{N \text{ Trafo}}$  berechnet sich:

$$I_{N \text{ Trafo}} = \frac{S_{\text{Trafo}} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U}$$

$S_{\text{Trafo}}$  Nennleistung in KVA

$U$  Nennspannung der Unterspannungsseite in V

Ein Rechenbeispiel:

Transformator mit:

$S_{\text{Trafo}} = 1000 \text{ kVA}$ ;  $U_K = 4\%$ ;  $U = 400 \text{ V}$

$$I_{N \text{ Trafo}} = \frac{S_{\text{Trafo}} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1000 \text{ kVA} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 1443 \text{ A}$$

$$I_K'' = I_{N \text{ Trafo}} \cdot \frac{100}{U_K} = 1443 \text{ A} \cdot \frac{100\%}{4\%} = 36'075 \text{ A}$$

Der Anfangs-Kurzschlussstrom in Transformatornähe liegt nach diesem Beispiel bei 36 kA. Das Ausschaltvermögen des hier montierten Leistungsschalters muss diesen Wert übersteigen. Wird ein hochleistungsfähiger Leistungsschalter eingesetzt, mit einem Grenz-Kurzschlussausschaltvermögen  $I_{cu}$  von z.B. 50 kA oder mehr, ist es unerheblich, ob der gerechnete Wert nach Faustformel sehr exakt ist. Der gewählte Leistungsschalter würde ausreichende Sicherheitsreserven bieten.

Die oben errechneten Stromgrößen können auch direkt aus der Tabelle "Nenn- und Kurzschlussströme von Drehstrom-Normtransformatoren" entnommen werden.

Tabelle Fig. 2.2-5: Nenn- und Kurzschlussströme von Drehstrom-Normtransformatoren

Sekundär-Nennspannung 400/230 V

Nennleistung [kVA]	Nennstrom [A]	Kurzschlussspannung $U_k$	
		4 %	6 %
		Kurzschlussstrom	
		[A]	[A]
50	72	1805	1203
100	144	3610	2406
160	230	5776	3850
200	288	7220	4812
250	360	9025	6015
315	455	11375	7583
400	589	14450	9630
500	722	18050	12030
630	910	22750	15166
800	1156	28900	19260
1000	1444	36100	24060
1250	1805	45125	30080
1600	2312	57800	38530
2000	2882	72200	48120

Sekundär-Nennspannung 690/400 V

Nennleistung [kVA]	Nennstrom [A]	Kurzschlussspannung $U_k$	
		4 %	6 %
		Kurzschlussstrom	
		[A]	[A]
50	42	1042	696
100	84	2082	1392
160	133	3325	2230
200	168	4168	2784
250	210	5220	3560
315	263	6650	4380
400	336	8336	5568
500	420	10440	7120
630	526	13300	8760
800	672	16672	11136
1000	840	20840	13920
1250	1050	26060	17480
1600	1330	33300	22300
2000	1680	41690	27840

## 2.2.4. Berechnung von Kurzschlussströmen im Strahlennetz

Betrachtet man einen Netzzweig von einem Einspeisepunkt ausgehend und verfolgt diesen strahlenartig entlang allen Leitungen und Abzweigungen, stellt man fest, dass die Höhe der möglich auftretenden Kurzschlussströme abnehmen, je weiter man sich vom Transformator entfernt. Jedes Stück Leitung, jedes eingebaute Gerät bildet einen Widerstand, welcher kurzschlussstrombegrenzend wirkt. Um die Höhe der maximal noch auftretenden Kurzschlussströme zu ermitteln, muss die Impedanz der zwischen dem Transformator und dem Leistungsschalter liegenden Leitungen mit Hilfe von Formeln oder einfachen Diagrammen berechnet werden.

Der Wechselstrom-Wirkwiderstand  $Z$  von Kabeln setzt sich aus dem Gleichstromwiderstand  $R$  und den bei Wechselstrom hinzukommenden induktiven und kapazitiven Widerstand  $X_L$  und  $X_C$  nach Formel  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  zusammen. Der kapazitive Widerstand  $X_C$  bei Netzkabeln und Stromschienen ist sehr gering und daher nicht relevant. Er wird später auch nicht mehr erwähnt.

### Berechnung Gleichstromwiderstand

Der Gleichstromwiderstand  $R$  errechnet sich:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

- $R$  Gleichstromwiderstand einer Leitungsader  $\Omega$   
 $\rho$  spezifischer Widerstand des Leitermaterials  $\left[ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$   
 (Kupfer:  $\rho = 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$  / Aluminium:  $\rho = 0.029 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ )  
 $l$  Leiterlänge [m]  
 $A$  Leiterquerschnitt [ $\text{mm}^2$ ]

**Rechenbeispiel:** Widerstand einer Leitungsader  
 Kupferseil, Länge 50 m, Querschnitt 25  $\text{mm}^2$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 250\text{m}}{25\text{mm}^2} = 35\text{m}\Omega$$

Der ohmsche Wirkwiderstand von Kupfer- und Aluminiumleitern kann auch der folgenden Tabelle entnommen werden.

**Tabelle Wirkwiderstand**

<b>Stromschienen</b>				<b>Kabel</b> (4 Leiter, Kunststoffisolation)		
<b>Dimension</b>	<b>Querschnitt</b>	<b>Widerstand</b>		<b>Querschnitt</b>	<b>Widerstand</b>	
		<b>Cu</b>	<b>Al</b>		<b>Cu</b>	<b>Al</b>
[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mΩ/m]	[mΩ/m]	[mm <sup>2</sup> ]	[mΩ/m]	[mΩ/m]
				0,75	23,73	
				1	17,80	
				1,5	11,87	
15x2	30	0,593	0,967	2,5	7,120	
15x3	45	0,396	0,644	4	4,450	
20x2	40	0,445	0,725	6	2,967	
20x3	60	0,297	0,483	10	1,780	2,900
20x5	100	0,178	0,290	16	1,112	1,813
25x5	125	0,142	0,232	25	0,712	1,160
30x3	90	0,197	0,322	35	0,508	0,829
30x5	150	0,118	0,193	50	0,356	0,580
40x3	120	0,148	0,242	70	0,254	0,414
40x5	200	0,089	0,145	95	0,187	0,305
40x10	400	0,044	0,072	120	0,148	0,242
50x5	250	0,071	0,011	150	0,118	0,193
50x10	500	0,035	0,058	185	0,096	0,157
60x5	300	0,059	0,096	240	0,074	0,121
60x10	600	0,029	0,047	300	0,059	0,097
80x5	400	0,044	0,072	400	0,044	0,073
80x10	800	0,022	0,036	500	0,035	0,058
100x10	1000	0,017	0,029			
120x10	1200	0,014	0,024			
140x10	1400	0,012	0,020			
160x10	1600	0,011	0,018			

*Fig. 2.2-6: Ohmscher Wirkwiderstand R pro Phase oder Ader von Kupfer- und Aluminiumleitern bei 50 Hz und Leitertemperatur 20 °C*

**Erhöhte Leitertemperatur**

Die oben errechneten oder aus der Tabelle entnommenen Wirkwiderstände der Leiter beziehen sich auf eine Leitungstemperatur von 20 °C.

In der Praxis liegen die Temperaturen wegen der Eigenerwärmung und Wärmestaus in Verkabelungskanälen höher und beeinflussen den Wirkwiderstand. Näherungsweise lassen sich abweichende Leitertemperaturen nach der Beziehung umrechnen

$$R_{\vartheta 2} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta)$$

Für Kupfer:  $\alpha_{20} = 0.00393$   
Für Aluminium  $\alpha_{20} = 0.00403$

$R_{\vartheta 2}$  Leiterwiderstand bei erhöhter Temperatur [ $\Omega$ ]  
 $R_{20}$  Leiterwiderstand bei 20 °C (aus Tabelle oder Formel) [ $\Omega$ ]  
 $\alpha_{20}$  Temperaturgradient des Leitermaterials []  
 $\Delta\vartheta$  Temperaturdifferenz []

Die Widerstandszunahme wegen erhöhten Leitertemperaturen im Bereich um  $\Delta T_L = +20 \dots 60$  °C beträgt nur wenige Prozente. Damit ist die kurzschlussstrom-reduzierende Wirkung der Widerstandszunahme minim und würde eher selten erlauben, gerade einen Leistungsschalter mit geringerem Kurzschluss-Abschaltvermögen einzusetzen. Insbesondere ist die Leitertemperatur nicht stetig. Es muss auch bei wenig belasteter Leitung oder bereits beim Einschalten (Inbetriebnahme) mit einem Kurzschluss gerechnet werden. Die Anlage muss also auch für kalte Leiter (Worst Case) ausgelegt sein.

## Frequenzbedingte Widerstandsanteile

Der Blindwiderstandsanteil  $X$  berechnet sich nach der Formel :

$$X = \omega \times L$$

$X$  Blindwiderstand [ $\Omega$ ]  
 $\omega$  Kreisfrequenz des Netzes [ $s^{-1}$ ]  
 $\omega = 2\pi f \rightarrow f$ : Netzfrequenz [Hz]  
 $L$  Induktivität des Leiters [H]

Die Leitungsinduktivität  $L$  muss berechnet, gemessen oder kann vereinfachend aus standardisierten Tabellen entnommen werden.

## Tabelle Blindwiderstand

Die Tabellen gelten als Richtwerte. Genaue Daten sind vom Leiterhersteller zu beziehen.

*Fig. 2.2-7: Induktiver Blindwiderstand X von typischen Kupfer- und Aluminiumleitern bei 20 °C Leitertemperatur und 50 Hz (Bei abweichenden Frequenzen nach "Frequenzabhängigkeit des Blindwiderstandes" vorgehen).*

Nennquerschnitt A [mm <sup>2</sup> ]	Kabel, vieradrig X [mΩ/m]
1.5	0.115
2.5	0.110
4	0.107
6	0.100
10	0.094
16	0.090
25	0.086
35	0.083
50	0.083
70	0.082
95	0.082
120	0.080
150	0.080
185	0.080
240	0.079
300	0.079
400	0.079
500	0.078

## Frequenzabhängigkeit des Blindwiderstandes

Aus der Formel für X geht hervor, dass die Frequenz als linearer Faktor im Ausdruck steht und den Betrag des Blindwiderstands beeinflusst. Es kann demnach auf von 50 Hz abweichende Frequenzen proportional umgerechnet werden.

$$X = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$X_{60\text{Hz}} = X_{50\text{Hz}} \cdot \frac{60\text{Hz}}{50\text{Hz}} = X_{50\text{Hz}} \cdot 1.2$$

Der Blindanteil gegenüber dem Tabellenwert erhöht sich bei 60 Hz also um 20 %.

## Leitungsimpedanz

Die Leitungsimpedanz  $Z$  kann nun berechnet werden als quadratisches Mittel aus Wirk- und Blindanteil des Leiterwiderstandes.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

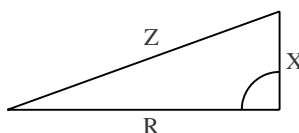
$Z$	Impedanz [ $\text{m}\Omega$ ]
$R$	Ohm'scher Widerstand [ $\text{m}\Omega$ ]
$X$	Induktive Reaktanz [ $\text{m}\Omega$ ]

Ein Beispiel am genannten  $25\text{mm}^2$ -Kabel,  $R = 35\text{m}\Omega$ ,

$$X_L = 50 \text{ m} \times 0.086 \text{ m}\Omega/\text{m} = 4.3 \text{ m}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(35 \text{ m}\Omega)^2 + (4.3 \text{ m}\Omega)^2} = 35.26 \text{ m}\Omega$$

Graphisch:



## Kurzschlussstrom am Leitungsende

Der zu erwartende Kurzschlussstrom ergibt sich nach Formel:

$$I_{K''} = \frac{U_{N\text{Trafo}}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{Trafo}} + Z_{\text{Leitung}})}$$

$I_{K''}$	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom [kA]
$U_{N \text{ Trafo}}$	Nennspannung der Unterspannungsseite des vorgeschalteten Transformators [V]
$Z_{\text{Trafo}}$	Transformatorimpedanz

$$Z_{\text{Trafo}} = \frac{U_N \cdot U_K \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot I_N}$$

$Z_{\text{Leitung}}$	Leitungsimpedanz
----------------------	------------------

Weiter im Beispiel: Kurzschlussstrom im Dreiphasennetz mit Transformator 1000 kVA,  $U_K = 4\%$ , Strangspannung 400 V, 50 m Kabel,  $25 \text{ mm}^2$

$$Z_{\text{Trafo}} = \frac{U_N \cdot U_K \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{400\text{V} \cdot 4\% \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 1444\text{A}} = 6.40 \text{ m}\Omega$$

$$I_{K''} = \frac{U_{NTrafo}}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_L)} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (6.40 \text{ m}\Omega + 35.26 \text{ m}\Omega)} = 5.54 \text{ kA}$$

Der hier am Leitungsende eingesetzte Leistungsschalter muss bei 400 V ein Kurzschluss-Ausschaltvermögen aufweisen, das lediglich 5 kA übersteigt.

## Lösungsweg mit Hilfe von Diagrammen

Diagramm 1 (Transformatorwiderstand  $Z_T$ ):

- Wirkwiderstand  $R$  entsprechend der Transformator-Bauleistung  $P$  auf Linie  $R$  ablesen.
- Blindwiderstand  $X$  entsprechend der Bauleistung  $P$  und der Transformator-Kurzschluss-spannung  $U_K$  ablesen.

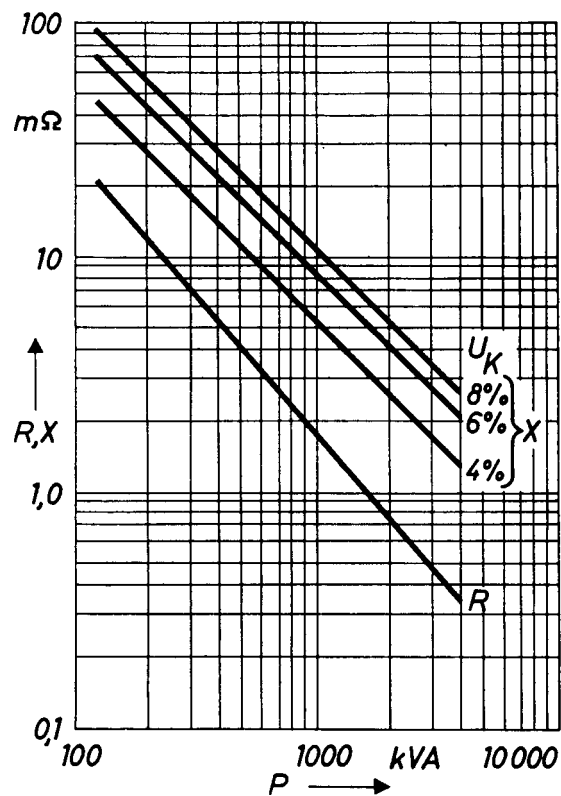


Fig. 2.2-8 Diagramm 1: Widerstände und Reaktanzen von Transformatoren bei 3~400 V, 50 Hz.

Diagramm 2 (Leitung  $Z_L$ ):

- Wirkwiderstand  $R$  im Schnittpunkt anhand von Leiterlänge und Querschnitt ablesen
- Blindwiderstand  $X$  auf untersten Linie ablesen abhängig von der Leiterlänge

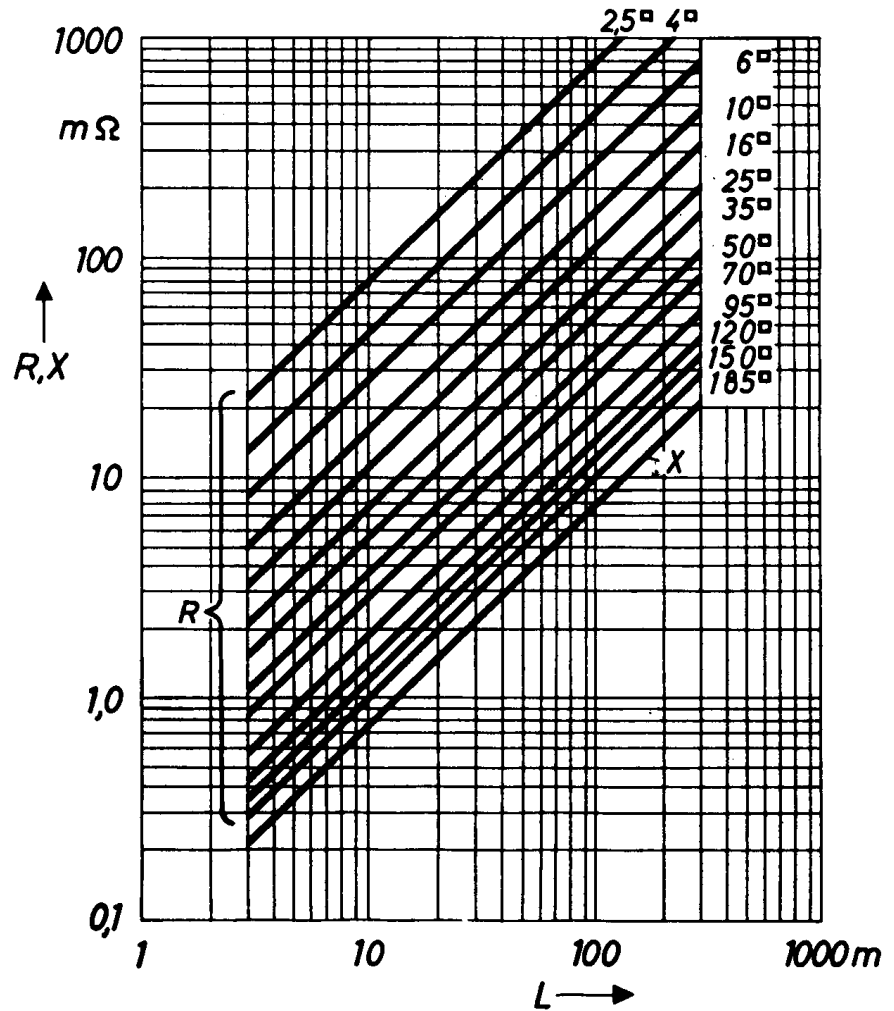


Fig. 2.2-9 Diagramm 2: Widerstände und Reaktanzen von Kabeln und Leitungen

Diagramm 3 (Kurzschlussstrom am Leitungsende  $I_K$ ):

- Mit der Summe der aus Diagramm 1 und 2 gefundenen Werten für  $R$  und  $X$  in Diagramm 3 anhand der Hilfskurven  $I_K$  interpolieren.

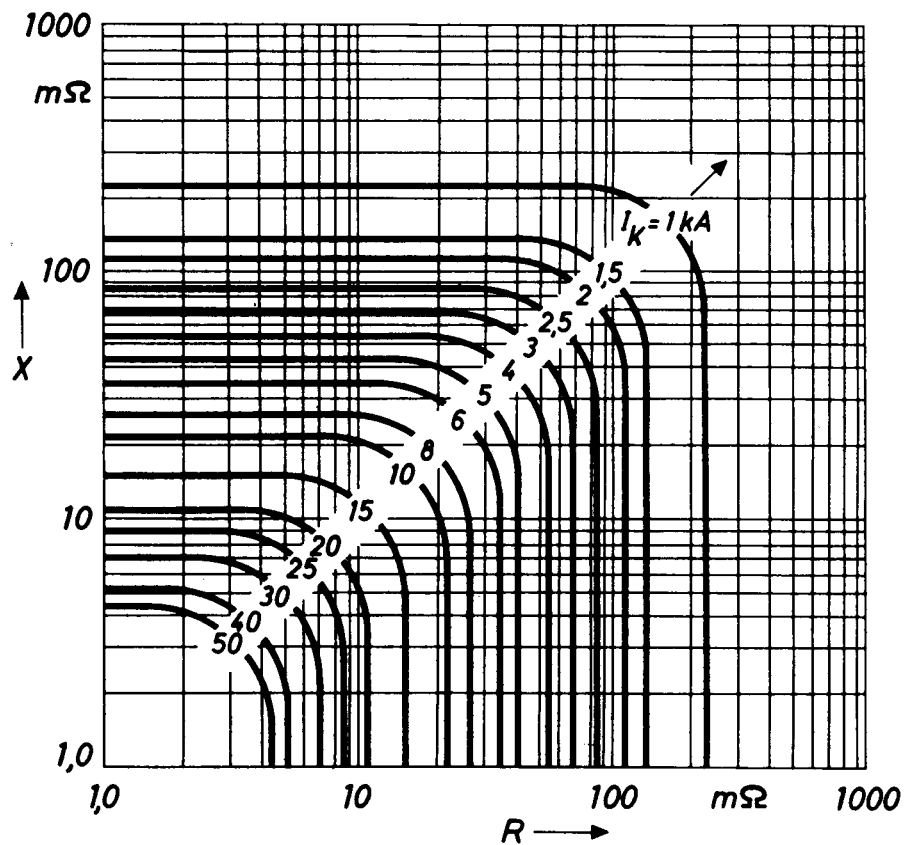


Fig. 2.2-10 Diagramm 3 : Anfangs-Kurzschlusswechselstrom  $I_K$  in Abhängigkeit von ohmschen Widerstand  $R$  und induktiver Reaktanz  $X$  der Kurzschlussbahn bei 3ph 400 V.

### Beispiel:

Kupferkabel, Querschnitt  $25\text{mm}^2$ , Länge 50 m

Aus Diagramm 2:  $R = 35\text{ m}\Omega$ ,  $X = 3,5\text{ m}\Omega$

Aus Diagramm 3: Der Kurzschlussstrom  $I_K$  liegt ca. bei 5 kA. Der Vergleich mit dem oben errechneten Wert für  $I_K$  stimmt recht gut.

