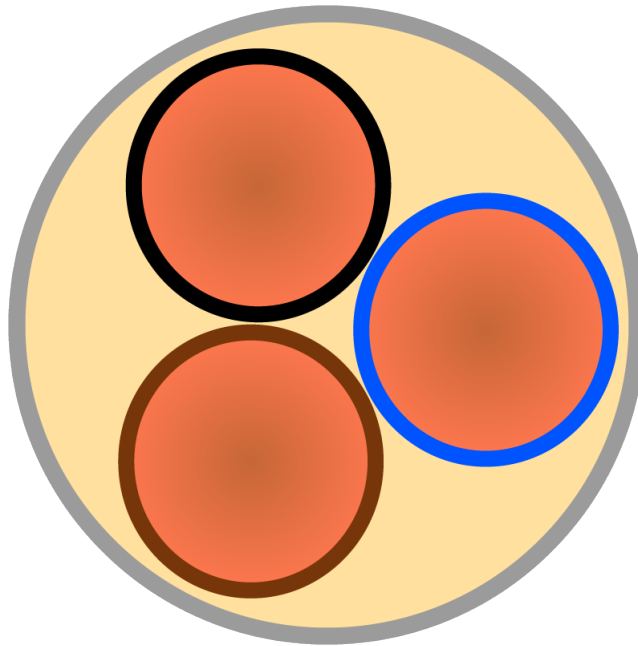


# LEITUNGSBERECHNUNG

Version 4.0



©Marcell Kalsen-Frieze 2017

Besuchen Sie auch die Webseite zum Dokument! Dort finden Sie News rund ums Thema Leitungsberechnung und vieles mehr!



<https://www.dieleitungsberechnung.de>

Sollten Sie Fehler in dem Dokument finden oder Verbesserungsvorschläge haben:

<mailto:support@dieleitungsberechnung.de>

<https://github.com/trekmann/Leitungsberechnung>

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
<b>I. Schnellauswahl einer Leitung, ohne aufwändige Berechnung im Alltag</b>	<b>1</b>
<b>1. Schnellauswahl einer Leitung in der Praxis</b>	<b>2</b>
1.1. Wie benutze ich die Tabellen? . . . . .	2
1.2. Auswahl nach der Belastbarkeit . . . . .	3
1.3. Auswahl nach dem Spannungsfall . . . . .	3
1.3.1. Leitungslängen zu Verbrauchern . . . . .	3
1.3.2. Leitungslängen zu Unterverteilungen . . . . .	5
<b>II. Ausführliche Dimensionierung einer Leitung</b>	<b>6</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1. Rechtliche Grundlagen / Haftungsausschluss . . . . .	7
2.2. Grundlagen Leitungsschutzschalter (LSS) . . . . .	8
2.2.1. Funktionsweise . . . . .	9
2.2.2. Zeit-Strom-Diagramm . . . . .	12
2.2.3. Verwendung des Zeit-Strom-Diagramms . . . . .	14
2.3. Grundlagen Schmelzsicherungen . . . . .	14
2.3.1. Funktionsweise . . . . .	14
2.3.2. Zeit-Strom-Diagramm . . . . .	15
2.3.3. Verwendung des Zeit-Strom-Diagramms . . . . .	17
2.4. Grundlagen der Energieversorgungsnetze . . . . .	18
2.4.1. Abschaltzeiten im öffentlichen Versorgungsnetz . . . . .	18
2.5. Idealisierte Berechnungen . . . . .	18

<b>3. Auswahl der Sicherung</b>	<b>20</b>
3.1. Ermittlung des Betriebsstroms des Gerätes . . . . .	20
3.1.1. Beispiel für die Ermittlung des Betriebsstroms . . . . .	20
3.1.1.1. Beispiel für einen Drehstromasynchronmotor . . . . .	21
3.1.1.2. Beispiel für einen normalen Verbraucher . . . . .	21
3.2. Auswahl der Sicherung . . . . .	22
3.2.1. Beispiel für ein Stromkreis mit ohmschen Verbrauchern, Glühlampen . .	23
3.2.2. Beispiel für einen Stromkreis mit einem Motor . . . . .	23
3.3. Selektivität bei der Auswahl von Sicherungen . . . . .	24
<b>4. Überstromschutz von Kabel und Leitungen</b>	<b>26</b>
4.1. Welcher Strom wird in der Berechnung verwendet? . . . . .	26
4.1.1. Anschluss eines Motors in der Industrie . . . . .	26
4.1.2. Anschluss allgemeiner Geräte in der Industrie . . . . .	27
4.1.3. Anschluss von Geräten (Motor, allgemeine Geräte) in Privathaushalten .	27
4.1.3.1. Herdzuleitung . . . . .	28
4.2. Ermittlung der Mindeststrombelastbarkeit von Kabel und Leitungen . . . . .	28
4.2.1. Belastbarkeit von Kabel und Leitungen . . . . .	29
4.2.2. Faktor der Häufung $f(H)$ . . . . .	30
4.2.3. Faktor der Temperatur Erhöhung/Erniedrigung $f(T)$ . . . . .	32
4.2.4. Beispiele für Ermittlung der Mindeststrombelastbarkeit von Kabel und Leitungen . . . . .	33
4.2.4.1. Beispiel für eine Herdzuleitung . . . . .	33
4.2.4.2. Beispiel für eine Zuleitung einer Waschmaschine . . . . .	34
4.2.4.3. Beispiel für eine Zuleitung zu einem Motor . . . . .	34
4.3. Auswahl der Kabel und Leitungen nach VDE 0100 Teil 430 . . . . .	35
4.3.1. Erste Bedingung nach VDE 0100 Teil 430 . . . . .	35
4.3.1.1. Beispiel für eine Herdzuleitung . . . . .	35
4.3.1.2. Beispiel für eine Waschmaschine . . . . .	36
4.3.1.3. Beispiel für einen Motor . . . . .	37
4.3.2. Zweite Bedingung nach VDE 0100 Teil 430 . . . . .	38
<b>5. Kurzschlusschutz von Kabel und Leitungen</b>	<b>39</b>
5.1. Zulässige Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 430 . . . . .	39
5.2. Ermittlung des Widerstandes der Leiterschleife und des Kurzschlussstromes . .	40
5.2.1. Ermittlung des Widerstandes der Leiterschleife . . . . .	40
5.2.1.1. Beispiel für eine Herdzuleitung . . . . .	41
5.2.1.2. Beispiel für eine Motorzuleitung . . . . .	42