## Faustregel für die Schnellabschätzung

Ein Kurzschlussstrom von z.B. 50 kA an den sekundärseitigen Transformator клемmen wird in einem 400 V-Netz von einer 10 mm<sup>2</sup>-Kupferleitung bereits nach 10 m auf etwa 10 kA am Leitungsende bedämpft bzw. von einer 25 mm<sup>2</sup>-Kupferleitung erst nach 25 m auf 10 kA.

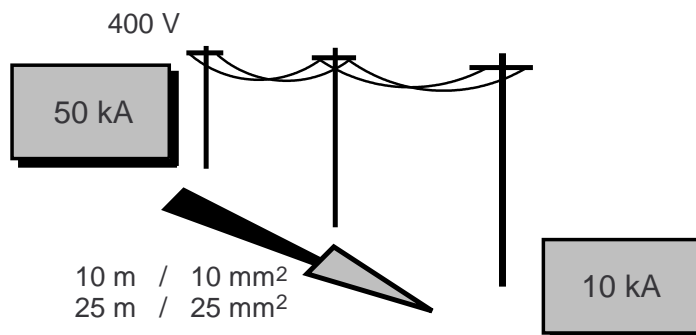


Fig. 2.2-11: Faustregel für die Schnellabschätzung des Kurzschlussstroms am Leitungsende.

## Musterbeispiel

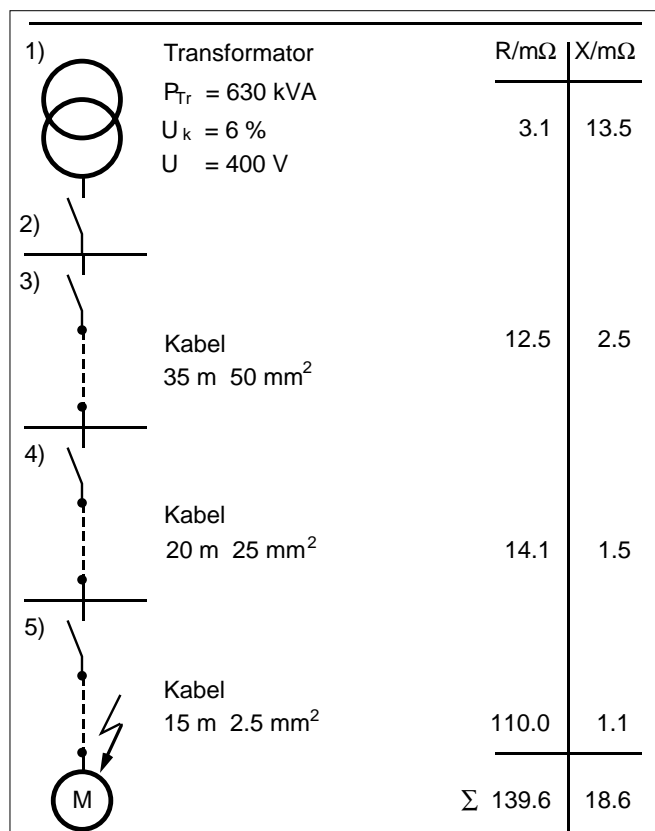


Fig. 2.2-12: Ausschnitt aus einer Schaltanlage

Kurzschluss in Punkt 5: Nach obengenannter Formel

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(139.6\text{m}\Omega)^2 + (18.6\text{m}\Omega)^2} = 140.8\text{m}\Omega$$

$$I_{K''} = \frac{U_{\text{NTrafo}}}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{400\text{V}}{\sqrt{3} \cdot 140.8\text{m}\Omega} = 1.64\text{kA}$$

Die gefundenen Werte beinhalten eine Sicherheit dadurch, dass verschiedene Dämpfungen, z.B. durch Lichtbogen-, Übergangs- und Geräteinnenwiderstände, nicht berücksichtigt wurden.

### 2.2.5. Dynamische Krafterwirkung auf Leiter im Kurzschlussfall

Um jeden stromdurchflossenen Leiter bildet sich ringförmig ein magnetisches Feld. Parallelführung von Leitern bewirkt eine anziehende oder abstossende Kraftwirkung (von Stromrichtung abhängig), die mit zunehmendem Strom und reduziertem Leiterabstand steigt.

Die für den Schalttafelbau wichtigen Einflüsse der genannten Größen sind in nachfolgender Formel dargestellt.

$$F_H = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_S^2 \cdot \frac{L}{a} = 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot I_S^2 \cdot \frac{L}{a}$$

- $F_H$ : Stromkraft zwischen den Hauptleitern [N] (9.81 N = 1 kg)
- $\mu_0$ : magnetische Feldkonstante  $\left[4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}\right]$
- $I_S$ : Spitzenwert des Kurzschlussstroms im Leiter (Stosskurzschlussstrom) [A]
- $L$ : Stützabstand [m]
- $a$ : Hauptleitersmittelabstand [m]

Ein einfaches Beispiel veranschaulicht, welche enorme Kraft im Kurzschlussfall auf die Leiter und ihre Befestigung wirkt.

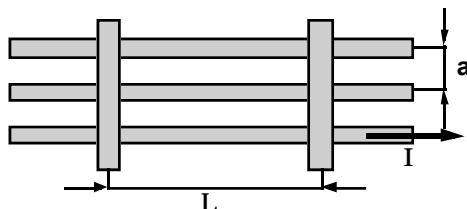


Fig. 2.2-13: Installationsansicht parallel geführter Sammelschienen

## Fall 1: Ohne Schutzorgan

Stosskurzschlussstrom  $I = 50 \text{ kA}_{\text{eff}}$  ( $\hat{I}_S = 71 \text{ kA}$ )

Hauptleitermittelabstand  $a = 0,1 \text{ m}$

Stützabstand  $L = 1 \text{ m}$

$$F_{\text{Abstoss}} = 0,2 \cdot I_s^2 \cdot \frac{L}{a} = 0,2 \cdot (71 \text{ kA})^2 \cdot \frac{1 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} = 10'082 \text{ N}$$

Die Abstossende Kraft entspricht etwa jener, mit der die Masse von 1 Tonne von der Erde angezogen wird.

## Fall 2: Mit strombegrenzendem Leistungsschalter

Unbeeinflusster Kurzschlussstrom  $I = 50 \text{ kA}_{\text{eff}}$

Durchlassstrom des 140M ca.  $I = 10 \text{ kA}_{\text{eff}}$  ( $\hat{I}_S = 14 \text{ kA}$ )

Hauptleitermittelabstand  $a = 0,1 \text{ m}$

Stützabstand  $L = 1 \text{ m}$

$$F_{\text{Abstoss}} = 0,2 \cdot I_s^2 \cdot \frac{l}{a} = 0,2 \cdot (14 \text{ kA})^2 \cdot \frac{1 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} = 392 \text{ N}$$

Was ca. der Masse von 40 kg entspricht.

## Erkenntnis aus den Berechnungen:

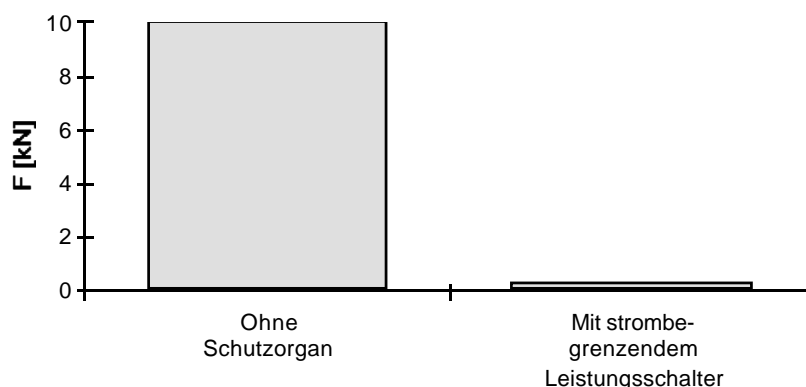


Fig. 2.2-14: Durch den Einsatz eines schnellen, strombegrenzenden Leistungsschalters wird im Kurzschlussfall die Durchlassenergie und damit die dynamische Belastung sämtlicher Anlagenteile drastisch reduziert. Aus dem oben gezeigten Beispiel geht hervor, dass im angenommenen Fall die mechanische

*Beanspruchung der Stromschienen-Stützträger fast 26 Mal geringer ausfallen dank dem Schutz durch einen schnellen Leistungsschalter. Ob 1 Tonne pro Laufmeter Stromschiene abzustützen sind oder nur 40 Kilo, bedeutet einige Erleichterungen in der Schaltanlagenbautechnik. Übertragen auf die Montagedistanz zwischen den Trägern, erlaubt dies grössere Stützträgerabstände, damit verbunden ist eine einfachere Ausführung der Schaltanlagenstruktur und eine gesteigerte Anlagenwirtschaftlichkeit.*

### **2.3. Kurzschlusschutz**

Die zwei Auslösearten des Leistungsschalters, die Überlast- und Kurzschlussauslösung, unterscheiden sich im wesentlichsten durch die während der Abschaltung vom Schalter zu beherrschenden Ströme, respektive der Energie. Ist es bei Überlast lediglich der 1,15 bis 16fache Schalter-Nennstrom, so wollen im Kurzschlussfalle unbeeinflusste Ströme von mehreren Duzend Kilo-Ampère geschaltet werden können. Korrekter Kurzschlusschutz bedeutet für das Gerät, auch den 1'000 bis 10'000-fachen Nennstrom beherrschen zu können.

Nicht strombegrenzende Leistungsschalter (Nulldurchgangslöscher) lassen dabei die gesamte Kurzschlussenergie mit ihrer zerstörerischen Wirkung durch. Strombegrenzende Schalter lassen diese Energien erst gar nicht entstehen und schalten vorzeitig ab.

#### **2.3.1. Prinzip der Strombegrenzung**

Im Gegensatz zum Prinzip der Nullpunktlöschung, gilt für schnell abschaltende Leistungsschalter:

- Hauptkontakte schnell aufschlagen
- Lichtbogen in Löschkammer leiten
- Lichtbogen löschen

Was bei der Schmelzsicherung die hohe Strombegrenzung bewirkt, wird auch im strombegrenzenden Leistungsschalter ausgenutzt. Der Stromkreis muss schnell unterbrochen, eine hohe Lichtbogenspannung aufgebaut und dem Lichtbogen Wärme entzogen werden. Der Faktor Zeit spielt hier eine wesentliche Rolle im Bezug auf die im Kurzschlussfalle durch das Schutzorgan fließende Energie. Möglichst kleine Durchlasswerte sind vorallem für Leistungsschalter in Motorstarterkombinationen wichtig.

## Kontaktöffnung

Das Herz eines guten Leistungsschalters bildet ein sehr schnelles Kontaktsystem.

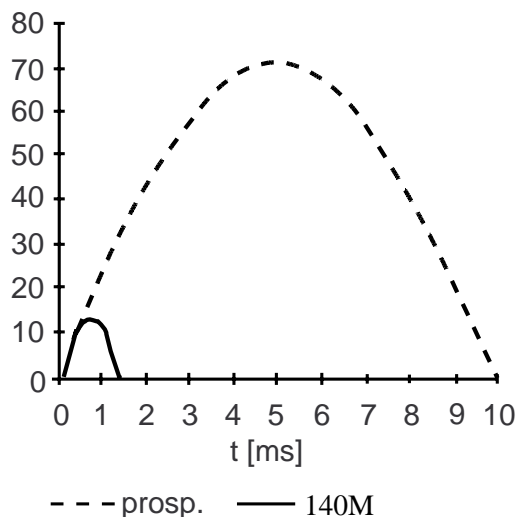


Fig. 2.3-1: Abschaltkurve Leistungsschalter 140M

Der prospektive, symmetrische Kurzschlussstrom (50 kA eff. im Bild) muss schnell unterbrochen und am Erreichen seines Maximalwerts gehindert (begrenzt) werden.

Der schnell ansteigende und im symmetrischen Kurzschlussfall bereits nach 5 ms seinen theoretischen Maximalwert erreichende prospektive Kurzschlussstrom muss schnell abgeschaltet werden. Die Kontakte müssen praktisch unverzögert beim Ansteigen des Stromes geöffnet werden. Die nötigen Abhebekräfte entstehen im Kontaktsystem dank spezieller Formgebung durch gegensinnig stromdurchflossene, parallele Strombahnen und durch den Stromengeffekt in den Kontaktplättchen selbst.

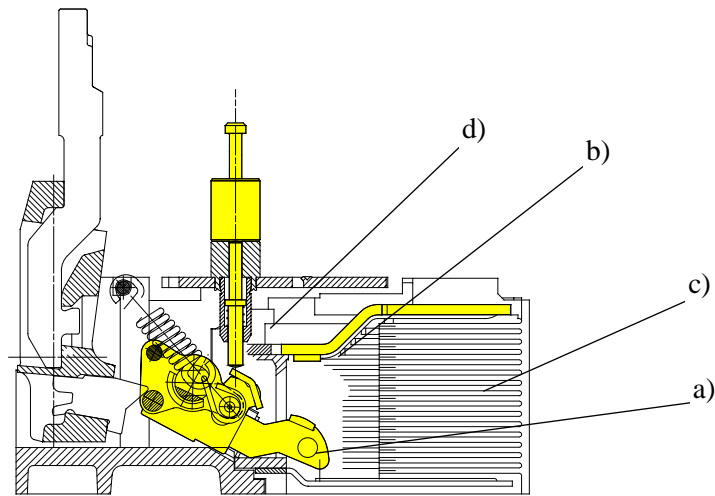


Fig. 2.3-2: Kontaktprinzipbild 140-CMN

a) beweglicher Kontakt oder Kontaktbrücke, b) Festkontakt, vordere Hälfte, c) Löschkammer, d) Schlaganker

Bei sehr schnellen, strombegrenzenden Leistungsschaltern wird zur Hauptsache der Kontakt durch den Schlaganker geöffnet. Die induzierte Kraft muss den hohen Feder-Kontaktdruck übersteigen und den Kontakt aufschlagen. Zwischen dem Festkontakt und dem beweglichen Kontaktteil wird ein Lichtbogen aufgezo-gen und in die Löschkammer getrieben. Damit der bewegliche Kontakt durch den nun reduzierten Strom und die dadurch sich abbauenden Feldkräfte nicht wieder zurück fällt, muss inzwischen das vom Schlaganker angeregte Schaltschloss bereits so weit auf sein, dass es die Kontakte auffängt und definitiv offen hält.

Ist z.B. beim 140-CMN der Kontakt bereits nach ca. 0,7 ms aufgeschlagen, dauert die gesamte Abschaltung lediglich 1,5...1,8 ms (im Vergleich dazu, eine 50 Hz-Sinus-Halbwellen dauert 10 ms). Der Kurzschlussstrom ist also abgeschaltet, längst bevor er seinen prospektiven Maximalwert erreichen könnte. Die kurze Ausschaltzeit bewirkt eine starke Strombegrenzung.

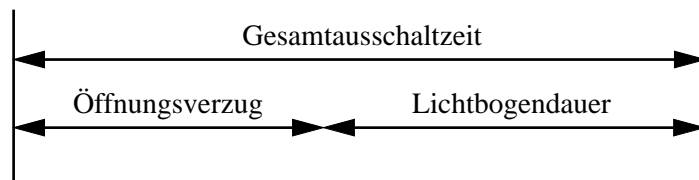


Fig. 2.3-3: Die Gesamtausschaltzeit setzt sich zusammen aus der Dauer für die:

- Kontaktöffnung
- Lichtbogenwanderung in Löschkammer und Löschung (Kühlung) des Lichtbogens

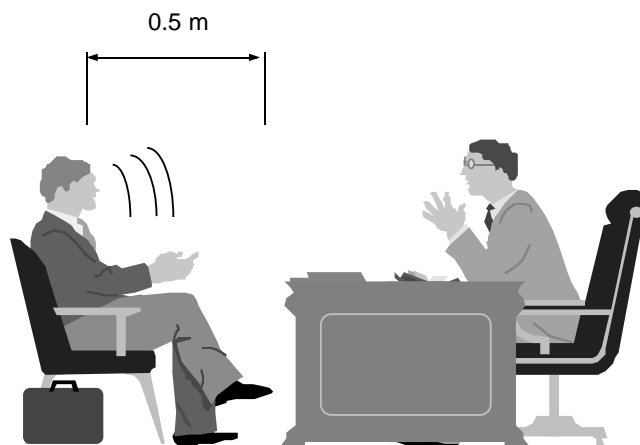


Fig. 2.3-4: Während der Abschaltzeit von 1.5 ms wandert der Schall zwischen zwei Gesprächspartnern gerade einen halben Meter (Schallgeschwindigkeit in Luft 330 m/s). Der Leistungsschalter arbeitet rein elektromechanisch.

Um die Anforderungen an die hohe Strombegrenzung in Leistungsschaltern zu erfüllen, sind aufwendige Weg/Zeit-Optimierungen und Reduktionen der Massenträgheitsmomente notwendig. Es gilt den Bewegungsablauf der Mechanik genau zu ermitteln und z. B den Schlaganker anhand der Methode von finiten Elementen zu dimensionieren.

## Lichtbogenlöschung

Einzel- oder doppelunterbrechende Kontaktsysteme unterscheiden sich in der Anzahl Teil-Lichtbögen, die im Kurzschlussfall seriell in den Stromkreis geschaltet werden.

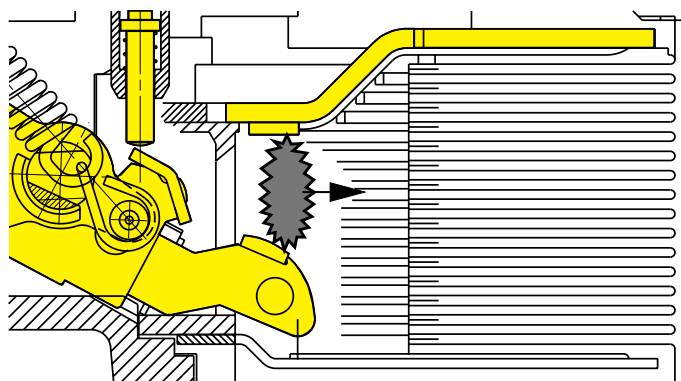


Fig. 2.3-5: Gabelkontakt mit Löschkammer  
Einseitige Ansicht des doppelunterbrechenden Kontaktsystems mit zwei separaten Löschkammern pro Pol für hohe Lichtbogenspannung und starke Strombegrenzung.

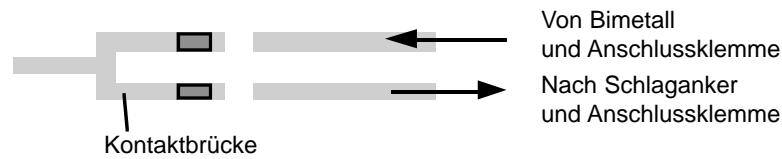


Fig. 2.3-6: Aufsicht auf Kabelkontaktprinzip

Der Leistungsschalter 140-CMN hat eine Doppelunterbrechung im Strompfad. Der Y-förmige bewegliche Kontakt zieht beim Öffnen zwei Lichtbogen auf. Dem Kurzschlussstrom werden zwei Widerstände hintereinander in den Weg gestellt. Durch die Serieschaltung zweier Lichtbogen in den Löschkammern steigt in der Summe die massgeblich das Abschaltvermögen und die Strombegrenzung beeinflussende Lichtbogenspannung.

Die Lichtbogenspannung erhöht sich mit der Anzahl der Löschkammerbleche. Jede kleine Teillichtbogenspannung zwischen zwei benachbarten Löschkammerblechen lässt sich aufaddieren (Serieschaltung). Bei Leistungsschaltern mit gutem Kurzschluss-Ausschaltvermögen bei Netzspannungen über 400 V, wird ein Wert von z.B. 600...700 Volt erreicht. Diese Lichtbogenspannung wirkt gegen die treibende Spannung, gegen die Netzspannung .

Eine Löschkammer mit ihrer fixen Anzahl Blechen bildet immer die selbe Lichtbogenspannung auf. Ein Leistungsschalter, optimiert auf das Schalten bei z.B. 400 V, hat folglich bei 690 V ein reduziertes Schaltvermögen. Bei 690 V ist die Gegenspannung damit vergleichsweise kleiner und Schaltvermögen und Strombegrenzung sind reduziert.

Ein Lichtbogen kann 10'000...15'000°K heiss werden (das Kontaktmaterial schmilzt bei ca. 1'300 °K). Um Schäden zu verhindern muss er rasch in die Löschkammer geblasen, dort verlängert, in mehrere kleine Teillichtbögen zwischen den Löschkammerblechen aufgeteilt und abgekühlt werden. Das durch die Form der Hauptkontakte erzeugte Blasfeld treibt den Lichtbogen in die Löschkammer. Ohne dieses Blasfeld würde er zwischen den beiden Silberkontakten stehen bleiben und den Schalter zerstören.

Während der Abschaltung herrscht in der Löschkammer ein Innendruck von typisch 13...15 bar.

Das Volumen der Löschkammer und die Masse der darin befestigten Bleche ist auf die enorme Energie des Lichtbogens abgestimmt, welche die Kammer aufnehmen muss und sich dabei erwärmt (die Löschkammer wird mit ca. 2 Megawatt während einem Bruchteil einer Sekunde aufgeheizt). Ein klassischer Zielkonflikt zwischen hohem Schaltvermögen und kompakten Kammer-Abmessungen (damit auch Geräte-Aussenmasse), muss gelöst werden.

Je schneller ausgeschaltet wird, desto weniger Energie ist im Schalter zu beherrschen, desto kompakter kann er gebaut werden. Darum werden überhaupt erst Leistungsschalter mit geringen Aussenabmessungen möglich.

### **Innerer Widerstand / Eigenkurzschlussfestigkeit**

Bei der Berechnung von Kurzschlussströmen an einer beliebigen Stelle im Netz, wurden Leitungswiderstände und Induktivitäten zur Reduktion des effektiven Kurzschlussstromes berechnet. Im Leistungsschalter selber wirken die Impedanzen und Widerstände ebenfalls stromreduzierend.

Bei Leistungsschaltern mit niedrigen Einstellströmen (ca.  $< 20$  A) des thermisch verzögerten Überlastauslösers ist der Widerstand der Strombahn mit der Heizwicklung des Bimetallstreifens sowie der Spule des unverzögerten elektromagnetischen Kurzschlussauslösers vergleichsweise gross. Er kann so gross sein, dass er jeden beliebigen Kurzschlussstrom auf einen Wert dämpft, der vom Schalter noch thermisch und dynamisch beherrscht wird und auch ausgeschaltet werden kann. Der Leistungsschalter ist dann kurzschlussfest. Er lässt sich an beliebigen Netzstellen einsetzen, an denen einseitig auch Kurzschlussströme über seinem eigentlichen Kurzschlusschaltvermögen zu erwarten sind. Der Einstellbereich, bis zu dem der Leistungsschalter kurzschlussfest ist, hängt vom Schaltvermögen des Leistungsschalters ab. Da dieses wiederum von der Nennspannung abhängt, ist auch die Eigenkurzschlussfestigkeit bei jeder Nennspannung verschieden.

Bei der Dimensionierung eines Leistungsschalters für den Kurzschlusschutz muss erst geprüft werden, ob der gewünschte Schalter eigenfest ist oder nicht. Ist der Leistungsschalter eigenfest, erübrigt sich jegliche weitere Berechnung oder Abschätzung der Anlage-Kurzschlussdaten.

Eigenfeste Geräte bedürfen keiner Vorsicherung, wo immer sie im Einsatz stehen. Ebenfalls ohne Vorsicherung können Leistungsschalter installiert werden, deren Abschaltvermögen den grösstmöglichen auftretenden Kurzschlussstrom an der Einbaustelle übersteigt.

Die Leitung bis zum Leistungsschalter muss jedoch abgesichert werden. Diese Vorsicherung darf aber so gross wie möglich gemäss Querschnitt und Leiterlänge dimensioniert werden.

## Durchlasswerte

Das eigentliche Qualitätsmerkmal bezüglich gutem Kurzschlusschutz stellen die Durchlasswerte dar. Die Höhe von Durchlassstrom und Durchlassenergie in Abhängigkeit vom unbeeinflussten Kurzschlussstrom, geben Auskunft über die Qualität der Strombegrenzung des Schalters. Sie zeigen, wie hoch nachgeschaltete Schütze oder Schalter im Kurzschlussfall belastet werden. Die Durchlasswerte beeinflussen direkt die Dimensionierung dieser nachgereihten Geräte und bestimmen die weitere bauliche Ausführung der Anlage (Stützträgerabstände für notwendige Kurzschlussfestigkeit).

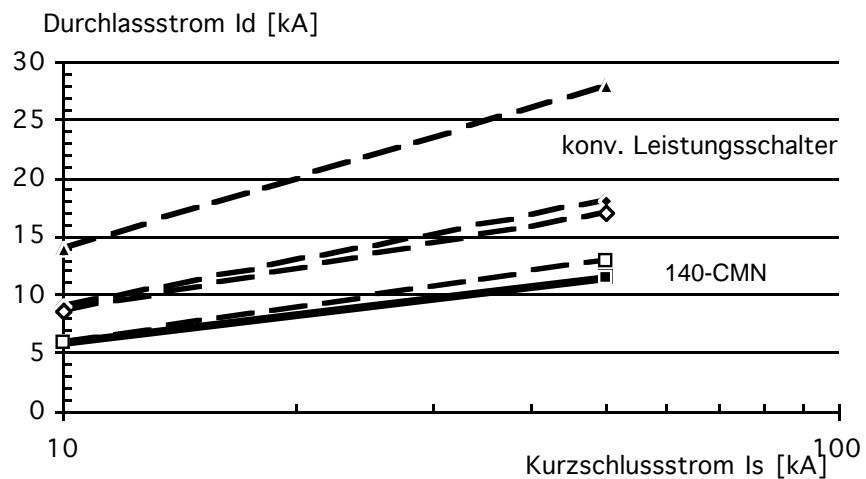


Fig. 2.3-7 : Durchlassstrom des Leistungsschalters 140-CMN 63 A im Vergleich zu konventionellen Leistungsschaltern.

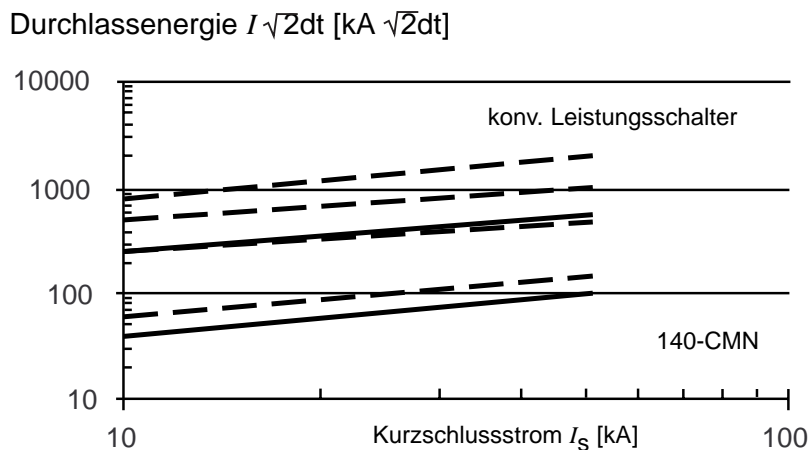


Fig. 2.3-8: Durchlassenergie des Leistungsschalters 140-CMN 63 A im Vergleich zu konventionellen Leistungsschaltern.

Will man also Leistungsschalter von verschiedenen Herstellern untereinander vergleichen, müssen nicht nur Zubehör, Montagehandling und Aussenabmessungen verglichen werden, sondern vorallem die Merkmale der Schutzqualität. Welcher Schalter weist die niedrigsten Durchlasswerte auf?

Die stark strombegrenzenden Allen-Bradley Leistungsschalter von Rockwell Automation haben niedrige Durchlasswerte. Sie belasten Anlage und nachgeschaltete Apparate besonders wenig und stellen einen guten Schutz im Kurzschlussfalle dar. Dies ermöglicht die Kurzschlusskoordination nach IEC 947-4 Typ "2" (keine oder leicht aufbrechbare Verschweissungen) mit nennstromgleichen Schützen ohne Überdimensionierung (Leistungsschalter 140M und 140-CMN).

Definition  $I^2t$ :

Die Durchlassenergie ist das Zeitintegral des Quadrates des Durchlass-Kurzschlussstroms, auch Joule-Integral oder  $I^2t$  genannt ( $I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 dt$ )

Die Formel zeigt, dass kurze Abschaltzeiten und kleine Ströme, klein wegen einer hohen Lichtbogenspannung, die Durchlassenergie gering halten.

Definition  $I_d$ :

Unter dem Durchlassstrom  $I_d$  versteht man den Scheitelwert des während der Kurzschlussabschaltung fließenden Stroms. Ein kleiner Durchlassstrom wird ebenfalls durch kurze Schaltzeiten und eine hohe Lichtbogenspannung erreicht.

## 2.3.2. Schaltvermögen

Den Effektivwert eines Stroms bei einem bestimmten  $\cos \varphi$  sowie einer bestimmten Spannung, den ein Schaltgerät oder eine Sicherung noch betriebssicher unter vorgeschriebenen Bedingungen abschalten kann, nennt man das Schaltvermögen.

Bei strombegrenzenden Leistungsschaltern ist das Schaltvermögen grundsätzlich von der Höhe und der Geschwindigkeit der aufgebauten Lichtbogenleistung und von der Ausführung des Kontaktsystems abhängig. Es ist also konstruktiv festgelegt.

Überschreitet ein Kurzschlussstrom das Schaltvermögen, dauert z.B. die Lichtbogenlöschung länger als die wenigen Millisekunden, die der Schalter thermisch maximal verkraftet. Kann der Lichtbogen nicht ausreichend schnell gelöscht werden, führt die dadurch entstehende Überhitzung zur Zerstörung des Geräts.

Im Standard IEC 947-2 wird unterschieden zwischen Bemessungs-Grenzkurzschlussauschaltvermögen  $I_{cu}$  und Bemessungs-Betriebskurzschlussauschaltvermögen  $I_{cs}$  :

- Bemessungs-Grenzkurzschlussauschaltvermögen  $I_{cu}$  ("Ultimate" short circuit breaking capacity, ähnlich dem früheren P1):  
O-t-CO Kurzschlussstest. Reduzierte Einsatzfähigkeit, Veränderung der Überlastauslösevorrichtung, erhöhte Erwärmung zulässig.
- Bemessungs-Betriebskurzschlussauschaltvermögen  $I_{cs}$  ("Service" short circuit breaking capacity, ähnlich dem früheren P2):  
O-t-CO-t-CO Kurzschlussstest. Keine Reduktion der Einsatzfähigkeit zulässig

O: Kurzschlussabschaltung aus dem geschlossenen Zustand

t: Pause

CO: Einschalten auf Kurzschluss mit nachfolgender Kurzschlussabschaltung

In elektrischen Schaltanlagen werden 90 % aller Leistungsschalter nach  $I_{cu}$  eingesetzt. Die Dimensionierung nach  $I_{cs}$  ist aber stark zunehmend.

## 2.3.3. Lebensdauer von Leistungsschaltern

### Prüfanforderungen

Nach den Bestimmungen in IEC 947-4 werden an Leistungsschalter keine eigentlichen Anforderungen bezüglich elektrischer Lebensdauer gestellt. Es wird eine gewisse Anzahl Schaltspiele definiert, die ein Leistungsschalter ohne Last,

bei Normallast, bei Überlast oder bei Kurzschluss zu schalten hat. Diese Werte variieren zwischen zwei Ausschaltungen (O-t-CO) für das Bemessungs-Grenzkurzschlussausschaltvermögen und ein paar wenige Tausend Schaltungen rein mechanisch für lastloses Schalten.

### **Praxis**

Die elektrische Lebensdauer (Schaltstücklebensdauer) eines Leistungsschalters ist wie bei den Schützen von der Grösse des auszuschaltenden Stroms abhängig (abgesehen vom Einschaltprellen, dessen Einfluss man technisch minim hält).

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 sammelschienenennahen und hohen Kurzschlussströmen derart abgebrannt sein, dass ein Auswechseln des Leistungsschalters angezeigt ist. In der Praxis erreichen die wenigsten Kurzschlussströme einen Wert um 50 kA oder mehr, sondern liegen viel tiefer und bewirken einen geringen Kontaktabbrand.

Da an einem im Einsatz stehenden Leistungsschalter nicht ersichtlich ist, wie oft er bereits Kurzschlussabschaltungen durchgeführt hat und wie hoch die effektiven Ströme dabei waren, ist nicht erkennbar, wann der Schalter das Ende seiner elektrischen Lebensdauer erreicht hat.

Wurde bei einem Schalter die nutzbare Einsatzdauer überschritten, zeigt er dies trotzdem an. Es kommt zu Frühauslösungen des thermischen Überlastauslösers bereits beim Nennstrom des einfachen Skaleneinstellwerts. Das Schutzorgan bleibt somit auch am Lebensdauerende sicher.

Hervorgerufen werden die Frühauslösungen durch die höhere Erwärmung der abgebrannten und dadurch stärker widerstandsbehafteten Hauptkontakte bereits beim einfachen Nennstrom. Die Erwärmung wirkt sich bei längerem Betrieb auf den thermischen Überlastauslöser aus. Es kommt zu einer Frühauslösung.

Leistungsschalter die ihren vollen Nennstrom nicht mehr führen können, weisen zu hohe Kontaktwiderstände auf (Abbrand). Sie sind am Ende ihrer elektrischen Lebensdauer und daher auszuwechseln.

Der Leistungsschalter bleibt also sicher. Der Normalbetrieb zeigt die Funktionstüchtigkeit des Schalters. Kommt es nach dem Einschalten zu keiner Frühauslösung, so kann er auch unter Kurzschluss ausschalten.

## 2.4. Kurzschlusskoordination

Hauptaufgabe des Kurzschlusschutzorgans ist das rasche Erkennen, Begrenzen und Abschalten von hohen Fehlerströmen und Begrenzung des Schadens auf den Kurzschlussort.

Will man verhindern, dass durch die Kurzschlussstromabschaltung keine Bauteile unzulässig belastet oder beschädigt werden, ist die gegenseitige Abstimmung der Starterkomponenten Schütz und Leistungsschalter notwendig. Die Kurzschlusskoordination zwischen Schalt- und Schutzgeräten umfasst die elektro-physikalischen Vorgänge aller im Kurzschlussfall belasteten Bauteile.

### 2.4.1. Definition nach IEC 947-4-1

#### Koordinations-Typ "1"

- Das Schütz oder der Starter darf im Kurzschlussfall Personen und Anlagen nicht gefährden.
- Das Schütz oder der Starter braucht für den weiteren Betrieb ohne Reparatur und Teilerneuerung nicht geeignet zu sein.
- Beschädigungen des Schützes und des Überlastrelais sind zulässig.

#### Koordinations-Typ "2"

- Das Schütz oder der Starter darf im Kurzschlussfall Personen und Anlagen nicht gefährden.
- Das Schütz oder der Starter muss für den weiteren Gebrauch geeignet sein.
- Es darf keine Beschädigung des Überlastrelais oder anderer Teile auftreten, mit Ausnahme des Verschweissens der Schütz- oder Starterkontakte, wenn diese ohne nennenswerte Verformung leicht zu trennen sind (z.B. mit einem Schraubendreher).

### 2.4.2. Folgerung aus der Definition für den Anwender

Ein Kurzschluss bedeutet immer eine Unterbrechung des Betriebs. Werden die Kurzschluss-Koordinationsstypen bezüglich Anwendernutzen analysiert, muss folgendes festgestellt werden:

#### • Koordinations-Typ "1"

Schutz- und Schaltgeräte müssen nach einer Kurzschlussauslösung zwingend ersetzt werden. Längere Anlagenstillstandzeiten und damit verbundener Produktionsausfall verursachen zusammen mit größerem Ersatzmaterialeinsatz für den Leistungsabgang erhöhte Kosten. Für Einzelantriebe wie Be- und Verarbeitungsmaschinen, die nicht Teil eines umfangreichen Prozesses sind, können sich die Kosten in einem akzeptablen Rahmen bewegen und Typ "1" ist daher genügend gut. Bei Kurzschluss ist die Anlage ohnehin gestört.

Für komplexere Produktionsprozesse ist Typ "1" weniger geeignet. Es müsste für jeden in der Anlage eingesetzten Starter die entsprechenden Reservekomponenten griffbereit vor Ort liegen, um eine schnelle Wiederinbetriebnahme des Abgangs zu garantieren.

Bei Kurzschlussströmen unter dem der Typ "1"-Koordination zugrundegelegtem Fehlerstrom kann ein Weiterbetrieb des Starters möglich sein. Die Überprüfung der Betriebsfähigkeit ist aber nicht einfach.

- Koordinations-Typ "2"  
Starter nach Typ "2" erlauben die sofortige Wiederinbetriebnahme des Abgangs ohne Ersatz von Komponenten. Ein Kurzschluss wirkt beim Schütz und Leistungsschalter lebensdauerverkürzend (durch die hohe thermische Beanspruchung wird Kontaktmaterial in die Löschkammer geschleudert). Je nach Schalzhäufigkeit muss damit gerechnet werden, dass das Schütz vorzeitig zu ersetzen ist. Dies ist aber auf einen geeigneteren Zeitpunkt verschiebbar (z.B. Revisionstermin).  
Starter nach Typ "2" sind dort zu empfehlen, wo komplexe Fabrikationsprozesse die Stillstandzeiten verteuern, bei Anlagen die nach längeren Stillstandzeiten bei der Wiederinbetriebnahme hohe Kosten verursachen oder deren Betriebsunterbruch nach kurzer Zeit zu gefährlichen Situationen führen kann. Die Lagerhaltung von Reservematerial entfällt grösstenteils.

Erweitert man die Bedingungen des bestehenden Koordinations-Typ "2" mit einer zusätzlichen Forderung nach einer bestimmten (garantierten) Restlebensdauer des Schaltgeräts, entsteht ein weiterer, verschärfter Koordinationstyp. Der Weiterbetrieb des Starters nach der Kurzschlussabschaltung wird für eine festgelegte Anzahl Schaltungen sichergestellt (sichere Funktion bis zu einem festgelegten Zeitpunkt, z.B. Jahresrevision). Dieser Koordinationstyp ist in dem Standard IEC 947-4-1 in Vorbereitung.

### **2.4.3. Physikalische Zusammenhänge der Kurzschlusskoordination**

Kurzschlusskoordination findet nicht im Leistungsschalter allein statt, sondern beinhaltet ein enges Zusammenspiel von Leistungsschalter und Schütz, bei Letzterem betroffen ist vor allem das Kontaktsystem. Für Koordinationstyp "2" dürfen die Schützkontakte bei einer Kurzschlussstromabschaltung nicht untrennbar verschweissen. Hier gibt es typisch 3 kritische Bereiche.

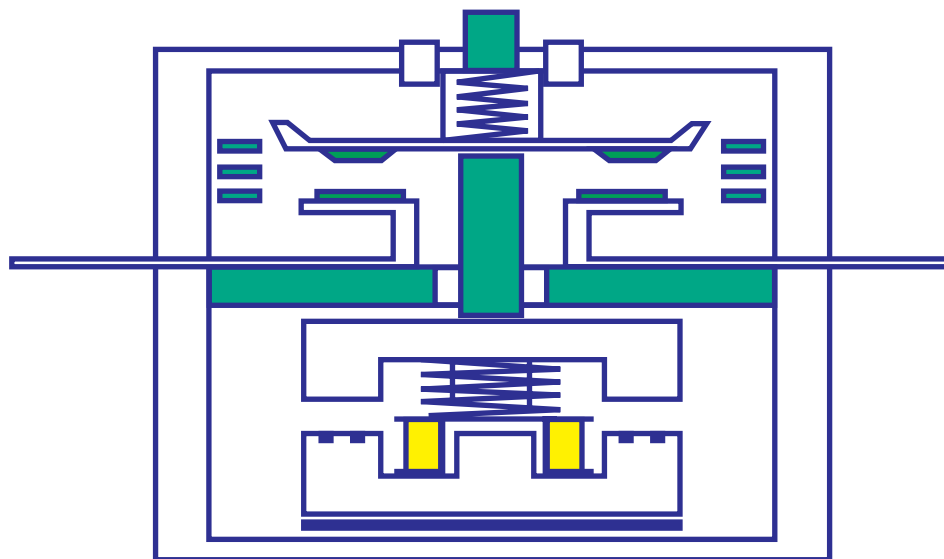


Fig. 2.4-1: Schützblockbild. Das Verschweissen der Schützkontakte ist Abhängig von der Konstruktion des Kontaktsystems.

Die drei kritischen Schweißbereiche (Betriebszustand: Last eingeschaltet, Schütz geschlossen)

- Niedrige Kurzschlussströme, eine gewisse Zeit andauernd, erwärmen das Kontaktmaterial des Schützes derart, dass die thermische Grenztemperatur überschritten wird und Teile des Kontaktmaterials sich verflüssigen. Nach der Kurzschlussabschaltung kühlen die Kontakthälften aus und das Material wandelt wieder in den festen Zustand über, nur jetzt gemeinsam und verbunden. Der Kontakt ist verschweisst.
- Der Puls mittlerer Kurzschlussströme bewirkt ein kurzes Abheben der beweglichen Kontaktbrücke vom Festkontakt, hervorgerufen durch einander abstossende Magnetfelder im Kontakt. Sobald der Kontakt sich leicht öffnet, zündet ein Lichtbogen dazwischen, welcher das Kontaktmaterial erhitzt und Teile davon verflüssigt. Fällt die Kontaktbrücke nach der Kurzschlussabschaltung wieder zurück, trifft flüssiges Metall aufeinander. Es entsteht eine Punktverschweissung.

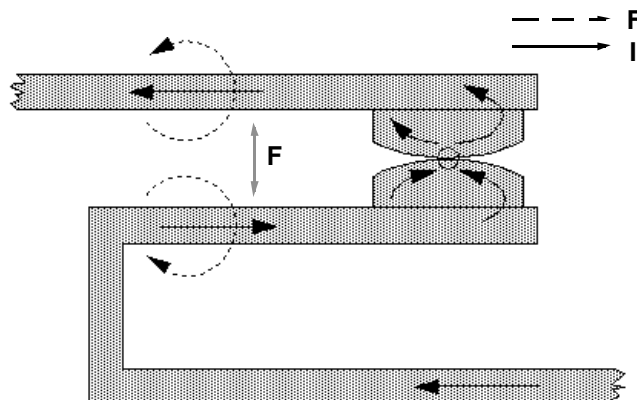


Fig. 2.4-2: Abhebekräfte im Schützkontakt

Gegenseitig gerichtete Ströme in zwei eng benachbarten Leitern fließend, erzeugen zwei einander abstossende magnetische Felder. Diese vor allem in den flach aufeinanderliegenden Kontaktplättchen entstehenden Abhebekräfte nehmen, durchflossen vom Kurzschlussstrom, so hohe Werte an, dass die Kontaktbrücke kurz abhebt.