5.2.2.	Ermittlung des Kurzschlussstromes, der auf der Leitung zum fließen kommt	42
5.2.2.1.	Beispiel für die Ermittlung des Kurzschlussstromes bei einer Herdzuleitung . . . . .	42
5.2.2.2.	Beispiel für die Ermittlung des Kurzschlussstromes bei einer Motorzuleitung . . . . .	43
5.3.	Abschaltzeit der Sicherung, Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 410 . . . . .	43
5.3.1.	Abschaltzeit eines Leitungsschutzschalters . . . . .	43
5.3.2.	Abschaltzeit einer Schmelzsicherung des Typs gLgG . . . . .	44
5.4.	Bedingungen nach VDE 0100 Teil 430 . . . . .	45
5.4.1.	Beispiel für eine Herdzuleitung . . . . .	45
5.4.2.	Beispiel für eine Motorzuleitung . . . . .	46
<b>6.</b>	<b>Spannungsfall</b>	<b>47</b>
6.1.	Grundlagen zum Spannungsfall . . . . .	47
6.2.	Grenzwerte und gesetzliche Bestimmungen . . . . .	47
6.2.1.	Grenzwerte nach DIN 18015 Teil 1 . . . . .	47
6.2.2.	TAB . . . . .	48
6.2.3.	VDE 0100 Teil 520 . . . . .	48
6.3.	Formelsammlung . . . . .	48
6.3.1.	Formel für Wechselstromverbraucher . . . . .	49
6.3.2.	Formeln für Drehstromverbraucher . . . . .	49
6.3.3.	Beispiele zur Berechnung des Spannungsfalls . . . . .	50
6.3.3.1.	Beispiel für eine Herdzuleitung . . . . .	50
6.3.3.2.	Beispiel für eine Motorzuleitung . . . . .	50
6.4.	Spannungsfall für dein Handy . . . . .	51
<b>7.</b>	<b>Komplettbeispiele zur Leitungsberechnung</b>	<b>52</b>
7.1.	Beispiel für eine Motorzuleitung . . . . .	52
7.1.1.	Auswahl der Sicherung . . . . .	52
7.1.2.	Überstromschutz . . . . .	53
7.1.3.	Kurzschlusschutz . . . . .	53
7.1.4.	Spannungsfall . . . . .	55
7.1.5.	Abschlussbetrachtung . . . . .	55
7.2.	Beispiel für die Zuleitung zu einem Herd . . . . .	55
7.2.1.	Auswahl der Sicherung . . . . .	55
7.2.2.	Überstromschutz . . . . .	56
7.2.3.	Kurzschlusschutz . . . . .	57
7.2.4.	Spannungsfall . . . . .	58
7.2.5.	Abschlussbetrachtung . . . . .	58

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>III. Anhang</b>	<b>i</b>
<b>A. Versionen</b>	<b>ii</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Leitungsschutzschalter Typ B16 A (von [1]) . . . . .	8
2.2. Thermischer Auslöser . . . . .	10
2.3. magnetischer Auslöser . . . . .	11
2.4. Zeit-Strom-Diagramm für Leitungsschutzschalter (von [1]) . . . . .	13
2.5. Ablesen des Zeit-Strom-Diagramm eines LSS (Diagramm von [1]) . . . . .	15
2.6. Zeit-Strom-Diagramm Schmelzsicherung (von [1]) . . . . .	16
2.7. Ablesen des Zeit-Strom-Diagramm einer Schmelzsicherung (Diagramm von [1]) .	17
3.1. Selektivität bei Schmelzsicherungen (von [1]) . . . . .	25
5.1. Ermittlung der Abschaltzeit (von [1]) . . . . .	44

# Tabellenverzeichnis

1.1. Absicherungen ohne Häufung . . . . .	3
1.2. Absicherungen mit Häufung . . . . .	4
1.3. Leitungslängen bei Wechselstrom . . . . .	4
1.4. Leitungslängen bei Drehstrom . . . . .	5
1.5. Leitungslängen zu Unterverteilungen . . . . .	5
2.1. Abschaltzeiten der Leitungsschutzschalter-Charakteristiken . . . . .	12
2.2. Prüfströme der Leitungsschutzschalter . . . . .	12
2.3. Abschaltzeiten . . . . .	18
3.1. Ansprechen der Leitungsschutzschalter . . . . .	23
4.1. Belastbarkeit von Kabel und Leitungen aus Kupfer bei 30°C . . . . .	29
4.2. Belastbarkeit von Kabel und Leitungen auf Kupfer in der Erde . . . . .	30
4.3. Häufung . . . . .	31
4.4. Umrechnungsfaktoren der Temperatur . . . . .	32
5.1. k Koeffizient . . . . .	40
6.1. Spannungsfall nach TAB . . . . .	48

## Teil I.

Schnellauswahl einer Leitung, ohne  
aufwändige Berechnung im Alltag



# 1. Schnellauswahl einer Leitung in der Praxis

In der Praxis ist es oft nicht möglich langwierige Berechnungen durch zu führen. Daher möchte ich Standard Tabellen zeigen, damit einfacher Leitungsquerschnitte ermittelt werden können. Allerdings ist es wichtig, dass bei der Ermittlung immer die Randbedingungen beachtet werden!