- Sehr hohe Kurzschlussströme, z.B. 50 kA, haben eine derart grosse dynamische Kraft, dass die Kontaktbrücke regelrecht wegfliegt, sogar bis an ihren Anschlag gedrückt wird. Der zwischen den nun offenen Kontakten brennende Lichtbogen löst viel Kontaktmaterial, das teilweise verdampft oder von den hohen magnetischen Feldern in die Löschkammer geblasen wird. Inzwischen muss der Kurzschlussstrom von einem strombegrenzenden, schnellen Leistungsschalter oder einer Schmelzsicherung gelöscht werden. Wenn die Kontaktbrücke am Ende ihrer Flugbahn wieder auf den Festkontakt zurückfällt, angepresst durch die Kontaktdruckfedern, sind die Kontaktplättchen meist bereits wieder verfestigt, kein flüssiges Material ist mehr auf den Kontakten. Das Verschweissrisiko ist klein bei strombegrenzenden Leistungsschaltern!).

Kritisch für das Schütz sind Kurzschlussströme mittlerer Stärke. Der genaue Wert dieses kritischen Kurzschlussstroms ist von der Konstruktion und Grösse des Kontaktsystems abhängig.

Genau diese Problematik haben die Normengremien erkannt und für das Bestehen der Kurzschlusskoordinationsprüfung einen von der Schützbaugrösse abhängigen, praxisnahen Kurzschlussstrom festgelegt, genannt den "r"-Strom.

Die kritische leichte Kontaktabhebung bei einem 16 A-Leistungsschütz nach IEC 947-4-1 ist bei einem unbeeinflussten Kurzschlussstrom von nur 1 kA zu prüfen. Erst bei Schützen mit Nennströmen grösser als 630 A liegt der "r"-Strom im Bereich 30 kA und mehr.

Bemessungsbetriebsstrom $I_e$ (AC-3) [A]	Unbeeinflusster Strom "r" [kA]
$0 < I_e \leq 16$	1
$16 < I_e \leq 63$	3
$63 < I_e \leq 125$	5
$125 < I_e \leq 315$	10
$315 < I_e \leq 630$	18
$630 < I_e \leq 1000$	30
$1000 < I_e \leq 1600$	42
$1600 < I_e$	Nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Anwender

*Tabelle Fig. 2.4-3: Unbeeinflusster Prüfstrom in Abhängigkeit vom Bemessungsbetriebsstrom*

Genau hier in diesem tiefen Kurzschlussniveau liegen auch die tatsächlich in der Praxis häufig auftretenden Kurzschlussströme. Leitungsimpedanzen, aber auch Übergangswiderstände an der Kurzschlussstelle (kein satter Kurzschluss) dämpfen die theoretisch hohen Potentiale typisch auf Werte zwischen 1 kA und 20 kA.

Leistungsschalter, die auch weniger intensive, viel häufiger auftretende Fehlerströme schnell erkennen und sicher ausschalten, wirken sich positiv auf die Kurzschlusskoordination aus (geringere Schützgrösse).

## 2.4.4. Anforderung an Leistungsschalter für einfache Koordination nach Typ "2"

Der Leistungsschalter muss schnell abschalten und während der Abschaltung den Kurzschlussstrom stark begrenzen. Hohe Kurzschlussströme müssen am Entstehen gehindert werden. Die im Fehlerfall vom Schalter durchgelassenen Ströme oder Energien dürfen nicht so hoch sein, dass einerseits das Schütz verschweisst oder thermische Überstromauslöser Schaden nehmen und die Auslösecharakteristik des Motorschutzes ausserhalb des zulässigen Bereichs zu liegen kommt (Typ "1").

Um kostengünstige und platzsparende, schweissfreie Typ "2" Kombinationen zu erreichen, soll mit Leistungsschaltern kein oder nur geringes Überdimensionieren der Schütze nötig sein (Die Überdimensionierung ist bei wenig oder nicht strombegrenzenden Leistungsschaltern erforderlich).

Mit den Allen-Bradley Leistungsschaltern 140 von Rockwell Automation wird dies möglich. Diese aus einem an werkstofftechnischen und elektromechanischen Erkenntnissen reich ausgestatteten Hintergrund entwickelten Leistungsschalter, erlauben kurzschlusskoordinierte Starterkombinationen nach Typ "2" zu realisieren

- meist ohne oder nur mit leichter Überdimensionierung der Leistungsschütze
- ohne Beachtung komplizierter Dimensionierungsregeln oder Koordinationstabellen.

Erst das Vermögen, möglichst einfach, Typ "2"-koordinierte Starter aus Standardkomponenten aufzubauen, ermöglicht das konsequente Ersetzen der Schmelzsicherung im Motorstarter.

**Leistungsschalter**

## 3. Leistungsschalter für jeden Einsatz

### 3.1. Allgemeines Vorgehen bei der Auswahl und Dimensionierung von Leistungsschaltern

Die Auswahl und Dimensionierung eines Leistungsschalters ist etwa nach folgendem Ablaufschema vorzunehmen:

- **Was ist die Aufgabe des Abgangs?**  
Einsatz für Leitungs-, Anlagen-, Gruppenschutz oder Motorschutz. Wahl des entsprechenden Schaltertyps mit oder ohne thermischen Überlastauslöser. Bestimmung nach Auslösecharakteristik (Leitungs- oder Motorschutz).
- **Welchen Nennstrom / Strombereich?**  
Sind die thermischen und elektromagnetischen Auslöser auf den von der Applikation geforderten Bereich einstellbar (Trafo- oder Generatorschutz)? Die Strombereiche der Leistungsschalter-Baugrößen sind überlappend. Ein Strombereich kann teilweise mit mehreren Schalter-Baugrößen abgedeckt werden (z.B. 80 A mit 140-CMN und 140M-K5F realisierbar). Die Baugröße nimmt Einfluss auf das Zubehör (z.B. Art und Anzahl der Hilfsschalter), die Bedienweise (Kipp- oder Drehhebel), die Montageart (Schnapp- oder Schraubbefestigung) oder die elektrischen Schaltdaten (Abschaltvermögen, Selektivität, etc.).
- **Welches Schaltvermögen / Nennspannung?**  
Wo wird der Starter in einer Anlage eingebaut? Wie hoch ist der unbeeinflusste Kurzschlussstrom am Einbauort? Ist eventuell bereits ein geringes Schaltvermögen ausreichend (hohe Dämpfung durch lange Zuleitungen, vorgeschaltetes Kurzschlusschutzorgan)? Ist durch die hohe Netzspannung (z.B. >400 V) das Abschaltvermögen reduziert? Ist eine Dimensionierung nach  $I_{cu}$  (Grenzausschaltvermögen, korrekte Funktion nach Abschaltung beeinträchtigt) oder nach  $I_{cs}$  (Bemessungskurzschlussausschaltvermögen, ohne Beeinträchtigung der Funktion nach Abschaltung eines Kurzschlusses) angezeigt? Können kleine, preiswerte Leistungsschalter eingesetzt werden, wenn für einen guten Gruppenschutz gesorgt wird?
- **Welche Spezialanforderungen?**  
Müssen Reduktionsfaktoren für den Nennstrom beachtet werden bezüglich Umgebungstemperaturen (>40...60 °C), Höhenlage (>2000 m ü.M.), hohe Netzfrequenzen (>400 Hz)?

- **Welchen Koordinationstyp?**  
Bestimmung des nachgeschalteten Leistungsschützes anhand der Koordinationstabellen für Typ "1" oder Typ "2" (siehe Kapitel 2.4).
- **Welche Montageart?**  
Bestimmen der Träger / Adapterplatten im Montagesystem 140 (wenn zum Schaltertyp passend). Entscheid Wand / Schienenmontage. Können Verdrahtungshilfen miteinbezogen werden (Verbindungssätze zwischen Leistungsschalter und Schütz, Umkehrkombinationen)?
- **Welchen Leiterquerschnitt?**  
Motorzuleitung nach Einstellung der thermisch verzögerten Auslöser des Leistungsschalters dimensionieren. Eventuell beachten der maximal zulässigen Leiterlängen (Berührungsspannung im Kurzschlussfall).

### 3.2. Leistungsschalter für Motorschutz

Dauernde Überlastströme führen zu unzulässiger Überhitzung, zu erhöhter Alterung der Isolationen, zu grösserem Verschleiss und schlussendlich zur Störung des Betriebsmittels.

Wie ein Thermorelais mit Bimetallen eignen sich Leistungsschalter:

- Unter normalen Anlaufs- und Betriebsbedingungen für:
  - Niederspannungsmotoren von 0.02 kW bis x kW

Mit Zusatzgeräten eignen sie sich für:

- Spezielle Anlaufs- und Betriebsbedingungen wie:
  - Motoren im Aussetzbetrieb oder unter wechselnder Belastung
  - Softstarter (Schutz von Motoren mit Phasenanschnitt Sanftanlauf)
  - Frequenzumformer (Drehzahlgeregelte Drehstrom-Motoren)

## 3.2.1. Schutz von Drehstrom-Motoren mit Direktanlauf

Durch die Kombination Leistungsschutz und Leistungsschalter mit Motorschutzcharakteristik ist ein normaler Drehstromantrieb gut geschützt. Da der volle Nennbetriebsstrom des Motors durch den Leistungsschalter fließt, sind an diesem die thermischen Auslöser auf Motornennstrom einzustellen.

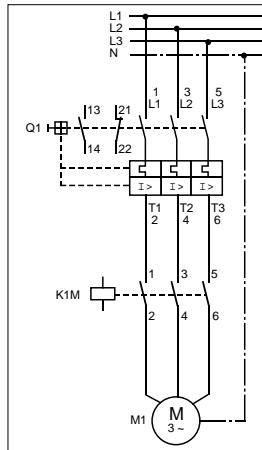


Fig. 3.2-1: Starter für Direktanlauf mit Leistungsschalter

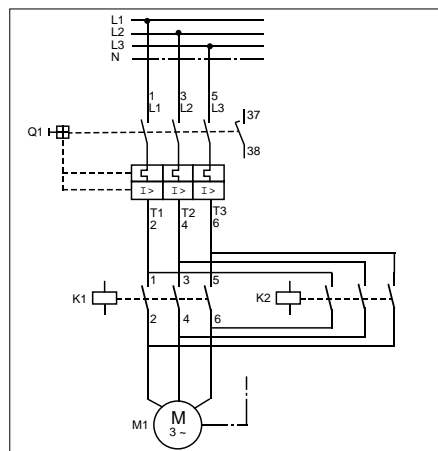


Fig. 3.2-2: Umkehrstarter mit Leistungsschalter

## 3.2.2. Schutz von Stern-Dreieck-Startern

### Mit einem Leistungsschalter

Der dem Stern-Dreieck-Starter vorgesetzte Leistungsschalter übernimmt die Motorschutzfunktionen und erübrigt die beiden Thermorelais im Wicklungsstrang des Motors. Die Motorzuleitung muss entsprechend dem Nennstrom des vorgeschalteten Überlastschutzorgans (Skaleneinstellwert Leistungsschalter) dimensioniert werden. Durch den Leistungsschalter können geringere Motorzuleitungsquerschnitte gewählt werden, als dies mit Schmelzsicherungen mit nur einem Thermorelais im Wicklungsstrang der Fall ist (Überdimensionierung der Schmelzsicherung wegen den hohen Motoranlaufströmen notwendig).

Die thermischen Überlastauslöser des Leistungsschalters sind auf den effektiven Nennbetriebsstrom des Motors einzustellen. Die Umrechnung des Nennstromes auf den Thermorelais-Skaleneinstellwert mit dem Faktor  $\sqrt{3}$  ( $=1,73$ ) entfällt.

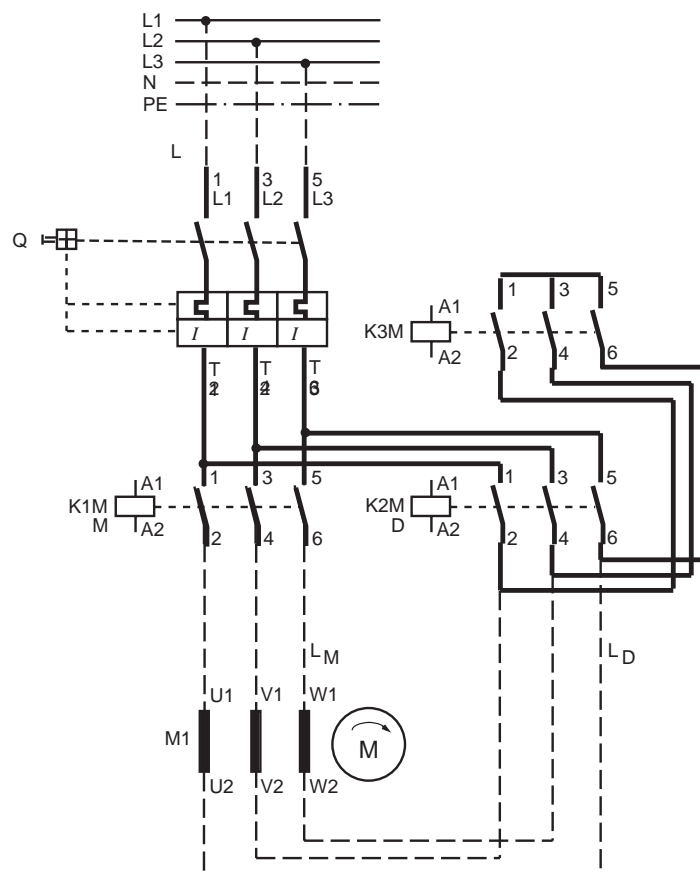


Fig. 3.2-3: Starter für Stern-Dreieck-Anlauf mit einem Leistungsschalter

Dient der Leistungsschalter lediglich als Leitungsschutz oder rechtfertigt sich aus wirtschaftlichen Gründen zur weiteren Reduktion der Motor-Zuleitungsquerschnitte trotzdem der Einsatz von zwei Thermorelais im Motorstrang, so sind die Thermorelais auf den 0,58fachen Motornennstrom, die thermischen Auslöser des Leistungsschalters aber mindestens auf den 1,2fachen Motornennstrom einzustellen. Eine unnötige Frühauslösung des Leistungsschalters kann damit verhindert werden.

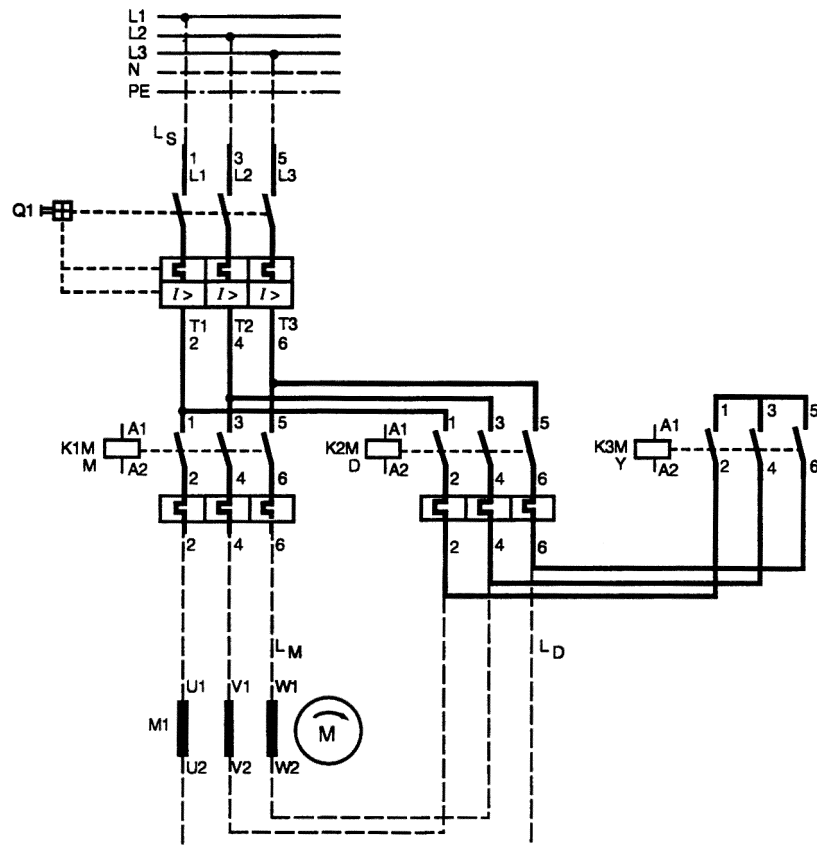


Fig. 3.2-4: Starter für Stern-Dreieck-Anlauf mit einem Leistungsschalter und zwei Thermorelais

## Mit einem Leistungsschalter und einem Thermorelais

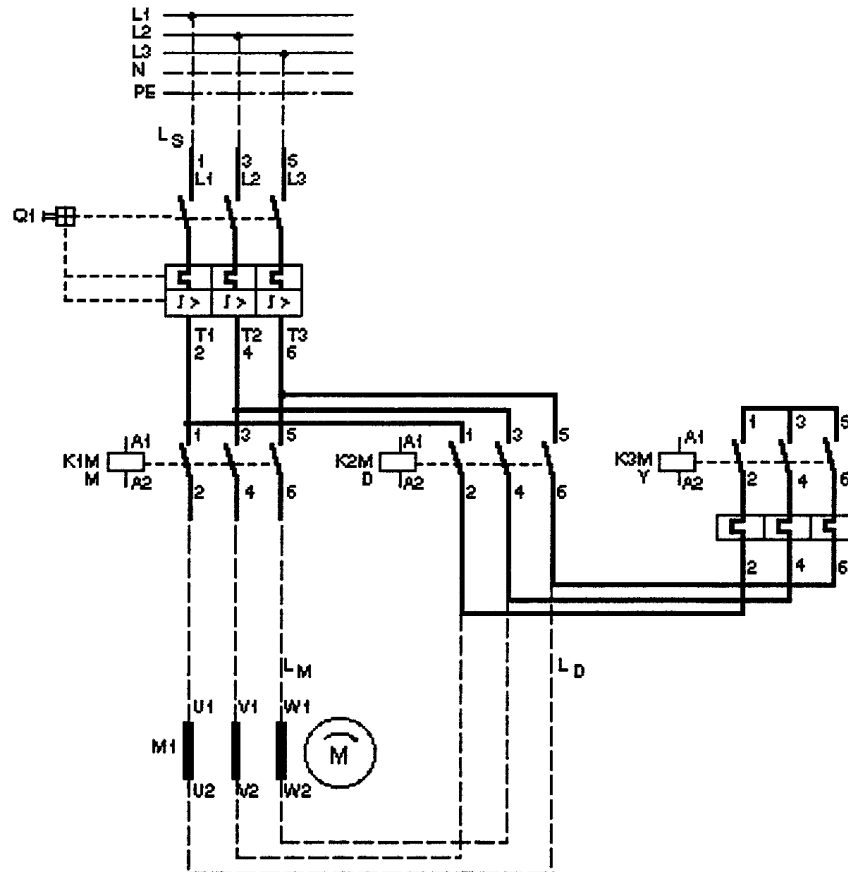


Fig. 3.2-5: Stern-Dreieck-Starter mit einem Leistungsschalter und einem zusätzlichen Thermorelais am Stern-Schütz während dem Anlauf.

In Stern-Schaltung fließen  $\frac{1}{3} \cdot I_e$  durch den Leistungsschalter. Der Skaleneinstellwert des Leistungsschalters beträgt  $I_e$ . Bei einer Rotorblockierung im Anlauf, würden ca.  $6 \cdot \frac{1}{3} \cdot I_e = 2 \cdot I_e$  durch den Leistungsschalter fließen. Der Leistungsschalter kann einen blockierten Motor in Stern-Schaltung daher nur stark verzögert ausschalten und ungenügend schützen.

Ein zusätzliches Thermorelais am Stern-Schütz montiert, übernimmt den Schutz während dem Anlauf. Dieses darf maximal auf den Strangstrom in Dreieck-Schaltung eingestellt werden ( $0.58 \times I_e$ ).

## Mit zwei Leistungsschaltern

Stern-Dreieck-Starter mit zwei Leistungsschaltern erlauben einen reduzierten Querschnitt der Leitung zum Motor und eignen sich für Schweranlauf.

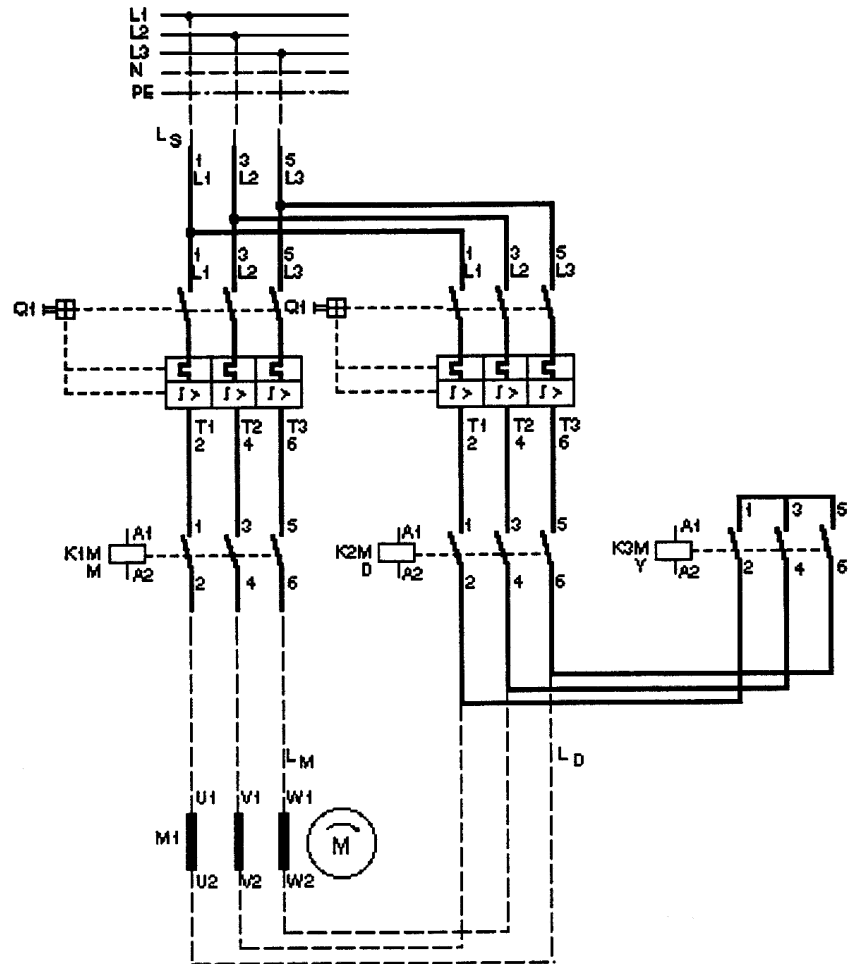


Fig. 3.2-6: Starter für Stern-Dreieck-Anlauf mit zwei Leistungsschalter für reduzierten Leiterquerschnitt und für Schweranlauf.