## 1.1. Wie benutze ich die Tabellen?

Die Benutzung der Tabellen ist vergleichsweise einfach, im Gegensatz zu den aufwändigeren Berechnungen. Es gibt hier nur zwei Schritte die zu erledigen sind. Zu beachten ist, dass WS hierbei für Wechselstrom und DS für Drehstrom steht. Aus Platzgründen mussten die Abkürzungen gewählt werden.

- **Schritt 1:** In dem Schritt ermitteln wir den Querschnitt zur eingebauten Sicherung. Dieses machen wir mit den Tabellen in Kapitel 1.2. Wir schauen bei der jeweiligen Verlegeart und suchen die Sicherung. An der linken Seite steht nun der zu Verlegende Querschnitt.
- **Schritt 2:** In Kapitel 1.3 können Sie mit dem ermittelten Querschnitt und der Sicherung die Länge der Leitung ermitteln. Nun wissen Sie sofort welchen Querschnitt Sie verlegen müssen und welche Länge die Leitung haben darf.

Achtung, da diese Berechnungen sich auf viele Randbedingungen verlassen ist eine Verifikation vor Ort unbedingt notwendig. Besonders wichtig ist hierbei die Berechnung des Kurzschluss-schutzes. Die gesamten Tabellen gelten für Kabel und Leitungen aus Kupfer.

## 1.2. Auswahl nach der Belastbarkeit

Die Tabellen 1.1 und 1.2 zeigen die maximal mögliche Absicherung eines Querschnittes bei der jeweiligen Verlegeart. Hierbei sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Temperatur 30°C
- Keine Häufung von anderen Leitungen

Tabelle 1.1.: Absicherungen ohne Häufung

Verlegeart	Mehradraderleitung in Rohr in Wärmegeädämter Wand		Mehradraderleitung in Rohr auf der Wand		Ein-mehradriges Kabel direkt auf der Wand	
Versorgungsart Querschnitt	WS	DS	WS	DS	WS	DS
1,5 mm <sup>2</sup>	13 A	13 A	16 A	13 A	16 A	16 A
2,5 mm <sup>2</sup>	16 A	16 A	20 A	20 A	25 A	20 A
4 mm <sup>2</sup>	25 A	20 A	25 A	25 A	32 A	32 A
6 mm <sup>2</sup>	32 A	25 A	32 A	32 A	32 A	32 A
10 mm <sup>2</sup>	32 A	32 A	50 A	32 A	63 A	50 A
16 mm <sup>2</sup>	50 A	50 A	63 A	50 A	80 A	63 A
25 mm <sup>2</sup>	80 A	63 A	80 A	80 A	100 A	80 A
35 mm <sup>2</sup>	80 A	80 A	100 A	80 A	125 A	100 A

- Temperatur 30°C
- Mit Häufung von anderen Leitungen

## 1.3. Auswahl nach dem Spannungsfall

### 1.3.1. Leitungslängen zu Verbrauchern

Die erste Tabelle 1.3 zeigt die maximal erlaubten Längen bei einem normalen Wechselstromverbraucher mit einer Spannung von  $U = 230 \text{ V}$ . Hierbei sind die Leitungen direkt zur Hauptverteilung verlegt, da hier mit einem Spannungsfall von  $\Delta u = 3\%$  gerechnet wurde. Ebenfalls sind ohmsche Verbraucher angeschlossen.

Tabelle 1.2.: Absicherungen mit Häufung

Verlegeart	Mehradraderleitung in Rohr in Wärmegeädämter Wand		Mehradraderleitung in Rohr auf der Wand		Ein-mehradriges Kabel direkt auf der Wand	
<u>Versorgungsart</u> <u>Querschnitt</u>	WS	DS	WS	DS	WS	DS
1,5 mm <sup>2</sup>	6 A	6 A	10 A	6 A	10 A	10 A
2,5 mm <sup>2</sup>	10 A	10 A	13 A	13 A	16 A	13 A
4 mm <sup>2</sup>	16 A	13 A	16 A	16 A	20 A	20 A
6 mm <sup>2</sup>	20 A	16 A	20 A	20 A	20 A	20 A
10 mm <sup>2</sup>	20 A	20 A	32 A	20 A	32 A	32 A
16 mm <sup>2</sup>	32 A	32 A	32 A	32 A	50 A	32 A
25 mm <sup>2</sup>	50 A	32 A	50 A	50 A	63 A	50 A
35 mm <sup>2</sup>	50 A	50 A	63 A	50 A	80 A	63 A