Für Schweranlauf wird der Leistungsschalter über dem Hauptschütz auf den niedrigst möglichen Wert zwischen  $I_e / \sqrt{3}$  und  $1.25 \cdot I_e / \sqrt{3} = 0.722 \cdot I_e$  (eventuell bis  $1.7 \cdot I_e / \sqrt{3} \approx I_e$ ) eingestellt, bei welchem im normalen Anlauf keine Auslösung erfolgt.

Der Leistungsschalter über dem Dreieckschütz wird auf den Phasenstrom (Motornennstrom  $I_e / \sqrt{3}$ ) eingestellt.

### 3.2.3. Schutz bei Schweranlauf

Während der Anzugsstrom eines Motors durch seine Konstruktion gegeben ist, so ist die Anlaufzeit dagegen lastabhängig. Werden etwa die folgenden Anlaufwerte erreicht oder überschritten, spricht man üblicherweise von Schweranlauf.

Anzugsstrom	[x-faches vom Nennstrom]	4	6	8
Anlaufzeit	[Sekunden]	10	6	3

Ein Standard-Leistungsschalter löst gemäss Zeit/Strom-Kennlinie unter solchen Bedingungen in der Regel aus.

Bei Leistungsschaltern mit Motorschutzcharakteristik wird die Trägheit der thermischen Überlastauslöser in Form einer Auslöseklasse angegeben, wie generell üblich für Motorschutzgeräte. Die Auslöseklassen sind definiert nach IEC 947-4-1 für einen Referenz-Laststrom von  $I_{ref} = 7,2 \times I_e$ .

Tabelle Fig. : Auslöseklassen von thermisch verzögerten Überlastauslösern nach IEC 947.

Auslöseklasse	Auslösezeit $T_p$ in Sekunden
10A	$2 < T_p \leq 10$
10	$4 < T_p \leq 10$
20	$6 < T_p \leq 20$
30	$9 < T_p \leq 30$

### 3.2.4. Leistungsschalter mit nachgeschaltetem Motorschutz

Wird einem Leistungsschalter ein Motorschutzgerät nachgeschaltet, so ist die thermische Überlastfunktion im Leistungsschalter zweitrangig. Das speziell und nur für den Motorschutz eingesetzte elektronische Schutzrelais übernimmt diese Aufgaben.

Es ist sicherzustellen, dass der Leistungsschalter nicht vor dem elektronischen Schutzrelais auslöst.

#### Normale Anlaufbedingungen

Das elektronische Motorschutzgerät übernimmt den thermischen Motorschutz und allfällige Zusatz-Schutzfunktionen.

Die Aufgabe des Leistungsschalters liegt im schnellen Abschalten von Kurzschlussströmen und der klaren Signalisierung einer Kurzschlussauslösung. Der thermische Auslöser des Leistungsschalters darf nicht vor dem

Motorschutzrelais ansprechen und wird auf einen Wert höher als der Nennstrom des zu schützenden Antriebs eingestellt. Die Einstellung kann beim maximalen Stromeinstellskalenwert liegen, sollte aber nicht weniger als das 1,2-fache des Motornennstroms betragen.

### **Erschwerte Anlaufbedingungen**

Anlaufzeiten bis 30 oder 60 Sekunden Dauer sind mit elektronischen Motorschutzsystemen problemlos zu erfassen und zu überwachen. Derartige Belastungen (7.2-fache Motornennstrom während einem Grossteil der Anlaufzeit) bedürfen einer speziellen Auslegung nicht nur der Motoren, welche diese thermische Belastung während dem Anlauf verkraften, sondern auch der installationsseitigen Schutz- und Schaltgeräte, inklusive der Kabel und Leiter.

### **Dimensionierung Leistungsschalter**

Der Leistungsschalter darf weder im normalen Betrieb, noch in einer anormalen Betriebsbedingung (Störfall durch Überlast, Blockierung, Phasenausfall) thermisch abschalten.

Anhand der Schalterauslösekennlinie muss untersucht werden, ob der Leistungsschalter bei den gemäss den am elektronischen Motorschutzgerät vorgenommenen Einstellungen nicht zu einer thermischen Auslösung kommt. Es kann sein, dass die Einstellung der thermischen Überstromauslöser auf den Skalen-Endwert genügt, oft muss aber ein nennstromhöherer Leistungsschalter verwendet werden.

**Beispiel:** Antriebsmotor für Zentrifuge

22 kW / 400 V

Anlaufzeit  $t_a = 60$  s

$$I_e = 43 \text{ A} \quad I_a = 6 \times I_e$$

1. Schätzung: 22 kW erfordern einen Leistungsschalter 140-CMN mit Strombereich 40...63 A Anlaufstrom:  $I_a = 6 \cdot I_e \cdot k = 6 \cdot 43 \text{ A} \cdot 0.85 = 219.3 \text{ A}$  (Der Motoranlaufstrom darf um den Faktor  $k = 0.85$  reduziert werden, da nicht während der ganzen Anlaufzeit der volle Motoranlaufstrom fließt)

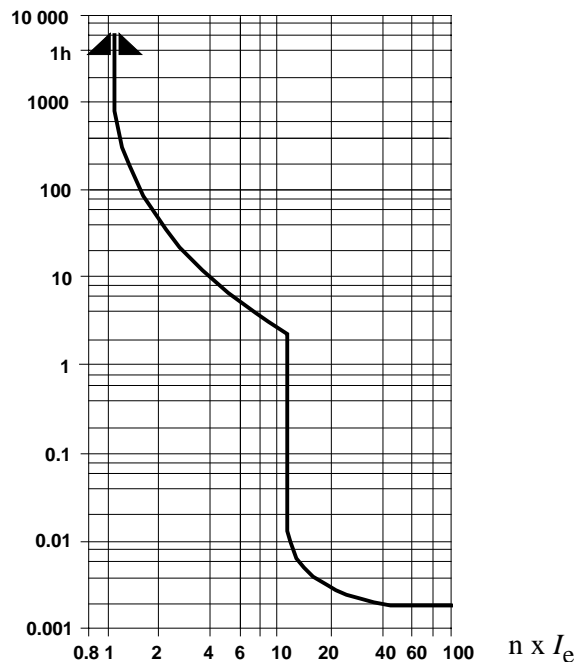


Fig. 3.2-7: Diagramm Auslösekennlinie 140-CMN

Gemäss Auslösekennlinie schaltet der 140-CMN 63 A innerhalb 60 s ab dem 1,7-fachen Skaleneinstellwert aus. Der 63 A-Schalter löst bei einem Strom von  $1.7 \times 63 \text{ A} = 102 \text{ A}$  nach ca. 1 Minute aus.

Der geforderte Schalter muss einen minimalen Skaleneinstellwert von

$$I_{\text{Skala}} = \frac{I_a}{1.7} = \frac{219.3 \text{ A}}{1.7} = 129 \text{ A} \text{ aufweisen.}$$

Der Leistungsschalter 140M-K5F 160 A ist der gesuchte Schalter für diese Applikation.

Soll die Kurzschlusskoordination nach IEC 947-4 Typ "2" erfüllt sein, ist das dem Leistungsschalter nachgeschaltete Schütz mindestens gemäss den Koordinationstabellen auszuwählen. Durch die grosse thermische Belastung, ist die Schützdimensionierung zusätzlich folgend auszuführen.

### Dimensionierung Leistungsschütz

Das Leistungsschütz zum betriebsmässigen Schalten darf bei der höheren thermischen Belastung, welche das elektronische Motorschutzgerät gemäss seiner Einstellungen zulässt, keinen Schaden nehmen. Das Schütz darf, normalerweise auf den AC-3-Nennstrom des Motors ausgelegt, während dem lange andauernden Anlaufstrom, nicht thermisch überlastet werden.

Die zulässige Kurzzeitbelastung, ersichtlich in den technischen Dokumentationen der Leistungsschütze, geben Auskunft über den maximal zulässigen Strom, welcher das Gerät während einer gewissen Zeit führen kann, ohne die thermische Grenztemperatur zu überschreiten. Der 0.85-fache Motoranlaufstrom und die volle Anlaufzeit bilden die Werte für die Tabelle der Schütz-Kurzzeitbelastung (Stromreduktion um 15 %, da nicht während der ganzen Anlaufzeit  $t_{6 \times I_e}$  der volle Anlaufstrom fließt).

**Beispiel:** Antriebsmotor für Zentrifuge (vorhergehendes Beispiel)

22k W / 400 V /  $t_a = 60$  s

$$I_e = 43 \text{ A} \quad I_a = 6 \times I_e$$

1. Schätzung: Nach AC-3 Betriebsbedingungen würde ein 22 kW / 43 A-Schütz eingesetzt (100-C43). Der maximal zulässige Kurzzeitstrom für dieses Schütz bei 60 s Belastungsdauer ist 200 A.

Berechnung der Belastung des Schützes während dem Anlauf.

Anlaufstrom:  $I_a = 6 \cdot I_e = 6 \cdot 43 \text{ A} = 258 \text{ A}$

Reduktionsfaktor:  $I_a' = I_a \cdot 0.85 = 258 \text{ A} \cdot 0.85 = 219.3 \text{ A}$

Für diese Zentrifuge muss also ein Schütz verwendet werden, welches 219 A während 1 Minute schadlos führen kann (100-C60). Das passende Schütz muss oft 1 bis 2 Leistungsstufen überdimensioniert werden.

### **Dimensionierung Leiter und Kabel**

In den Vorschriften werden die Leiterquerschnitte nur den Nennauslösestromstärken der Überstromunterbrecher zugeordnet. Zusammen mit elektronischen Motorschutzsystemen muss nun aber auch die eingestellte Auslösezeit  $t_{6 \times I_e}$  berücksichtigt werden.

Anhand des nachstehenden Diagramms kann der erforderliche Leiterquerschnitt für kunststoffisolierte Leitungen in Funktion des eingestellten Stroms und der eingestellten Auslösezeit  $t_{6 \times I_e}$  ermittelt werden.

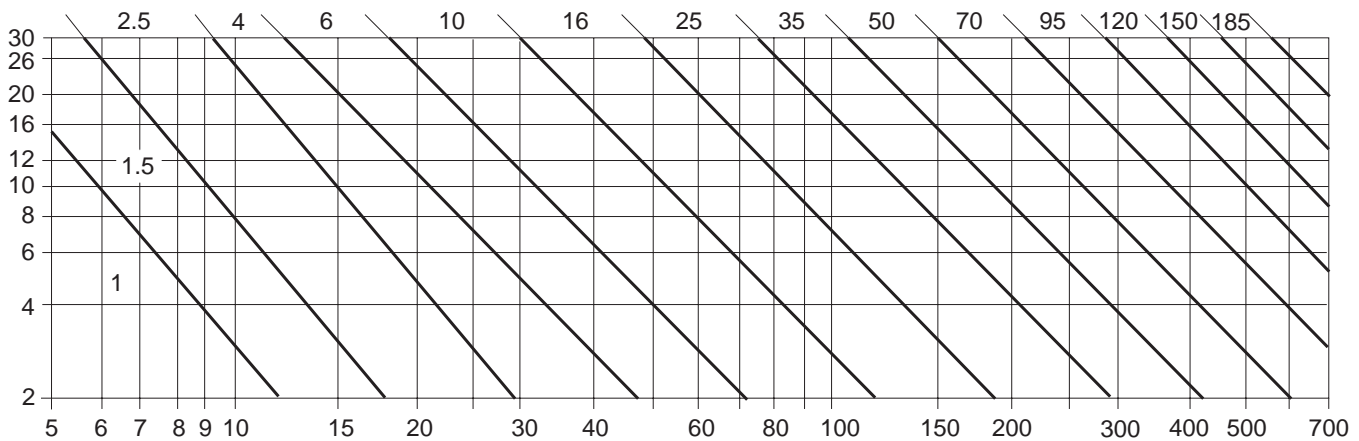


Diagramm Fig. 3.2-8: Geschützter minimaler Kupfer-Leiterquerschnitt

**Beispiel:** Antriebsmotor für Zentrifuge (vorhergehendes Beispiel)

Anlaufzeit  $t_a = 60$  s

Am Motorschutzgerät eingestellter Strom = 43 A

Geschützter minimaler Kupfer-Querschnitt aus Diagramm:  $A = 25$  mm<sup>2</sup>

### 3.2.5. Schutz von Motoren in explosionsgefährdeten Bereichen

Beim Betrieb elektrischer Anlagen im Bereich Zündschutzart erhöhte Sicherheit EEx e muss darauf geachtet werden, dass in keiner Betriebsart hohe Temperaturen entstehen, die zur Zündung des Gemisches von Gasen oder Dämpfen und Luft führen.

Beim Betrieb von Elektromotoren bedeutet dies sicherzustellen, dass die maximale Temperatur der heissesten Stelle im Motor auch im gestörten Betrieb unter der niedrigsten Zündtemperatur gemäss Zündschutzklasse der in Frage kommenden Gase oder Dämpfe liegt.

Bei einem im Betrieb blockierten Motor gibt die Zeit  $t_E$  an, wie lange es dauert, bis der Motor von der Nennbetriebs- auf die Grenztemperatur erwärmt wird.

Die Leistungsschalter 140 sind zum Schutz von EEx e-Motoren geeignet, wenn die  $t_E$  - Zeit der Motoren den genormten Mindestwerten entspricht oder länger ist. Trifft das nicht zu, ist die  $t_E$  - Zeit des Motors mit den Werten der Zeit/Strom-Kennlinie (Auslösung vom kalten Zustand aus) des Bimetallauslösers zu vergleichen. Liegen die Werte auf der Kennlinie oder höher, ist der Schutz von EEx e-Motoren gewährleistet.

Die Prüfung und Zulassung der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig bestätigt die Eigenschaft, dass der Leistungsschalter den Schutz von EEx e-Motoren sicher übernimmt.

Die hohen PTB-Anforderungen werden durch den Einbau einer motorschutzangepassten Auslösecharakteristik (unter anderem Temperaturkompensation) und einer raschen Auslösung bei Ausfall einer Phase erfüllt.

### 3.2.6. Schutz von Motoren mit Phasenanschnitt-Steuerung (Softstarter)

#### Überlastschutz:

Der Softstarter ermöglicht den Motoranlauf zeitlich zu verlängern bei gleichzeitiger Reduktion des Anlauf-Stroms und des -Moments. Aus der Sicht des Softstarters sind problemlos extreme Anlaufbedingungen beherrschbar, einen zeitlich lang andauernden Schweranlauf, z.B. Ventilator sei hier nur als ein mögliches Beispiel genannt. Voraussetzung ist, dass der Softstarter richtig ausgewählt wurde.

Der Leistungsschalter mit seinen auf den Motornennstrom einstellbaren thermischen Überstromauslösern bildet auch während dem Sanftanlauf das Abbild der Motorerwärmung nach. Auch der Oberwellenanteile, die den Motor miterwärmen, werden erfasst. Daher eignet er sich für diese Schutzaufgabe wie ein Thermorelais.

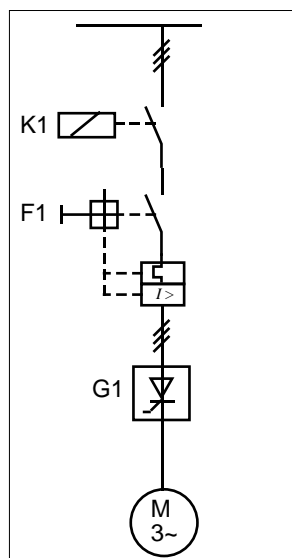


Fig. 3.2-9: Prinzipieller Aufbau eines Hauptstromkreises mit Leistungsschalter, Hauptschütz und Softstarter.

Anlagen, die Schweranläufe mit einer Anlaufzeit via Softstarter von 100 Sekunden und länger zulassen, bedürfen nicht nur einer Spezialauslegung des Motors, sondern auch der Schalt- und insbesondere Schutzgeräte.

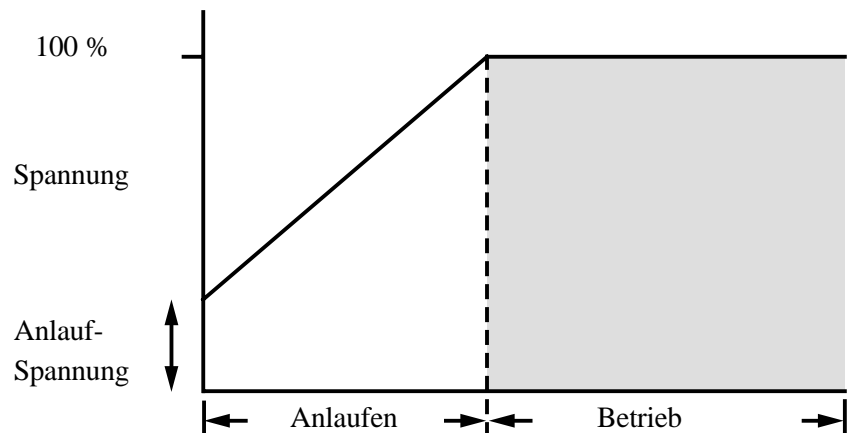


Fig. 3.2-10: Mit Softstartern lassen sich lange Startzeiten realisieren.

Motoren für Schweranlauf, die von Softstartern gesteuert sind, werden vorteilhaft mit elektronischen Motorschutzgeräten geschützt. Dabei muss der Leistungsschalter so eingestellt sein, dass er nicht vor dem Motorschutzgerät auslöst (Frühauslösung).

Die Einstellung und Auswahl des Leistungsschalters erfolgt wie für Schweranlaufbedingungen, beschrieben in Abschnitt "Schutz bei Schweranlauf". Der Leistungsschalter hat in diesem Fall nur noch Kurzschlusschutz oder Leitungsschutz sicherzustellen.

### **Kurzschlusschutz:**

Bei Kurzschluss sind die Leistungshalbleiter kritisch. Der Softstarter kann nicht ausreichend flink vom Leistungsschalter vor Kurzschluss geschützt werden. Die Auslösezeiten, vorallem im unteren Überstrombereich vom 2 bis 13-fachen Nennstrom sind zu lang. Für den Kurzschlusschutz sind die Angaben des Softstarters zu beachten.

### **3.2.7. Schutz von Motoren mit frequenzvariabler Steuerung (Frequenzumrichter)**

#### **Überlastschutz:**

Motoren die von einem Frequenzumrichter gespeist werden, sind nicht direkt mit dem speisenden Netz verbunden (via Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter, siehe Block-schaltbild). Der Leistungsschalter, vor den

Frequenzumrichter geschaltet, erhält keine direkte Information über den Zustand des Motors mehr. Er kann damit den Motorschutz nicht übernehmen. Motorschutzfunktionen sind üblicherweise im Ausgangskreis des Frequenzumrichters integriert.

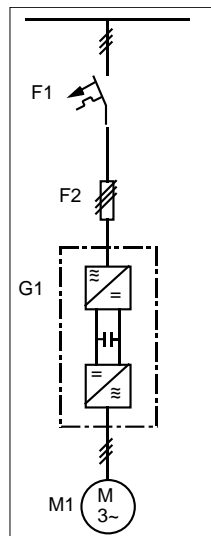


Fig. 3.2-11: Prinzipieller Aufbau eines Hauptstromkreises mit Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter des Frequenzumrichters.

### Stromaufnahme der Asynchronmotors am Umrichter

Die Stromaufnahme eines Motors (Drehstromasynchronmaschine) ist schlupfabhängig. Die variable Frequenz am Ausgang des Umrichters ermöglicht z.B. ein Anfahren des Motors mit Nennschlupf und damit Nennstrom. Damit wird bei entsprechender Spannungsanpassung das Nennmoment erzielt. Es tritt hierbei nicht der hohe Einschaltstrom wie beim direkten Anlassen auf.

Im Motorkreis fließen nach wie vor Blind- und Wirkstrom. Der Blindstrom pendelt jedoch zwischen der Zwischenkreiskapazität hin und her und belastet daher das Netz nicht. Von der Netzseite her werden nur die Wirkleistung des Antriebs, dessen Verluste und die Verluste des Umrichters bezogen. Der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  des Netzstroms ist aufgrund der Zusammenhänge im Zwischenkreis nahezu 1. Der Netzstrom bei Umrichterbetrieb ist daher kleiner als bei Netzbetrieb des Motors bei gleichen Lastverhältnissen.