Tabelle 1.3.: Leitungslängen bei Wechselstrom

<u>Querschnitt</u> <u>Sicherungsgröße</u>	1,5 mm <sup>2</sup>	2,5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>	16 mm <sup>2</sup>	25 mm <sup>2</sup>
10 A	29,0 m	48,3 m	77,3 m	115,9 m	193,2 m	309,1 m	483,0 m
16 A	18,1 m	30,2 m	48,3 m	72,5 m	120,8 m	193,2 m	301,9 m
20 A	14,5 m	24,2 m	38,6 m	58,0 m	96,6 m	154,6 m	241,5 m
25 A	11,6 m	19,3 m	30,9 m	46,4 m	77,3 m	123,6 m	193,2 m
32 A	9,1 m	15,1 m	24,2 m	36,2 m	60,4 m	96,6 m	150,9 m
35 A	8,3 m	13,8 m	22,1 m	33,1 m	55,2 m	88,3 m	138,0 m
50 A	5,8 m	9,7 m	15,5 m	23,2 m	38,6 m	61,8 m	96,6 m
63 A	4,6 m	7,7 m	12,3 m	18,4 m	30,7 m	49,1 m	76,7 m

Die zweite Tabelle 1.4 zeigt die maximal erlaubten Längen bei einem normalen Drehstromverbraucher mit einer Spannung von  $U = 400 \text{ V}$ . Hierbei sind die Leitungen direkt zur Hauptverteilung verlegt, da hier mit einem Spannungsfall von  $\Delta u = 3 \%$  gerechnet wurde. Ebenfalls sind ohmsche Verbraucher angeschlossen.

Tabelle 1.4.: Leitungslängen bei Drehstrom

Querschnitt Sicherungsgröße	1,5 mm <sup>2</sup>	2,5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>	16 mm <sup>2</sup>	25 mm <sup>2</sup>
10 A	58,2 m	97,0 m	155,2 m	232,8 m	388,0 m	620,8 m	969,9 m
16 A	36,4 m	60,6 m	97,0 m	145,5 m	242,5 m	388,0 m	606,2 m
20 A	29,1 m	48,5 m	77,6 m	116,4 m	194,0 m	310,4 m	485,0 m
25 A	23,3 m	38,8 m	62,1 m	93,1 m	155,2 m	248,3 m	388,0 m
32 A	18,2 m	30,3 m	48,5 m	72,7 m	121,2 m	194,0 m	303,1 m
35 A	16,6 m	27,7 m	44,3 m	66,5 m	110,9 m	177,4 m	277,1 m
50 A	11,6 m	19,4 m	31,0 mm	46,6 m	77,6 m	124,2 m	194,0 m
63 A	9,2 m	15,4 m	24,6 m	37,0 m	61,6 m	98,5 m	154,0 m

### 1.3.2. Leitungslängen zu Unterverteilungen

Wichtig sind auch die Leitungslängen zu Unterverteilungen. Hierbei ist zu beachten, dass hier nur ein geringer Teil des gesamten Spannungsfalls abfallen darf.

Tabelle 1.5.: Leitungslängen zu Unterverteilungen

Querschnitt Sicherungsgröße	1,5 mm <sup>2</sup>	2,5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>	16 mm <sup>2</sup>	25 mm <sup>2</sup>
10 A	19,4 m	32,3 m	51,7 m	77,6 m	129,3 m	206,9 m	323,3 m
16 A	12,1 m	20,2 m	32,3 m	48,5 m	80,8 m	129,3 m	202,1 m
20 A	9,7 m	16,2 m	25,9 m	38,8 m	64,7 m	103,5 m	161,7 m
25 A	7,8 m	12,9 m	20,7 m	31,0 m	51,7 m	82,8 m	129,3 m
32 A	6,1 m	10,1 m	16,2 m	24,2 m	40,4 m	64,7 m	101,0 m
35 A	5,5 m	9,2 m	14,8 m	22,2 m	37,0 m	59,1 m	92,4 m
50 A	3,9 m	6,5 m	10,3 m	15,5 m	25,9 m	41,4 m	64,7 m
63 A	3,1 m	5,1 m	8,2 m	12,3 m	20,5 m	32,8 m	51,3 m

## Teil II.

# Ausführliche Dimensionierung eine Leitung

## 2. Grundlagen

Für die Berechnung einer Leitung sind einige wichtige Kenntnisse erforderlich. In diesem Dokument werden die wichtigsten Kenntnisse vermittelt, um alle weiteren Kapitel zu verstehen. Hierzu wird ausführlich die Funktionweise von Sicherungen beschrieben.

Ein jeder Verbraucher dessen Strom keinen sinusförmigen Verlauf mehr hat, wird von Netzoberwellen überlagert. Die Oberwellen können auch in Privathaushalten zu einer Neutralleiterüberlastung führen. Insbesondere in der Industrie können Oberwellen, unter anderem durch Schaltnetzteile in Computern, Servern, EVGs in Leuchtstofflampen verursacht, zu einer Überlastung des Neutralleiters führen. In diesem Dokument wird den Oberwellen keine Beachtung geschenkt.

Dieses Dokument, das Dokument zu dem Oberwellen, ein Programm um eine Leitung zu berechnen und vieles mehr finden Sie auf der Webseite zum Dokument: <http://www.dieleitungsberechnung.de>

### 2.1. Rechtliche Grundlagen / Haftungsausschluss

Es wird keine Haftung übernommen, für fehlerhafte Leitungsberechnung sowie fehlerhafte Leitungsverlegung. Außerdem wird keine Haftung für die technische Korrektheit des Dokuments übernommen, da dieses Dokument lediglich als Beispiel zu verstehen ist. Des Weiteren dürfen Kabel und Leitungen nur von Fachleuten verlegt werden. Das Verlegen von Kabeln und Leitungen durch Laien ist eindeutig verboten! Siehe dazu das folgende Zitat aus der NAV<sup>1</sup>:

(2) Unzulässige Rückwirkungen der Anlage sind auszuschließen. Um dies zu gewährleisten, darf die Anlage nur nach den Vorschriften dieser Verordnung, nach anderen anzuwendenden Rechtsvorschriften und behördlichen Bestimmungen sowie nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik errichtet, erweitert, geändert und instand gehalten werden. In Bezug auf die allgemein anerkannten Regeln der Technik gilt § 49 Abs. 2 Nr. 1 des Energiewirtschaftsgesetzes entsprechend. Die

---

<sup>1</sup>NAV §13 Absatz 2

Arbeiten dürfen außer durch den Netzbetreiber nur durch ein in ein Installateurverzeichnis eines Netzbetreibers eingetragenes Installationsunternehmen durchgeführt werden; im Interesse des Anschlussnehmers darf der Netzbetreiber eine Eintragung in das Installateurverzeichnis nur von dem Nachweis einer ausreichenden fachlichen Qualifikation für die Durchführung der jeweiligen Arbeiten abhängig machen. Mit Ausnahme des Abschnitts zwischen Hausanschlusssicherung und Messeinrichtung einschließlich der Messeinrichtung gilt Satz 4 nicht für Instandhaltungsarbeiten.

In diesem Abschnitt ist eindeutig geregelt, dass eine Installation nur durch eine Fachkraft ausgeführt werden darf. Daher wird jegliche Haftung ausgeschlossen, sollten die Leitungen nicht fachgerecht, sondern laienhaft verlegt werden.

## 2.2. Grundlagen Leitungsschutzschalter (LSS)



Abbildung 2.1.: Leitungsschutzschalter Typ B16 A (von [1])

Das Bild 2.1 zeigt einen Leitungsschutzschalter mit der Charakteristik B (siehe Kapitel 2.2.1) und 16A. Zu sehen ist, dass dieser Leitungsschutzschalter (im weiteren LSS genannt) einem Schalter ähnelt und keiner Schmelzsicherung. Die Erläuterung des genauen technischen Aufbaus findet in den folgenden Kapiteln statt.

Bei Leitungsschutzschaltern sind grundsätzlich folgende Einschränkungen zu beachten:

- LSS dürfen nicht benutzt werden, um Motoren zu schützen, dieser Anwendungsfall tritt in privaten Haushalten eher selten auf.
- LSS sind geeignet, um zum Trennen von Stromkreisen verwendet zu werden. Betriebsmäßiges Schalten darf über LSS nicht erfolgen!
- Temperaturbereich  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  wobei ein Durchschnittswert von  $+35^{\circ}\text{C}$  innerhalb von 24 h nicht überschritten werden darf.
- Der Einbauort muss unter 2000 m NN liegen.

Besonders wichtig sind die folgenden Eigenschaften auf die wir in Kapitel 2.2.1 näher eingehen.

**Charakteristik:** Eingegangen wird auf die Charakteristik B,C sowie D.

**Nennstrom  $I_N$ :** Beschreibt den Strom, welchen die Sicherung dauerhaft halten kann.

**Kurzschlusschaltvermögen:** Ist die Höhe des Kurzschlussstromes, welcher noch abschaltbar ist.

### 2.2.1. Funktionsweise

Bevor wir die Funktionsweise näher erläutern, stellen wir zuerst eine Überlegung an, für welche Aufgaben dieser Leitungsschutzschalter gedacht ist. Der Name zeigt deutlich den eigentlichen Zweck auf. Dieses Element ist dazu gedacht die Leitung zu schützen. Wie soll er dies erledigen?

1. **Überstrom:** Bei einem zu hohen Stromfluss, verursacht durch zu viele Verbraucher an den Steckdosen, muss der LSS ausschalten. Stellen Sie sich folgende Situation vor: Bei Ihnen arbeitet Ihr Partner /Ihre Partnerin in der Küche und bereitet das Essen zu. Nun möchten Sie einen Tee trinken. Sobald Sie den Wasserkocher einschalten, löst die Sicherung aus. Der Strom ist hier auf genau 16,2 A angestiegen, also nur 0,2 A über dem erlaubten Wert. Eigentlich arbeitet der LSS korrekt, aber es wäre kein akzeptabler Zustand. Der LSS muss in der Anfangsphase verzögert auslösen, da es einfach inakzeptabel ist, wegen einer kleinen Überlastung die Verteilung aufzusuchen, um die Sicherung wieder einzuschalten.
2. **Kurzschluss:** Wenn ein Kurzschluss auftritt, so muss der Kurzschluss umgehend abgeschaltet werden. Dies ist die Aufgabe des Leitungsschutzschalters.



Aufgrund dieser Überlegungen können wir schlussfolgern, dass ein LSS mehrere Möglichkeiten besitzen muss, um die fehlerhaften Zustände zu verhindern. Dies ist zum Einem der thermische Auslöser, mittels eines Bi-Metalls, und ein magnetischer Auslöser.