Die thermischen Überstromauslöser des Leistungsschalters sind auf ca. 1,2fachen Motornennstrom einzustellen, höchstens aber auf die zulässige Strombelastbarkeit  $I_z$  der Anschlussleitung.

## **Kurzschlusschutz:**

Kurzschluss auf der Versorgungsseite:

Bei Kurzschluss zwischen den Polleitern oder eines Polleiters und Erde muss der installationsseitige Leistungsschalter ansprechen. Der Frequenzumformer verursacht selten einen Kurzschluss und wird durch einen Kurzschluss auf der Versorgungsseite nicht beschädigt.

## **Leistungsschalter im Ausgangskreis von Frequenzumrichtern**

Werden Leistungsschalter im Ausgangskreis von Frequenzumrichtern montiert, so müssen diese für die hohe Taktfrequenz des Ausgangssignals von mehreren tausend Herz geeignet sein. Der Schalter kann sonst überhitzen. Die Angaben des Herstellers sind hier zu beachten.

### **3.3. Leistungsschalter für Leitungs- und Gruppenschutz**

#### **3.3.1. Leitungsschutz**

Leistungsschalter eignen sich für den Schutz von Leitungen. Die Überlastauslöser sind auf den maximal zulässigen Leiterstrom einzustellen.

Für den Schutz von Leitungen sind oft Leistungsschalter mit Standardschaltvermögen bereits ausreichend. Durch die kurzschlussstromreduzierende Wirkung bereits kurzer Leitungen wird der Einsatz von hochleistungsfähigen Leistungsschaltern erübrigt. Eine exakte Dimensionierung zahlt sich aus.

Zulässige Leiterlänge:

Ein eher ungewöhnlicher Aspekt ist die Einhaltung des minimal erforderlichen Kurzschlussstroms. Die Dämpfung in Kurzschlusschleifen mit eher kleinem Querschnitt und hoher Leitungslänge kann derart kurzschlussstromreduzierend wirken, dass der im Kreis fließende Strom nicht mehr ausreicht, die elektromagnetischen Auslöser des Leistungsschalters anzuregen. Hier gilt es den Berührungsschutz an der Kurzschlussstelle sicher zu stellen (nach IEC 364-4, Berührungswechselspannung  $U_B$  nicht über 50 V oder wenn  $U_B$  über 50 V nicht länger als während 5 s anstehend).

Tabellen über die maximal zulässige Leiterlänge (abhängig von Netzspannung und Querschnitt) sind gegebenenfalls zu konsultieren.

### 3.3.2. Gruppenschutz

Ein Gruppenschalter schützt z.B. ein Anlagenfeld oder eine ganze Maschine. Meist dient er nur dem Leitungsschutz und ermöglicht die Reduktion der Leiterquerschnitte in der Gruppe. Weitere Kurzschlusschutzorgane sind dem Gruppenschalter nachgesetzt.

Da die nachgeschalteten Schutzorgane meist ein hohes Kurzschluss-Abschaltvermögen aufweisen, erübrigt sich der Einsatz eines hochleistungsfähigen Leistungsschalters als Gruppenschutz. Ein einfacher Leistungsschalter ohne Strombegrenzung oder ein Lastschalter können diese Aufgabe auch übernehmen, bei entsprechender Auslegung der Installation.

Weisen die untergeordneten Kurzschlusschutzorgane ein zu geringes Abschaltvermögen auf, kann der Gruppenschalter die Kurzschluss-Abschaltung unterstützen. In diesem Fall wirkt er als Vorsicherung oder als Back-up-Schutz. Beide in Serie geschaltete Schutzorgane schalten also gleichzeitig ab. Der Durchlassstrom des Gruppenschalters darf dabei das Abschaltvermögen der nachgereihten Schalter nicht übersteigen.

Ist ein zeitlich gestaffeltes Abschalten hintereinander liegender Schutzorgane verlangt, muss bei der Dimensionierung des Gruppenschalters auf die Selektivität geachtet werden. Das selektive Verhalten gegenüber anderen Kurzschluss-Schutzorganen ist aus den technischen Dokumentationen des Herstellers zu entnehmen.

### 3.4. Leistungsschalter für Kondensatoren

Kondensatoreinheiten müssen nach den Bestimmungen (IEC 33) dauernd für den Betrieb mit einem Strom geeignet sein, dessen Effektivwert das 1,3-fache des Stroms nicht übersteigt, der bei sinusförmiger Nennspannung und Nennfrequenz fließt.

Aufgrund dieser Dimensionierung wird bei Kondensatoreinheiten in den überwiegenden Anwendungsfällen auf einen Überlastschutz verzichtet.

Die thermisch verzögerten Überlastauslöser der zum Schutz gegen Überströme eingesetzten Leistungsschalter können auf den 1,3..1,43-fachen Kondensatornennstrom eingestellt werden, da unter der Berücksichtigung der zulässigen Kapazitätsabweichung (+10 %) der Kondensatorstrom das  $1,1 \times 1,3 = 1,43$ -fache des Kondensatornennstroms betragen kann. Beim Einschalten von Kondensatoren und besonders beim Zuschalten zu bereits am Netz liegenden Kondensatorgruppen können sehr hohe

Einschaltstromspitzen auftreten. Sehr wesentlich für die Höhe des Einschaltstroms ist das Verhältnis von Eigenfrequenz des Kreises zur Betriebsfrequenz.

Erfahrungsgemäss reicht ein Kurzschlussauslöser-Ansprechwert vom 10...12-fachen des Kondensatornennstroms aus, um die Auslösung durch die meist höheren, aber sehr kurzzeitigen Stromspitzen zu vermeiden. Die Angaben des Leistungsschalter-Herstellers sind zu beachten.

### **3.5. Leistungsschalter für Transformatoren**

#### **3.5.1. Primärseitiger Schutz von Transformatoren**

Für den primärseitigen Schutz von Transformatoren muss der Einschaltstrom eines leerlaufenden Transformators beachtet werden. Hier tritt infolge Übersättigung des Eisenkerns ein hoher Magnetisierungsstrom auf, der das 15- bis 20-fache des Transformatornennstroms betragen kann.

Die Stromspitzen des Einschaltvorgangs klingen innerhalb weniger Millisekunden ab, können jedoch den Kurzschlussauslöser zum Ansprechen bringen, besonders bei schnellen, stark strombegrenzende Leistungsschaltern. Langsame Leistungsschalter eignen sich hier besser, besonders wenn der Kurzschlussauslöserbereich verstellt und höher gewählt werden kann bzw. direkte Auslösung über Kurzverzögerung möglich ist.

#### **3.5.2. Sekundärseitiger Schutz von Transformatoren**

Ähnlich wie Motoren sind Transformatoren überlastbar, abhängig von der vorausgegangenen Dauerleistung und der Kühlmitteltemperatur. Transformatoren sind weniger empfindlich gegenüber kurzzeitiger Überlast wie Motoren. Der Leistungsschalter bietet zwar einen zu hohen Schutz gegen thermische Überlast, eignet sich aber trotzdem gut für den Trafoschutz.

Für den sekundärseitigen Schutz von Transformatoren verwendet man Leistungsschalter, welche ein Schaltvermögen gleich oder grösser dem Transformator-Kurzschlussstrom aufweisen. Die thermischen Überlastauslöser des Leistungsschalters stellt man auf den Transformatornennstrom ein.

Den Kurzschlusschutz übernehmen die unverzögerten elektromagnetischen Auslöser. Für Selektivitätsaufgaben zum nachgeschalteten Kurzschlusschutzorganen sind Leistungsschalter mit kurzverzögerten Überstromauslösern vorzusehen.

### 3.6. Leistungsschalter für Generatoren

Leistungsschalter eignen sich grundsätzlich für den Schutz von Generatoren. Kleinere Einzelgeneratoren (Schiffsanlagen, Notstrom- und Spezialversorgungsanlagen) werden meistens durch unverzögerte, strombegrenzende Leistungsschalter geschützt. Grössere Generatoren und vorallem bei Generator-Parallelbetrieb müssen spezielle Leistungsschalter eingesetzt werden, welche ein zeitlich verzögertes Abschalten ermöglichen.

Zum Überlastschutz wird der Überlastauslöser des Leistungsschalters auf den Generatornennstrom eingestellt. Der Kurzschlusschutz soll etwas tiefer als der Dauerkurzschlussstrom des Generators eingestellt sein.

Aufgrund der Bauart moderner Generatoren liegt der Stosskurzschlusswechselstrom in der weit überwiegenden Mehrzahl über dem sechsfachen Nennstrom des Generators, in vielen Fällen sogar noch über dem siebenfachen. Leistungsschalter mit einem Ansprechwert der elektromagnetischen Auslöser unter dem sechsfachen Generatornennstrom erfassen praktisch alle schweren Kurzschlüsse innerhalb der ersten Halbwelle. Nichtverzögerte und strombegrenzende Leistungsschalter unterbrechen den Kurzschlussstrom unmittelbar danach und gewährleisten damit den Schutz der Anlage.

Leistungsschalter mit festem und hohem Ansprechwert der Magnetauslöser sind daher für den Generatorschutz nicht geeignet.

Bei entfernten, stark gedämpften Kurzschlüssen (Kurzschlussstrom unter dem Ansprechwert der Magnetauslöser) ist die thermische und dynamische Belastung der Anlage entsprechend niedrig. In diesen Fällen wird der Kurzschlusschutz von den thermischen Überlastauslösern mit übernommen.

### 3.7. Leistungsschalter für spezielle Netzfrequenzen

Grundsätzlich erfolgt die Abschaltung durch die Löschung des Lichtbogens. Bei Wechselstrom löscht der Lichtbogen bei jedem Nulldurchgang. Im Wechselstromkreis kommt der Lichtbogenlöschung entgegen, dass in jedem Stromnulldurchgang der Lichtbogen verlöscht und in der darauffolgenden Halbwelle erst nach Wiedertzünden weiterbestehen kann. Der Lichtbogenstrom ist erfolgreich abgeschaltet, wenn es gelingt, das Wiedertzünden nach dem Stromnulldurchgang zu verhindern. Daraus ergibt sich die spezifische Wechselstromlöschung. Sie besteht darin, dass man nach Öffnen der Schaltstücke die Schaltstrecke, d.h. den Zwischenraum zwischen den Schaltstücken, von den Ladungsträgern des vorher anstehenden Lichtbogens befreit und so spannungsfest macht, dass die wiederkehrende Spannung die

Schaltstrecke nicht erneut durchzünden kann (Wärmeentzug). Dies wird ausgenutzt bei Schützen und bei nicht strombegrenzenden Leistungsschaltern.

Bei strombegrenzenden Schaltern wird ein "künstlicher" Nulldurchgang erzeugt. Dieser ermöglicht daher auch das Schalten von Gleichstrom.

### 3.7.1. Schaltvermögen unter 50/60Hz

Schnelle, strombegrenzende Leistungsschalter benötigen keinen Stromnulldurchgang. Sie reagieren bereits im Stromanstieg der ersten Kurzschluss-Sinus-Halbperiode. Ob nach 10 ms (50 Hz) oder 30 ms ( $16 \frac{2}{3}$  Hz) ein Stromnulldurchgang kommt, ist irrelevant, da in beiden Fällen lange vor dem Stromnulldurchgang der Kurzschluss abgeschaltet ist (Abschaltzeit strombegrenzender Leistungsschalter ist kürzer als eine Halbperiode). Das Schaltvermögen bleibt erhalten.

Eisenbahnnetze ( $16 \frac{2}{3}$  Hz) haben durch meist sehr langen Leitungslängen eine hohe Dämpfung. Die zugsinternen Bordnetze sind ebenfalls nicht besonders kurzschlussleistungsstark. Strombegrenzende Leistungsschalter können hier grundsätzlich in unveränderter Bauart eingesetzt werden.

Für Leistungsschalter mit Nullpunktlöschung ist das Abschaltvermögen reduziert. Die Angaben des Herstellers sind zu beachten.

### 3.7.2. Schaltvermögen über 50/60 Hz

Mit steigender Frequenz folgen die Stromnulldurchgänge in immer kürzeren Abständen. Gleichzeitig wird das Maximum der Kurzschlusswechselstrom-Halbperiode schneller erreicht. Bei unveränderter Öffnungsgeschwindigkeit des Leistungsschalters wird also ein immer grösserer Anteil der Kurzschluss-Halbperiode durchgelassen. Der Schalter wird stärker erhitzt. Um den Schalter vor Zerstörung zu schützen, muss mit steigender Frequenz das Schaltvermögen reduziert werden.

Da aber Mittelfrequenzgeneratoren nur verhältnismässig niedrige Kurzschlussströme aufbringen, führt bei Frequenzen über 400 Hz eine etwaige Verringerung des Leistungsschaltvermögens gegenüber 50/60 Hz in der Praxis zu keinen Schwierigkeiten.

### 3.8. Schalten von Gleichstrom

Im Gegensatz zu Wechselstrom finden bei Gleichstrom keine Stromnulldurchgänge statt. Da strombegrenzende Leistungsschalter nicht wie Schütze auf einen Stromnulldurchgang zum Löschen des Lichtbogens angewiesen sind, haben sie bei Gleichstrom-Kurzschlüssen kaum ein reduziertes Schaltvermögen im Vergleich zu Wechselstrom.

Bei einem Gleichstrom-Kurzschluss ist der Stromanstieg in der ersten Phase durchaus vergleichbar mit jenem bei Wechselstrom (abhängig von der Zeitkonstante des DC-Kreises). Nur der Stromanstieg, die Steilheit des Kurzschlussstroms ist ausschlaggebend für die Öffnung der Kontakte bei strombegrenzenden Leistungsschaltern. Sobald der Lichtbogen aktiv vom Blasfeld in die Löschkammer geleitet und dort gelöscht ist, ist der Kurzschluss abgeschaltet, unabhängig wann und ob überhaupt ein Stromnulldurchgang folgt.

In der Praxis können strombegrenzende Leistungsschalter zum Schalten des vollen Nennstroms bei Gleichstrom eingesetzt werden. Der Ansprechwert des elektromagnetischen Kurzschlussauslösers ist bei DC etwas höher gegenüber AC.

Zur symmetrischen Beheizung der thermischen Überlastauslöser wird auch bei Leistungsschaltern empfohlen, alle Pole in Reihe zu schalten (bei Differentialauslösung zwingend, analog thermische Überstrommotorschutze-lais). Die Serieschaltung führt zudem zu einer rascheren Abschaltung.

### 3.9. Schalten von hohen Netzspannungen

Das Abschaltvermögen bei 690 V ist gegenüber 400 V reduziert. In Einphasennetzen mit hohen Spannungen (>400 V) kann das Schaltvermögen von dreipoligen Leistungsschaltern durch Serieschaltung der Strombahnen erhöht werden (analog Kaskadenschaltung).

Ob durch die Serieschaltung das Bemessungskurzschluss-Ausschaltvermögen wie bei 230 V wieder erreicht wird, ist im einzelnen Fall abzuklären.

### 3.10. Selektivität

Aus wirtschaftlichen und Gründen der betrieblichen Sicherheit genügt es nicht, die Anlage im Störfall so schnell wie möglich abzuschalten. Das dem Fehler unmittelbar vorgeschaltete Schutzorgan muss zuerst ansprechen. Nur der gestörte Teil soll abgeschaltet werden. Die anderen im Leitungszug liegenden Schaltgeräte bleiben eingeschaltet. Selektivität begrenzt die Auswirkungen eines Fehlers räumlich und zeitlich auf ein Mindestmass. Betriebsstörungen lassen sich minimieren.

## 3.10.1. Selektivität zwischen Leistungsschaltern

### Stromselektivität

Da in Verteilungen die Nennstromstärken der Verteilerschalter vom Transformator zum Verbraucher hin immer kleiner werden, sind auch ihre Kurzschlussauslöser im gleichen Sinne auf niedrigere Werte eingestellt. Da gleichzeitig auch die auftretenden Kurzschlussströme kleiner werden, kann sich eine natürliche Selektivität über die Stromhöhe ergeben. Die Stromselektivität lässt sich besonders in Abgängen der Unterverteiler bei langen Leitungen mit grosser Dämpfung anwenden. Die Kurzschlussströme an den Einbaustellen der Schalter müssen bekannt sein.

Selektivität ist vorhanden, wenn der Kurzschlussstrom hinter dem nachgeordneten Schalter kleiner ist, als der (einstellbare) Kurzschlussauslöser-Ansprechwert des vorgeordneten Leistungsschalters. Dieser Wert ist als Selektivitätsgrenze zu betrachten.

Geprüft, ob zwei Schalter wirklich selektiv zueinander sind, wird anhand der Zeit/Strom-Kennlinien. Die Auslösekennlinien der beiden Leistungsschalter dürfen sich bis zum maximalen Fehlerstrom weder berühren noch schneiden und müssen einen dem Streuband entsprechenden Abstand voneinander haben.

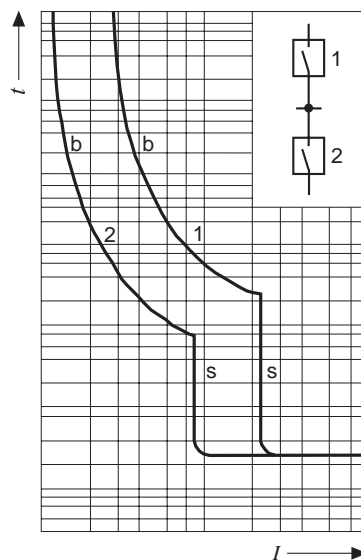


Fig. 3.10-1: Auslösekennlinien zweier Leistungsschalter stromselektiv

Ist der Vergleich der Auslösekennlinien zwar genau, so ist er auch aufwendig. Vom Hersteller bereitgestellte Tabellen bezüglich Selektivität zwischen Leistungsschaltern erleichtern die Sachlage.

In Bezug auf Überlast arbeiten die thermischen Bimetall-Auslöser bei verschiedenen Nennströmen der Leistungsschalter zueinander immer selektiv. Die Auslösezeiten verschiedener Baugrößen beim selben Überstrom sind automatisch unterschiedlich (z.B. 100 A Variante zu 6.3 A Variante).

## Zeitselektivität

Wenn die Stromselektivität wegen z. B. zwei etwa gleich schnell ansprechenden Leistungsschaltern nicht erreicht werden kann, muss die Selektivität über die Ansprechzeiten erzielt werden.

Zeitselektivität bei grösseren Anlagen-Leistungsschaltern, wird erreicht durch entsprechende Verzögerung der Kurzschlussauslöser um einige 10 ms. Die Gesamtausschaltzeit des nachgeordneten Schalters muss kürzer sein, als die Befehlsmindestdauer des vorgeordneten Schalters. Umgekehrt ausgedrückt für zeitselektiv staffelbare Leistungsschalter: Die Verzögerungszeit des vorgeordneten Schalters muss hinreichend grösser sein als die Gesamtausschaltzeit des nachgeordneten Schalters.

Erreichbare Mindest-Verzögerungszeiten zwischen zwei Schalterebenen sind 60 oder 100 ms. Die Auslösekennlinie des verzögerten Schalters wird dabei im Zeit/Strom-Kennlinienblatt nach oben verschoben.

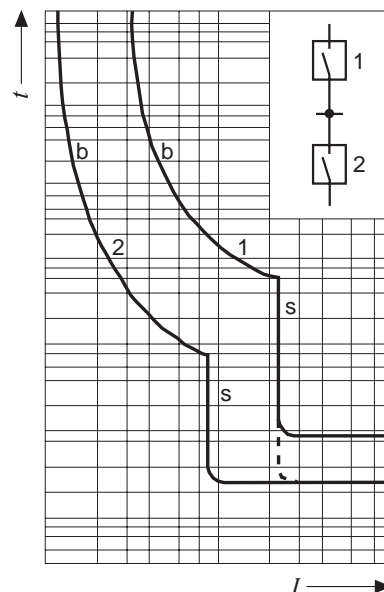


Fig. 3.10-2: Auslösekennlinie zweier Leistungsschalter zeitselektiv

Die Verzögerung der zeitselektiv staffelbaren Leistungsschalter lässt sich dadurch realisieren, dass weder Kontakte noch Schaltschloss direkt durch den magnetischen Kurzschlussauslöser angeregt werden, sondern durch ein mechanisches Verzögerungswerk oder eine elektronische Schaltung verzögert ansprechen.

Bei verzögerten Schaltern kann nicht mehr von Strombegrenzung im Sinne einer Schnellabschaltung gesprochen werden. Mehrere Sinus-Vollwellen des effektiven Kurzschlussstroms passieren das zeitverzögerte Schutzgerät und belasten die entsprechend auszulegende Anlage.

### 3.10.2. Selektivität zwischen Leistungsschalter und Schmelzsicherung

Zur eindeutigen Festlegung und Überprüfung der Selektivität zwischen Schaltern und Sicherungen in einer Anlage trägt man deren Auslösekennlinien in ein Auslöse-*diagramm* ein.