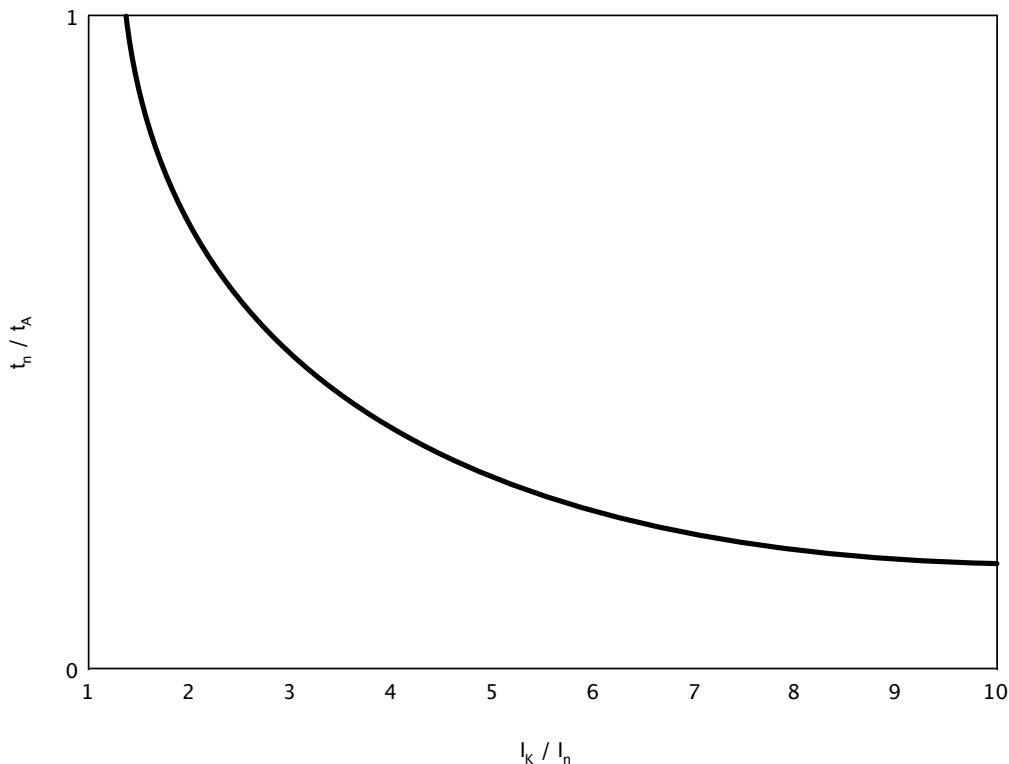


Abbildung 2.2.: Thermischer Auslöser

Bild 2.2 zeigt eine Kennlinie für den thermischen Auslöser. Dieser funktioniert mit einem Bi-Metall. Dieses hat die Eigenschaft, dass es sich bei Erwärmung verbiegt. Eine Eigenschaft, die dieses Metall erhält, aufgrund der Verbindung von zwei verschiedenen Metallen. Diese Metalle dehnen sich bei Erwärmung unterschiedlich aus. Dadurch verbiegt sich das Bi-Metall. Das hat den Vorteil, dass bei langsam ansteigendem Strom der LSS nicht sofort auslöst. Erwärmt sich jetzt das Bi-Metall durch einen Strom, so verbiegt es sich und löst damit die Sicherung aus. Der Stromkreis ist geöffnet und der Überstrom abgeschaltet. Dieses Verhalten ist Bild 2.2 zu erkennen. Bei langsam ansteigendem Strom sinkt langsam die Auslösezeit. Genau dieses Verhalten ist von uns gewünscht, damit ein LSS nicht sofort auslöst.

Betrachten wir das Bild 2.3. Dort ist ersichtlich, dass bis zum dreifachen Nennstrom nichts passiert und dann der LSS auslöst. Hier ist die Schaltschwelle überschritten wurden. Der magnetische Auslöser spricht an und bringt den LSS schnellstmöglich zum Auslösen. Das Auslösen geschieht über ein magnetisches Feld. Der magnetische Auslöser besitzt einen Kennwert bei dem er auslöst. Hierbei wird das Magnetfeld ausreichend stark, damit ein Kontakt öffnen kann. Zusätzlich ist eine sogenannte Funkbogenlöschkammer in der Sicherung eingebaut. Sollte die

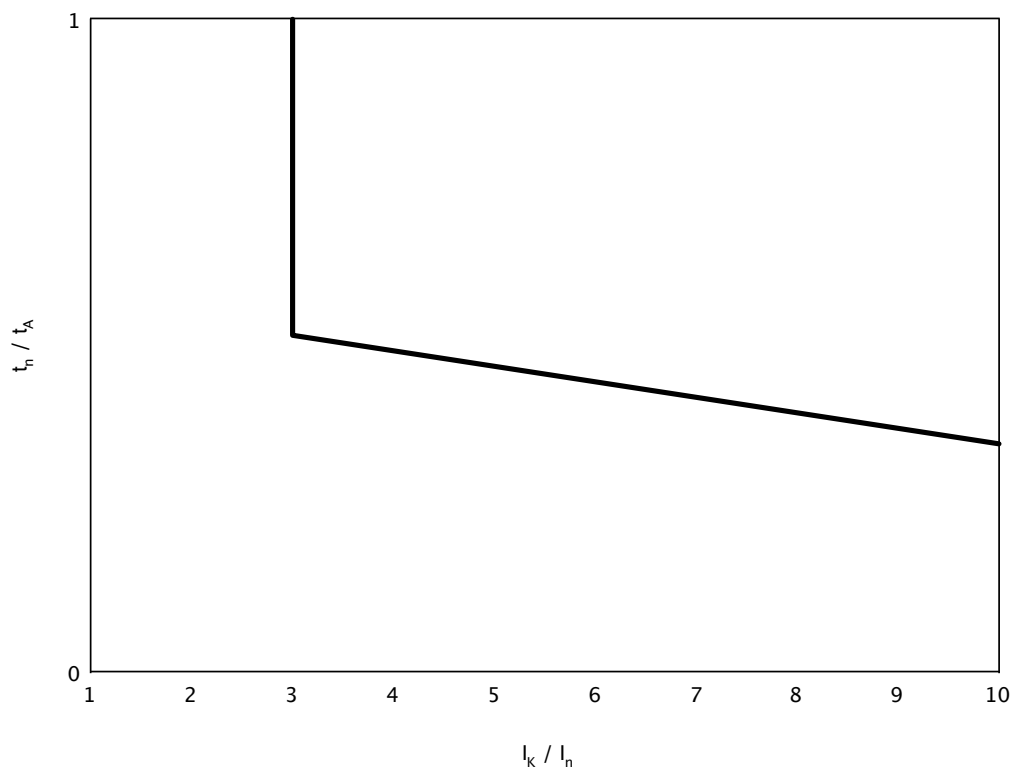


Abbildung 2.3.: magnetischer Auslöser

Sicherung ausschalten, so kann ein Lichtbogen entstehen. Damit die Sicherung nicht beschädigt wird, muss dieser Lichtbogen gelöscht werden.

Wenn nun beide Bilder 2.3 und 2.2 zusammengefügt werden, dann erhalten wir im Ergebnis die Kennlinien im Bild 2.4. Dieses Bild zeigt drei LSS der Kategorien B,C und D. Diese besitzen alle unterschiedliche Kennwerte. Die genauen Eigenschaften der Zeit-Strom-Kennlinie werden in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Eine wichtige Größe ist das Bemessungsschaltvermögen. In Bild 2.1 ist es durch ein Rechteck mit einer großen Zahl gekennzeichnet. Es befindet sich die Zahl 6000 in einem Rechteck. Diese gibt an, wie hoch der maximale Kurzschlussstrom sein darf, welcher zum fließen kommt (hier 6000 A). Sollte dieser Strom überschritten werden, so kann eine korrekte Funktionsweise nicht mehr garantiert werden. Es muss also zwingend darauf geachtet werden, dass die eingesetzten Geräte ein höheres Bemessungsschaltvermögen besitzen als die Höhe des auftretenden Kurzschlussstromes angibt. Für Leitungsschutzschalter welche direkt einem Endstromkreis schützen, muss mindestens ein Bemessungsschaltvermögen von 6000 A verbaut sein.

### 2.2.2. Zeit-Strom-Diagramm

Das Bild 2.4 zeigt das Zeit-Strom-Diagramm der Leitungsschutzschalter. Sehr gut sind die einzelnen Charakteristiken zu erkennen, welche bereits in Kapitel 2.2.1 angesprochen wurden.

Auch die beiden Fälle, thermischer sowie magnetischer Auslöser sind in den Kennlinien zu sehen. Bei Betrachtung der Charakteristik B ist ersichtlich, dass diese beim dreifachen Nennstrom den Stromkreis trennt. Die Kennlinie geht hier bis zum fünf fachen des Nennstroms. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch das Abschalten mittels magnetischen Auslöser. Der vorherige Bereich wird mittels des thermischen Auslösers abgeschaltet. Bei den Charakteristiken C und D ist es ähnlich. Lediglich die Werte des magnetischen Auslösers unterscheiden sich. Dies wiederum ist das wichtigste Unterscheidungskriterium der einzelnen Charakteristiken. Die beiden Einfassungen des magnetischen Auslösers zeigen das sichere Abschalten des LSS bei bestimmten Zeiten. Die Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht über diese Zeiten und Ströme.

Tabelle 2.1.: Abschaltzeiten der Leitungsschutzschalter-Charakteristiken

Charakteristik	B		C		D	
$t_A$	5 s	0,1 s	5 s	0,1 s	5 s	0,1 s
$I_N/I_K$	3	5	5	10	10	20

Die Prüfströme geben an, wie lange ein definierter Strom fließen kann, um den Leitungsschutzschalter in einer definierten Zeit zum Auslösen zu bringen. Diese Ströme sind zum Testen des magnetischen Auslösers wichtig. Die Tabelle 2.2 zeigt die Prüfströme der drei Charakteristiken B, C sowie D.

Kleiner Prüfstrom  $I_1$  muss in der Zeit  $t > 1h$  auslösen.

$$I_1 = 1,13 \cdot I_N \quad (2.1)$$

Großer Prüfstrom  $I_2$  muss in der Zeit  $t < 1h$  auslösen.

$$I_2 = 1,45 \cdot I_N \quad (2.2)$$

Tabelle 2.2.: Prüfströme der Leitungsschutzschalter

Was	LSS Typ B	LSS Typ C	LSS Typ D
Kleiner Prüfstrom $I_1$	1,13	1,13	1,13
Großer Prüfstrom $I_2$	1,45	1,45	1,45