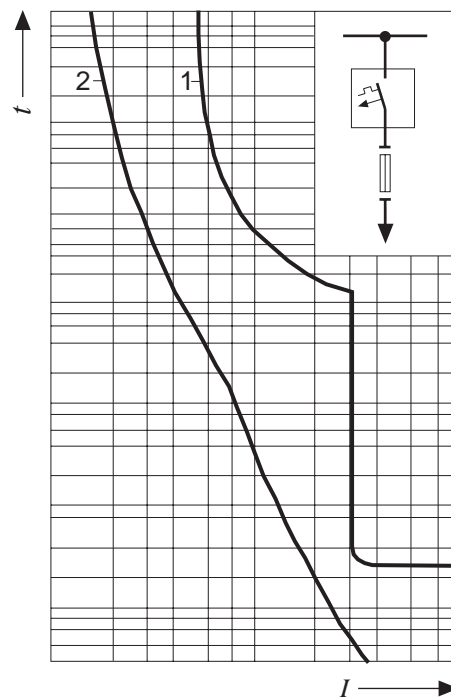


Fig. 3.10-3: Selektivität zwischen Leistungsschalter und nachgeschalteter NH-Sicherung

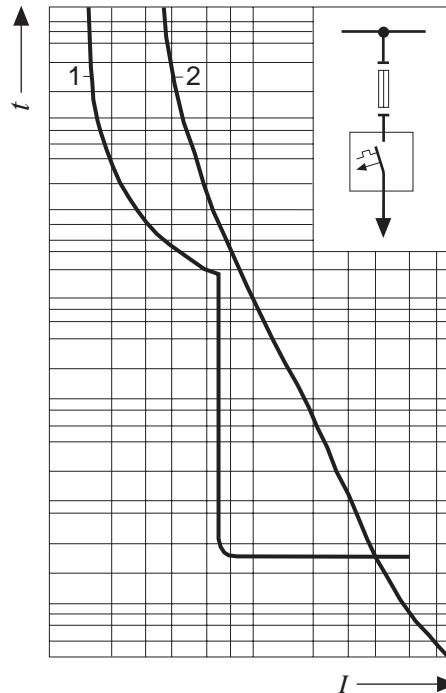


Fig. 3.10-4: Selektivität zwischen NH-Sicherung und nachgeschaltetem Leistungsschalter

Selektivität ist dann gewährleistet, wenn die Auslösekurve des nachgeordneten Schaltgerätes unterhalb der Kennlinien des vorgeordneten Schaltgerätes liegt. Praxisgerecht ist ein Zeitabstand zwischen den Kennlinien von mindestens 60 ms.

Eine Anpassung kann erfolgen durch Verstellen des Auslöseransprechwertes (im Diagramm Verschieben der Kennlinien in waagrechter Richtung) oder durch Verzögerung des Auslösezeitpunktes (im Diagramm Verschieben der Kennlinien in senkrechter Richtung).

### 3.10.3. Selektivität zwischen Schmelzsicherungen

Ist die zum Schmelzen benötigte Energie der vorgeschalteten Sicherung grösser, als die Gesamt-Durchlassenergie der nachgeschalteten Sicherung, so ist die Selektivität erfüllt. Dies ist der Fall, wenn der Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung das 1.6 bis 2fache des Nennstroms der nachgeschalteten Sicherung beträgt. Der Faktor variiert abhängig von unterschiedlichen Sicherungsbaunormen und Herstellern.

In der Praxis hat sich bewährt, Schmelzsicherungen mit dem Nennstromverhältnis 1:2 zu wählen. Kleinere Verhältnisse können zu alterungsbedingten Fehlern führen.

**Leistungsschalter**

## 4. Argumentation für den Leistungsschalter-Einsatz

### 4.1. Zusammenfassung

Der Einsatz von Leistungsschaltern (bzw. Leitungsschutzschaltern) ist in Industrie und Haushalt weit verbreitet. Besonders dort, wo auf die Betriebssicherheit einer Anlage grosser Wert gelegt wird gibt man der schmelzsicherungslosen Technik Vortritt. Der Leistungsschalter ist das moderne Schutzorgan.

Dadurch können Vorteile der Leistungsschalter, wie integrierte Signalisation und Kommunikation, reduziertes Unfallrisiko beim Manipulieren, aber auch vereinfachte Anlagenplanung miteinbezogen werden.

Trotzdem dürfen gute Eigenschaften der Schmelzsicherung nicht geschmälert werden. Das Kurzschluss-Ausschaltvermögen von 100 kA ist so hoch, dass eine Auswahl, abhängig vom Einbauort und der Nennspannung, vollständig entfällt. Weiter positiv ist die Zunahme der Strombegrenzung mit steigendem unbeeinflusstem Kurzschlussstrom. Die Kurzschlusskoordination zwischen Schütz und Leistungsschalter nach IEC 947-4-1 Typ "2" fällt dadurch sehr einfach aus (keine Überdimensionierung der Schaltgeräte). Die einfach erreichbare Selektivität zwischen Sicherungen ist sicher weiter ein für die Schmelzsicherung sprechendes Argument.

Die Vorteile des Leistungsschalters gegenüber der Schmelzsicherung:

- Ersetzt Sicherung und Motorschutzrelais,
- bietet Signalisation
- und ist gegebenenfalls fernsteuerbar.
- Der Leistungsschalter kann schnell wieder eingeschaltet werden,
- schaltet immer allpolig (kein Einphasenlauf)
- und ist alterungsfrei.
- Er kann eine Motorschutzangepasste Auslösekennlinie aufweisen,
- erlaubt die Reduktion von Leiterquerschnitten
- und erhöht die Bediensicherheit.
- Die Anlagenplanung kann standardisiert und
- eine Feldschottung reduziert werden.

## 4.2. Funktionsvergleich Leistungsschalter / Schmelzsicherung

### 4.2.1. Zeit-Stromkennlinien Vergleich

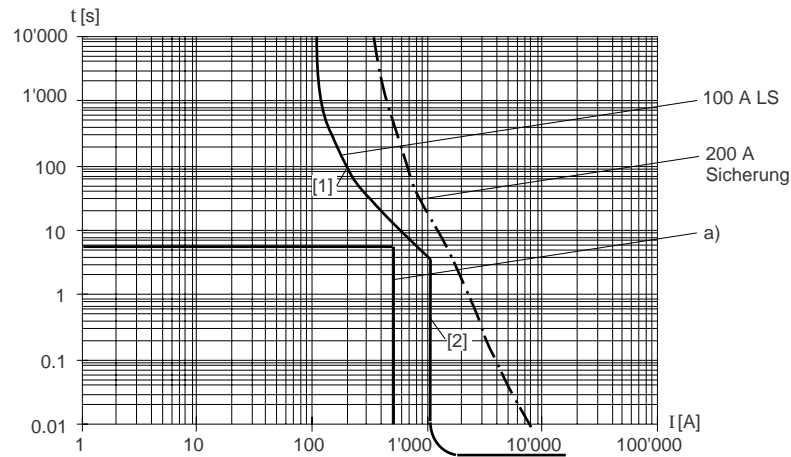


Fig. 4.2-1: Zeit-Stromkennlinie eines Leistungsschalters 100 A und einer Schmelzsicherung 200 A.

- Durchgezogene Linie: Der Leistungsschalter mit seiner typischen Kennlinie des Überlastauslösers ([1] Bimetall) und des Kurzschlussauslösers ([2] elektromagnetischer Auslöser).
- Unterbrochene Linie: Kennlinie einer Schmelzsicherung mit relativ stetigem Kurvenverlauf.
- Dicke Linie: Kontrollpunkt (a) eines 100 A-Motors mit Anlaufstrom (85 % von  $6 \times I_n$ ), der sich nach  $\sim 6$  s auf den Nennstrom reduziert. Dieser Kontrollpunkt darf die Kennlinien der Schutzorgane nicht schneiden, wollen Auslösungen während dem Motoranlauf verhindert sein. Die Sicherung muss daher grösser als der Motornennstrom gewählt werden und damit muss auch der Leiterquerschnitt erhöht werden.

Aus der Motoranlaufkurve ist ersichtlich, warum Schmelzsicherungen ein oder zwei Nennstromstufen höher gewählt werden müssen, als der Motornennstrom es erfordern würde, damit ein Motoranlauf möglich ist. Der Leitungsquerschnitt muss dem höher gewählten Schmelzsicherungsstrom entsprechen.

Die Bimetallauslöser des Leistungsschalters zeichnen das Verhalten des Motors während Anlauf und Betrieb ab. An der Ansprechgrenze der elektromagnetischen Auslöser reduziert sich die Ausschaltzeit auf die Eigenzeit des Schalters (Mechanik des Schaltschloss). Diese wird bei kleinen, Strombegrenzenden Leistungsschaltern (mit Schlaganker) bei steigendem Kurzschlussstrom noch weiter reduziert.

## 4.2.2. Durchlassenergie-Vergleich

Die Durchlasswerte (Durchlassintegral ( $I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 dt$ ) oder Joule-Integral genannt) eines Leistungsschalters steigen mit zunehmendem Kurzschlussstrom (in der selben Zeiteinheit muss ein höherer Strom ausgeschaltet werden). Gegenläufig verhält sich die Ausschaltzeit bei der Schmelzsicherung. Mit steigendem Strom schmilzt sie schneller durch (Reduktion der Durchlassenergie) bis ein gewisser Wert nicht mehr unterschritten werden kann. Man spricht vom Bereich  $I^2t \approx \text{konstant}$ .

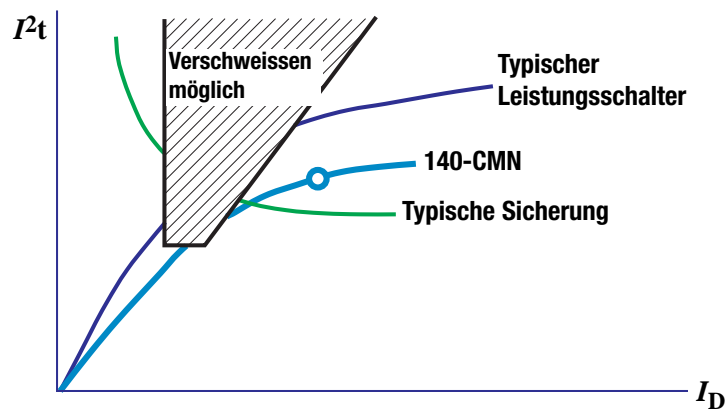


Fig. 4.2-2: Kennlinienvergleich der Durchlassenergie von Leistungsschaltern und von Schmelzsicherung.

Darstellung der Durchlassenergie in Abhängigkeit des Durchlassstroms. Die Durchlassenergie der Schmelzsicherung reduziert sich mit steigendem Kurzschlussstrom bis zu einem ungefähr konstanten Minimalwert. Nach dem Ansprechen der Magnetauslöser des Leistungsschalters vergrößert sich die Durchlassenergie mit steigendem Kurzschlussstrom. Schnelle, stark strombegrenzende Leistungsschalter haben Durchlasswerte, welche den kritischen Schweißbereich des Schütz nur knapp tangieren. Die Kennlinie der Schmelzsicherung kann durch den verschweisskritischen Bereich führen.

Untersuchungen in Industrieanlagen im 400 V-Strahlennetz mit Nennleistungen der Einspeisetransformatoren bis 2'000 kVA haben gezeigt, dass grosse Kurzschlussströme ausgesprochen selten vorkommen, weil die Kurzschlüsse in der Verbraucheranlage auftreten. Obwohl durch Parallelbetrieb der Speisetransformatoren Kurzschlussströme von 50 kA oder 100 kA durchaus möglich wären, liegen 90 % der Anfangskurzschlussströme unterhalb von 9 kA, mit einem Mittelwert von nur 2,8 kA.

Es ist also wichtig, dass kleine bis mittlere Kurzschlussströme schnell und sicher abgeschaltet werden. Diese Aufgabe übernimmt der Leistungsschalter besser.

### 4.2.3. Grenzstromvergleich

Die Prüfströme der Schmelzsicherungen sind nach ihrem Nennstrombereich gemäss IEC 269 gestaffelt eingeteilt. Für alle Schmelzsicherungen über 25 A-Nennstrom gilt ein grosser Prüfstrom  $I_2$  vom 1.6fachen Nennbetriebsstrom. Für Leistungsschalter (Motorschutzschalter) gilt nach IEC 947 einheitlich der 1.2fache Einstellstrom als Grenzauslösestrom. Sicherungen haben also stets einen Ansprechstrom der um 30 % und mehr, höher ist als der von Leistungsschaltern. Schmelzsicherungen sind für den Kurzschlusschutz konstruiert, Leistungsschalter erfassen hingegen auch Überlast an Leitern und Motoren.

### 4.2.4. Tabellarische Gegenüberstellung

In der Gegenüberstellung werden die schmelzsicherungsbehaftete und die "sicherungslose" Bauweise von Lastabgängen in Bezug auf

- Projektierung
- Schutzfunktion
- Bedienung und Wartung verglichen.

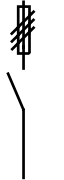
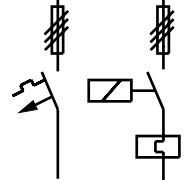
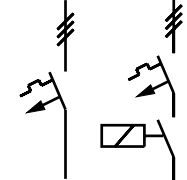
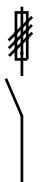



Projektierung			
$I_k$ -Berechnung erforderlich	nein	nein	ja
Zusätzlicher Platzbedarf	ja	ja	nein
Aufwand für Zugänglichkeit, Bedienung sichtbare Trennstelle	gross kleiner	gross kleiner	gross ja
Fernsteuerung und elektrische oder mechanische Verriegelung	nein	ja	ja
Ersatzsicherung und Zubehör notwendig	ja	ja	nein

Tabelle Fig. 4.2-3:

- *Der Einsatz von Leistungsschaltern erfordert kurz die Kontrolle des möglichen Kurzschlussstroms am Einbauort und des Abschaltvermögen des Schalters.*
- *Fernsteuerung und el. oder mech. Verriegelung ist bei gewissen Leistungsschaltern möglich.*
- *Keine Ersatzsicherungen müssen vor Ort griffbereit vorhanden sein.*

Schutzfunktion				
Überlastschutz durch	Sicherung	Schalter	Relais	Schalter
Kurzschlusschutz durch	Sicherung	Schalter und Sicherung	Sicherung	Schalter
Schaltvermögen	100 kA bis 690 V, 50 Hz			$I_{cu}$ [100 kA bis 500 V (25 A) ]
Strombegrenzung	abhängig von $I_n$ und $I_k$			abh. von Bauart, $I_n$ , $I_k$ , $U_n$
Durchlassenergie	>bei kleinem $I_k$ konst. bei grossem $I_k$			<bei kleinem $I_k$ >bei grossem $I_k$

*Tabelle Fig. 4.2-4: Bei Leistungsschaltern ist der maximal mögliche Kurzschlussstrom am Einbauort mit dem Schaltvermögen zu vergleichen. Das Schaltvermögen ist abhängig von Konstruktion und Typ.*

*Die Durchlassenergie nimmt bei Schmelzsicherung mit steigendem unbeeinflusstem Kurzschlussstrom ab, hingegen bei Leistungsschalter nimmt sie zu (Einfluss auf Überdimensionierung der Schütze bei Kurzschlusskoordination).*



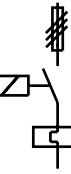
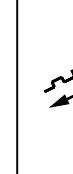
Bedienung und Wartung				
Bedienungssicherheit	Frage des Aufwands			gut
Ausschaltung bei Überlast Wiedereinschaltbar	Sicherung nein	Schalter ja	Schütz ja	Schalter ja
Ausschaltung bei Kurzschluss Wiedereinschaltbar	Sicherung nein	Schalter oder (und) Sicherung ja/nein	Sicherung nein	Schalter ja
Auslösemeldung	möglich	ja	möglich	ja
Massnahmen nach Ausschaltung Sicherung ersetzen Schalter und (oder) Schütz überprüfen	ja nein	nein/ja ja	nein/ja ja	nein ja
Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit	nein	nein/ja	nein/ja	nein (koord. Typ "2")
Sichtbarkeit einer einwandfreien Funktion an der Sicherung am Leistungsschalter und am Schütz	ja	ja nein	ja nein	nein
Unterbruch von 3 Polen	nein	nein/ja	nein	ja

Tabelle Fig. 4.2-5:

- Einfache Auslösemeldung beim Leistungsschalter durch Signalkontakte
- Eine neuingesetzte Sicherung ist unverbraucht. Beim Leistungsschalter ist die Funktionstüchtigkeit abhängig von der Anzahl bisheriger Kurzschlussabschaltungen und der Höhe der effektiven Kurzschlussströme.
- Der Leistungsschalter schaltet immer allpolig ab. Dies ist je nach Applikation als Vor- oder Nachteil zu werten (Motorabgänge / Strassenbeleuchtungsverteilung mit Redundanz).

### 4.3. Argumente für den Leistungsschalter

#### 4.3.1. Unfallverhütung durch den Einsatz von Leistungsschaltern

##### Bedienung des Kurzschlusschutzorgans:

Bei jedem zweiten Elektrounfall mit tödlichem Ausgang sind im internationalen Schnitt Schmelzsicherungen im Spiel. Zwar enden lange nicht alle Elektrounfälle tödlich, trotzdem ist aber dramatisch ersichtlich, dass das Hantieren mit diesem Schutzgerät kritisch und gefahrverbunden sein kann.

Die grösste Verletzungsgefahr besteht beim Einsetzen von Trennmessern und Schmelzsicherungen, wenn im Abgang ein Kurzschluss ist oder Kondensator-Batterien angeschlossen sind. Aber auch das Ausschalten unter Last bei Nennströmen über 100 A ist problematisch. Nationale Berufsverbände und

Unfallversicherungsanstalten legen daher grossen Wert auf die Einhaltung ihrer Bedienungsvorschriften, wie Schmelzsicherungen einzusetzen sind. Von Seiten der Sicherungshersteller wurde viel unternommen, die Schmelzsicherung sicherer zu gestalten.

Das Bedienen von Schmelzsicherungen, obwohl sie allen internationalen Vorschriften entsprechen, ist nur mit dem notwendigen Zubehör bezüglich maximalem Personenschutz vertretbar. Empfohlen oder sogar vorgeschrieben ist eine Schutzbekleidung, bestehend aus Griff mit Lederstulpe (oder Handschuhen bei Schraubsicherungen), Lederschürze und Gesichtsschirm als Schutz vor möglichen Lichtbogenauswirkungen beim Einsetzen der neuen Sicherungen. Natürlich ist der Nutzen gering, wenn das Material nicht oder falsch verwendet wird.

Solche Gefährdungen sind bei Leistungsschaltern dank unterschiedlicher Bauart und Funktionsprinzip nicht gegeben. Die Bedienung erfolgt immer ausserhalb des Gefahrenbereichs. Alle elektrisch aktiven Teile liegen geschützt innerhalb des Schaltergehäuses. Der Lichtbogen kann sich nicht unkontrolliert ausserhalb des Gerätes ausbreiten.

Für Leistungsschalter gibt es keine Forderungen nach Schutzbekleidung. Selbst nicht fachkundige, also nur unterwiesene Personen, z.B. das Bedienpersonal einer Anlage, dürfen sie schalten. Und das ist auch in offenen Anlagen ungefährlich wegen den konstruktiven Voraussetzungen für den Bau von Leistungsschaltern und für den Einbau in Anlagen. Es gibt auch keine besonderen Unfall-Verhütungsvorschriften der Unfall-Versicherer für den Umgang mit Leistungsschaltern.

### **Verhalten bei der Kurzschlussabschaltung:**

Die Gefahr bei den Schmelzsicherungen liegt nicht so sehr bei den hohen Kurzschlussströmen, wie sie bei einem direkten Leiterschluss auftreten, sondern in den langen Abschmelzzeiten, wie sie bei kleineren Kurzschlussströmen entstehen.

Da in der Regel alle Kurzschlüsse zu Lichtbogenkurzschlüssen ausarten, sind kleinere bis mittlere Kurzschlussströme weitaus häufiger. Die Ursache liegt im Widerstand des Lichtbogens selbst und den Leitungsimpedanzen begründet, welche eine starke Dämpfung des Kurzschlussstroms bewirken.

Die langen Löschzeiten und die thermische Aufladung der Sicherung begünstigt die Ausbildung des Lichtbogens und das gefährliche Ausblasen des heissen bis flüssigen Löschmittels Quarzsand.

Ein Leistungsschalter schaltet im Bereich der häufig (A) auftretenden Kurzschlussströme bedeutend schneller ab als eine Sicherung. Ein Kennlinienvergleich (Bild) soll dies verdeutlichen.

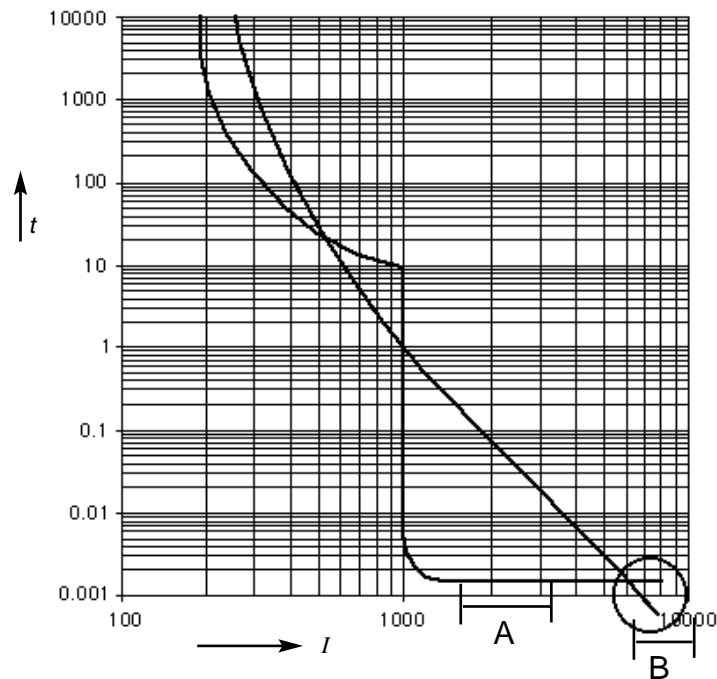


Fig. 4.3-1: Kennlinienvergleich Leistungsschalter / Schmelzsicherung. Mit steigendem Kurzschlussstrom wird die Auslösezeit der Schmelzsicherung kürzer (B) als die Eigenzeit des Leistungsschalters. Das physikalische Ausschaltprinzip der Schmelzsicherung bewirkt, dass sie hohe Ströme flinker abschaltet als der Leistungsschalter.

Die Sicherheit des Bedienpersonals wird durch den Einsatz von Leistungsschaltern verbessert, weil die Auswirkungen von Fehlern im Netz durch schnelles Abschalten auf ein Minimum begrenzt werden. Ein einfaches Drücken von Tasten, Drehen oder Umstellen eines Hebels genügt, um Einschalten, Trennen oder Rücksetzen des Schalters vorzunehmen.

### 4.3.2. Schnelle Wiedereinschaltbereitschaft

Die Anlagenstillstandszeit ist ein wichtiger Kostenfaktor. Zu bedenken ist die Zeit die verstreicht, um eine abgeschmolzene Sicherung in einer Schalttafel ausfindig zu machen, ihren Nennwert zu erkennen, den entsprechenden Ersatz aus einem erforderlichen Lager zu besorgen und die neue Schmelzsicherung mit Hilfe des vorschriftsgemässen Personen-Schutzmaterials, wie Gesichtsschutz und Handschuhe, wieder einzusetzen.

Schmelzsicherungen kennen nicht wie die Leistungsschalter eine klare Zustandssignalisation ein, aus oder ausgelöst. Nur schon ihre Lokalisierung ist im Vergleich zum Leistungsschalter aufwendiger.

Leistungsschalter sind nach einer Ausschaltung durch Überlast und der Gewährung einer kurzen Abkühlzeit sofort wieder einschaltbereit und können ihre Aufgaben erneut vollständig übernehmen, ohne Veränderung oder Reduktion der Schutzfunktionen. Dies gilt auch nach einer Kurzschlussabschaltung.

### 4.3.3. Allpoliges Schalten

In den meisten Fällen ist ein Verbraucher allpolig geschaltet. Schütze, Last- oder Leistungsschalter erfüllen diese Anforderung, nur die Schmelzsicherung nicht. Alle drei Schmelzsicherungen brennen nur im Ausnahmefall gleichzeitig durch. Der kritische Einphasenlauf von Drehstrommotoren kann durch Schutz mit Leistungsschaltern verhindert werden.

Beispiel an Hebezeugen (z.B. Turmdrehkran) mit Schmelzsicherungen als Schutz von Antriebsmotoren. Nach Ausfall einer Sicherung können einphasig drehende Motoren nicht reversiert werden (gegenstrombremsen). Die angetriebene Last kann unkontrolliert in Sicherheits-Begrenzungen gleiten. Bei Leistungsschaltern ist diese Sicherheit gegeben. Ein Verbraucher wird stets allpolig abgeschaltet. Der Einphasenlauf ist unmöglich.

Oft ist in Verteilungen das allpolige Ausschalten nicht erwünscht (Redundanz z.B. bei Strassenbeleuchtungen). Hier müssen einpolige Leistungs- oder Leitungsschutzschalter eingesetzt werden.

### 4.3.4. Alterungsfrei

Schmelzsicherungen (Typ gG) verändern ab 15 % Überstrom, also bei jedem Motoranlauf oder Überlast, ihre Kennlinie. Dieser Vorgang wird Alterung genannt.

#### **Alterung:**

Ein Motor mit 30 A Nennstrom, abgesichert durch eine 63 A Schmelzsicherung, habe in einem Rechenbeispiel einen Anlaufstrom von 150 A. Die Schmelzsicherung ist nach oben genanntem Faktor jedoch nur bis 72 A alterungsfrei. Sie wird bei jedem Start mit doppeltem Strom belastet. Die Alterung passiert in der Legierungsstrecke. Bei jeder Überlastung entsteht dort Wärme und die Moleküle der aufgetragenen Legierung diffundieren in den Schmelzleiter, dessen Widerstand steigt damit. Es entsteht beim nächsten Start mehr Wärme, der Prozess wird immer rascher.

Die geschwächte Schmelzsicherung wird willkürlich während einem Motoranlauf ausfallen. Der Motor bleibt einphasig weiter am Netz, kann nicht mehr gebremst und muss vom Motorschutzgerät vor unzulässiger Überhitzung geschützt werden.

Kritisch ist ebenfalls geringe, lang anstehende Überlast:

Der Laststrom während dem Betrieb der Sicherung erwärmt das Schmelzband auf eine relativ hohe Temperatur. Wird eine Sicherung während längerer Zeit mit ihrem Bemessungsnennstrom belastet, so ist der Schmelzleiter sehr heiss und der den Schmelzleiter umgebenden Quarzsand kann mit diesem verschmelzen. Der Quarzsand der Sicherung ist das eigentliche Löschmittel, wie die Löschkammer beim Leistungsschalter. Unmittelbar um den Schmelzleiter ist nun die Sandfüllung nach einiger Zeit nicht mehr locker. Wird eine solche Sicherung einem Kurzschluss ausgesetzt, ist die Kühlwirkung des Sandes nicht mehr vorhanden. Der Lichtbogen, der in der Sicherung entsteht, wird nicht mehr in genügend kurzer Zeit gelöscht und die Sicherung kann explodieren.

Aus diesem Grund wird empfohlen, Schmelzsicherungen nicht über 75...80 % ihres Nennstromes dauernd zu belasten. Gelegentlich wird sogar empfohlen, Sicherungen von Zeit zu Zeit auszuwechseln.

Dauernder Betrieb bei Nennlast und häufige Starts haben keinen negativen Einfluss auf den Leistungsschalter. Er verhält sich in diesem Sinn alterungsfrei.

### **4.3.5. Reduktion von Leiterquerschnitten**

Eine Motorzuleitung ist nach dem Nennstrom ihres vorgeschalteten Überlastschutzorgans zu dimensionieren. Bei der Wahl einer Schmelzsicherung als Überlastschutzorgan, ist diese grösser als der Motornennstrom zu wählen (keine Ausschaltung bei Motoranlauf). Der lediglich auf den Motornennstrom eingestellte Leistungsschalter erlaubt demnach einen geringeren Leiterquerschnitt als die Schmelzsicherung.

Je nach nationalem Standard lassen Leistungsschalter eine höhere Leiterbelastung zu als üblich für Schmelzsicherungen. Die Bimetallauslöser schalten bereits eine geringe Überlast rasch ab. Ein Leiter darf daher bis an seine Grenzbelastbarkeit ausgenutzt werden. Bei Schmelzsicherungen ist stets ein Sicherheitsfaktor mit einzuhalten, da Schmelzsicherungen gemäss Definition Überströme erst im Bereich des 1.6fachen Nennstromes innerhalb 1 Stunde ausschalten müssen, Leistungsschalter ab dem 1.2fachen Skaleneinstellwert (IEC 364-4-43 Schutz von Leitungen und Kabeln gegen zu hohe Erwärmung).

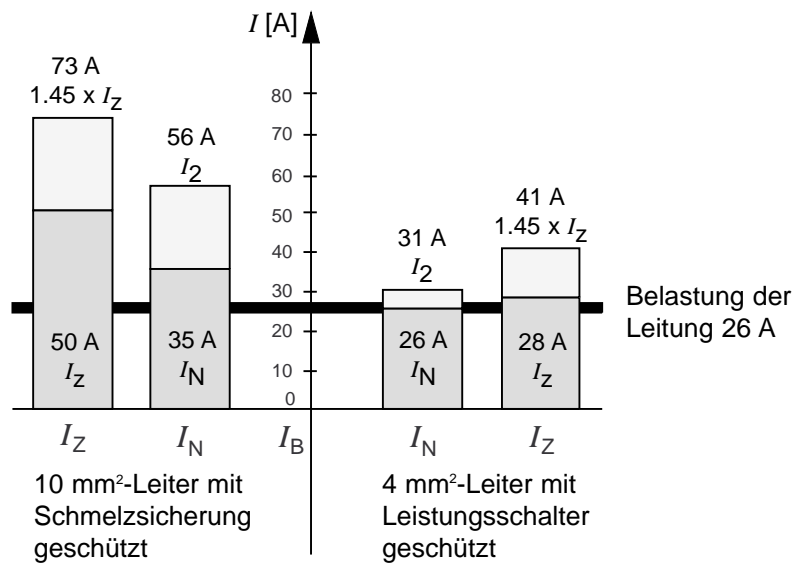


Fig. 4.3-2: Ausnutzbarkeit eines Kupferleiters nach IEC 364-4-43  
Graphische Darstellung der Gleichungen

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I_Z$$

Dabei sind:  $I_B$  " der zu erwartende Betriebsstrom  
 $I_Z$  " Strombelastbarkeit der Leitung oder des Kabels  
 $I_N$  " Nennstrom des Schutzorgans  
 $I_2$  " grosse Prüfstrom

Der schwarze dicke Balken zeigt die gewünschte zu übertragende Nutzlast. Wird als Kurzschlusschutzorgan eine Schmelzsicherung eingesetzt, muss der Nennwert der Sicherung min. 35 A betragen. Da der grosse Prüfstrom  $I_2$  (56 A) des Schutzorgans unter der 1.45fachen Strombelastbarkeit des Leiters (73 A) liegen soll, muss ein 10 mm<sup>2</sup>-Kupferleiter installiert werden. Ein Leistungsschalter hingegen lässt sich auf den effektiven Betriebsstrom einstellen und löst bei Überlast flinker aus. Dieser angepasste Schutz führt in diesem Fall zu einem reduzierten 4 mm<sup>2</sup>-Leiter.

Die Bedingung  $I_2 \leq 1.45 \times I_Z$  vorallem kann bei Schmelzsicherungen zu Überraschungen führen. Ein erhöhter Leiterquerschnitt ist oft die Folge daraus.

## Ein Beispiel erläutert die verknüpfte Sachlage:

Dimensionierung für eine 4 mm<sup>2</sup>-Mehradraderleitung. Nach Tabelle “Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit  $I_Z$  und die Zuordnung von Überstromschutzeinrichtungen zum Schutz bei Überlast (IEC 364-4-43)” beträgt für die genannte Kupferleitung die Strombelastbarkeit  $I_Z = 28$  A (Verlegungsart B2, Mehradrige Leitung im Elektroinstallationskanal auf der Wand oder auf dem Fussboden, 3 belastete Adern). Der zu erwartende Betriebsstrom einer Last sei bei 26 A festgelegt. Ein Teil der Gleichung

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

ist damit bereits gegeben.

$$26 \text{ A} \leq \dots \leq 28 \text{ A}$$

Der zu erwartende Betriebsstrom liegt unter der zulässigen Strombelastbarkeit der Leitung. Soweit wäre die Dimensionierung korrekt.

Tabelle Fig. 4.3-3: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit  $I_Z$  und die Zuordnung von Überstromschutzeinrichtungen zum Schutz bei Überlast (IEC 364-4-43) Verlegungsart B2, Mehradrige Leitung im Elektroinstallationskanal auf der Wand oder auf dem Fussboden, 3 belastete Adern, Kupfer, Umgebungstemperatur 25 °C).

Nennquerschnitt	Strombelastbarkeit $I_Z$	Schmelzsicherungs-Nennstrom
[mm <sup>2</sup> ]	[A]	[A]
1.5	15	10
2.5	20	20
4	28	25
6	35	35
10	50	50
16	65	63
25	82	80
35	101	100
50	-	125

Die Schmelzsicherungen Typ gG als Überlastschutz sind in diesem Strombereich in die Nennstromabstufungen 25 A, 35 A und 50 A aufgeteilt. Keine Sicherungsgrösse hat aber den Nennwert kleiner als die Strombelastbarkeit des Leiters von 28 A und grösser als der Betriebsstrom von 26 A.

Ein grösserer Nennquerschnitt muss verlegt werden.

Nächstmöglicher Nennquerschnitt  $6 \text{ mm}^2$ , Strombelastbarkeit  $I_Z = 35 \text{ A}$ . Für dieses Kabel kommt nun die  $35 \text{ A}$  Sicherung als Überlastschutz in Frage.

Jetzt ist die Bedingung

$$I_2 \leq 1.45 \times I_Z$$

zu überprüfen.

Der grosse Prüfstrom  $I_2$  der Sicherung liegt beim 1.6fachen des Schutzorgannennstroms, also bei  $56 \text{ A}$ . Das 1.45fache der Leiterbelastbarkeit beträgt  $51 \text{ A}$ . Für die  $35 \text{ A}$ -Sicherung würde dies bedeuten,

$$56 \text{ A} \leq 51 \text{ A}$$

was falsch ist.

Weiter muss der Leiterquerschnitt eine Stufe höher gewählt werden,  $10 \text{ mm}^2$  in diesem Fall, Strombelastbarkeit  $I_Z = 50 \text{ A}$ .

Erneute Überprüfung :  $56 \text{ A} \leq 1.45 \times 50 \text{ A} = 73 \text{ A}$

Resultat:

Das installierte Kabel,  $10 \text{ mm}^2$ ,  $35 \text{ A}$  Schmelzsicherung,  $26 \text{ A}$  Laststrom, wird nur zu  $52 \%$  ausgelastet.

Leistungsschalter reduzieren die Installationskosten, da sie auf den Nenn-Betriebstrom eingestellt werden. Der grosse Prüfstrom  $I_2$  liegt beim 1.2fachen des Skalenwertes. Die Bedingung, dass der grosse Prüfstrom nicht höher als das 1.45fache der Leiterbelastbarkeit liegen darf, ist automatisch erfüllt, wird der Leiterquerschnitt nach dem zu erwartenden Betriebsstrom ausgelegt ( $1.2 \times I_Z < 1.45 \times I_Z$ ).

Im beschriebenen Beispiel bedeutet dies, dass die Einstellung des Leistungsschalters, bei einer Last von  $26 \text{ A}$  und der Strombelastbarkeit von  $28 \text{ A}$  eines  $4 \text{ mm}^2$ -Leiters, gerade  $26 \text{ A}$  betragen darf (Ausnutzungsgrad  $93 \%$ , ohne Überschreitung der zulässigen Leitertemperatur).

Die Bedingung  $26 \text{ A} \leq 26 \text{ A} \leq 28 \text{ A}$  ist erfüllt.

Ein weiteres Beispiel:

Um z.B. einen Motornennstrom von  $80 \text{ A}$  dauernd führen zu können und einen normalen Anlauf zu ermöglichen, muss eine Schmelzsicherung von  $125 \text{ A}$  gewählt werden. Für den Leiterquerschnitt bedeutet dies  $50 \text{ mm}^2$ . Wird an Stelle der Schmelzsicherung ein Leistungsschalter mit einstellbaren thermischen Auslösern eingesetzt, kann ein Leiterquerschnitt von  $25 \text{ mm}^2$  verwendet werden (Strombelastbarkeit  $I_Z$  nach IEC 364-4-43, Mehraderleitungen in Elektroinstallationskanal,  $25 \text{ °C}$  Umgebungstemperatur).

### 4.3.6. Vereinfachte Anlagenplanung

Der Leistungsschalter ist das moderne Bauelement. Die kompakten Schaltergehäuse lassen sich steckbar, schraub- oder rastbar im Anlagenschrank befestigen. Die Anschlüsse sind meist bereits vor zufälliger Berührung geschützt oder erfüllen die Anforderungen an Fingersicherheit im Bedienbereich und bedürfen keiner weiteren Schutzisolation gegen direktes Berühren mehr.

Wegen der kurzen Abschaltzeit kann die Feldschottung gegen wandernde Störlichtbögen mit geringem Aufwand ausgeführt werden. Auch lässt er sich gut bedienen durch an der Aussenseite des Anlagenschrankes montierte Türkupplung oder eines aufgebauten Drehantriebs.

### 4.3.7. Kostenverminderung im Anlagenbau und Betrieb

#### Anlagenkosten für Signalisation

Mit steigendem Automationsgrad werden höhere Anforderungen an den Leistungsabgang bezüglich Zustandsignalisation gestellt. Um die Integration des Abgangs in den Informationsfluss der Anlagensteuerung zu bewerkstelligen, werden Meldehilfsschalter benötigt (Ein, Aus, Überlast, Kurzschluss). Diese Information lässt sich mit dem entsprechenden Hilfsschalter leicht aus dem Leistungsschalter abrufen. Schmelzsicherungen benötigen dazu aufwendige Überwachungselektronik oder parallelgeschaltete, nennstromkleine Leistungsschalter mit Auslösemeldekontakten.

#### Anlagekosten für Fernschaltung

Leistungsschalter lassen sich gegebenenfalls durch Zusatzeinrichtungen (Magnet- oder Motorantriebe) von fern ein- und ausschalten. Anwendungen wo keine hohe Schalzhäufigkeit (wenige Schaltungen pro Tag) oder wo verlinkte Schütze verlangt werden, kann der ferngesteuerte Leistungsschalter mit Motorantrieb Schmelzsicherung und Schütz ersetzen.

Leistungsschalter mit Fernantrieb lassen sich zudem nach einer Abschaltung von der Wartstelle aus wieder einschalten.

#### Anlagenkosten für Feldschottung

Kurzschlusslichtbögen von z.B. 10 kA Höhe zwischen zwei blanken Kupferstromschienen wandern mit einer Geschwindigkeit von  $\sim 50$  m/s (180 km/h). Um weitreichende Zerstörungen zu verhindern, werden Feldschottungen angebracht, welche die Störlichtbögen am Wandern hindern sollen. Diese Schottung muss präzise ausgeführt sein, will verhindert werden, dass der Lichtbogenfußpunkt durch schmale Ritzen dringt und jenseits der Schottung eine Neuzündung des Lichtbogens bewirken kann. Aufwendige Schottungen fallen bei der Anlagenkalkulation ins Gewicht.

Schnelle Leistungsschalter löschen mittlere und geringe Kurzschlussströme schneller als die Schmelzsicherung. In den wenigen Millisekunden Ausschaltzeit kann der Lichtbogen nur einige Zentimeter weit laufen. Die Zerstörung wird örtlich beschränkt, eine Feldschottung kann reduziert ausgeführt werden.

## **Kosten für den Anlagenbetrieb**

Kostenmässig kann ein Leistungsschalter mit einem Schmelzsicherungshalter inklusive einem Satz Sicherungseinsätze nicht verglichen werden. Der Leistungsschalter muss nach dem Abschalten einer Überlast oder eines Kurzschlusses nicht zwingend ausgewechselt werden, vorausgesetzt, er wurde entsprechend dimensioniert.

Die Anzahl der Sicherungseinsätze über eine gewisse Betriebsdauer betrachtet, beeinflusst die Kalkulation. In manchen prozesstechnisch empfindlichen Anlagen, wo unkontrollierte Schmelzsicherungsausfälle unzulässig sind und mit grossem Aufwand sämtliche Schmelzsicherungen beim Revisionstermin ausgewechselt werden, steigt der Kostenvorteil auf die Seite der Leistungsschalter.

Die Kostenrechnung für den Bau und Betrieb einer Anlage muss ganzheitlich durchgeführt werden. Schmelzsicherung-Leistungsschaltervergleiche können nicht aus der Sicht des Anlagenbaus allein, mit lediglich einem Satz Sicherungspatronen, durchgeführt werden. Ebenfalls dürfen Platzeinsparungen und verbesserte Anschlusshandlichkeit der Leistungsschalter in die Kalkulation miteinbezogen werden.

## **Stillstandskosten**

Bei der Planung einer Anlage wird auf die Wartungsfreundlichkeit, die Zugänglichkeit der Anlage und die Anordnung in Bezug auf die zu versorgenden Verbraucher viel Wert gelegt und entsprechend diskutiert. Vergessen werden gern die wiederkehrenden Kosten, d.h. den Aufwand um Schutzorgane rückzusetzen oder auszuwechseln.

Ein Zeitvergleich Leistungsschalter / Schmelzsicherung fällt positiv für den Leistungsschalter-Abgang aus, insbesondere dann, wenn die vorschriftsgemässe Benutzung von Schutzbekleidung beim Ersetzen von grossen NH-Sicherungen zugerechnet wird.

### **Leistungsschalter**

- Fehler beheben
- einschalten

### **Schmelzsicherung**

- Fehler beheben
- Sicherungsgrösse feststellen
- Sicherung holen
- Sicherung auswechseln
- einschalten

## Leistungsschalter

---

**Sie finden uns im Internet unter [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)**

Rockwell Automation ist weltweit für Sie da und vereint führende Marken der industriellen Automation. Wir bieten Ihnen Steuerungen von Allen-Bradley, Antriebskomponenten von Reliance Electric, mechanische Antriebselemente von Dodge sowie Software-Produkte von Rockwell Software. Rockwell Automation sichert Ihren Wettbewerbsvorteil durch Flexibilität und mit der Unterstützung von zahlreichen autorisierten Partnern, Distributoren und Systemintegratoren weltweit.

**Weltweite Hauptverwaltung**, 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204, USA, Tel: (1) 414 382-2000, Fax: (1) 414 382-4444  
**Hauptverwaltung Europa**, 48, avenue Hermann Debroux, 1180 Brüssel, Belgien, Tel: (32) 2 663 06 00, Fax: (32) 2 663 06 40  
**Hauptverwaltung Deutschland**, Düsselberger Straße 15, 42781 Haan-Gruiten, Tel: (49) 2104 9600, Fax: (49) 2104 960121  
**Verkaufs- und Supportzentrum Schweiz**, Gewerbepark, 5506 Mägenwil, Tel: (41) 62 889 77 77, Fax: (41) 62 889 77 86  
**Hauptverwaltung Österreich**, Backsmühlweg 1, 4030 Linz, Tel: (43) (732) 38 909 0, Fax: (43) (732) 38 909 61