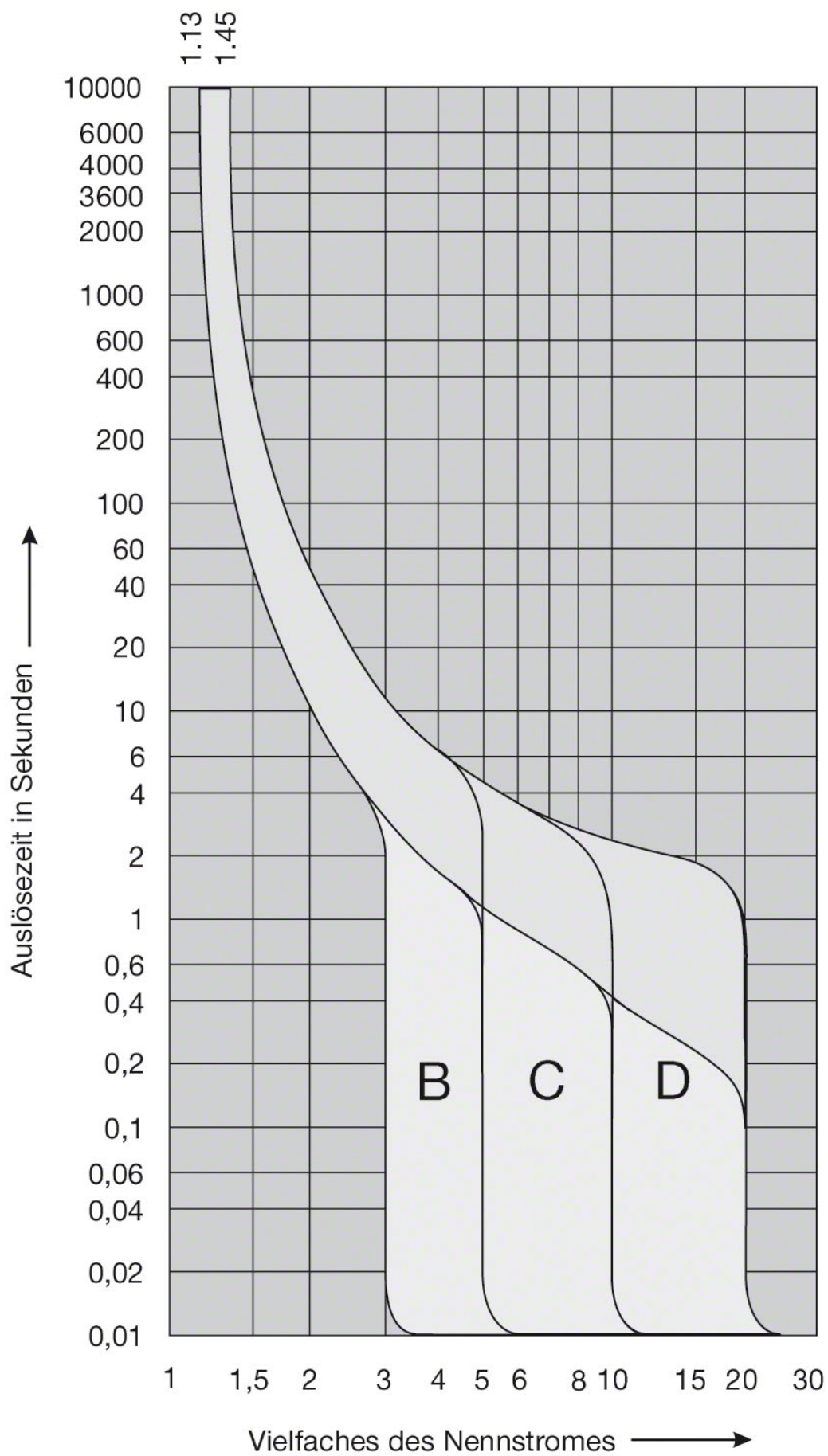


Abbildung 2.4.: Zeit-Strom-Diagramm für Leitungsschutzschalter (von [1])

### 2.2.3. Verwendung des Zeit-Strom-Diagramms

Die Verwendung der Kennlinien ist ziemlich einfach. Es gibt zwei Dinge die man unterscheiden muss. Die verschiedenen Arten des Auslösens (magnetisch sowie thermisch) müssen bei dem Ablesen der Werte berücksichtigt werden.

Das ablesen des thermischen Auslösers soll Anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Folgende Daten sind uns bekannt:

$$I_N = 10 \text{ A}$$

$$I_K = 15 \text{ A}$$

Wir suchen die Zeit, welche die Sicherung benötigt um den Strom weg zu schalten. Wie können ein Vielfaches des Nennstromes mit  $\frac{I_K}{I_N} = 1,5$  berechnen. Damit loten wir auf der Kennlinie nach oben, bis wir auf die Kennlinie der Sicherung stoßen. Dort lesen wir die Zeit von  $t_A = 400 \text{ s}$  ab.

Der magnetische Auslöser ist noch einfacher. Hierzu ist lediglich ein Blick in Tabelle 2.1 nötig. Übersteigt das vielfache des Nennstromes die Werte in der Tabelle 2.1, so sind die entsprechenden Abschaltzeiten in der Spalte zu nutzen.

## 2.3. Grundlagen Schmelzsicherungen

### 2.3.1. Funktionsweise

Die Funktionsweise ist verhältnismäßig einfach. In einem Porzellankörper befindet sich ein Draht und Quarzsand. Nachfolgend die Erklärung der einzelnen Komponenten:

- **Porzellankörper:** Dient als stabiler Rahmen der Sicherung. Gleichzeitig ist es in der Lage, die hohe Temperaturen bei einem Kurzschluss zu verkraften.
- **Draht:** Dieser Draht ist das Herzstück der Sicherung. Dieser ist so dimensioniert, dass dieser Draht bei einem definierten Strom in einer definierten Zeit schmilzt. Wann diese Zeiten und Ströme sind zeigt Bild 2.6. Übersteigt ein Strom nun den erlaubten Grenzen des Drahtes, so wird der Draht so heiß das dieser schmilzt und den Stromkreis unterbricht. Das ist das Geheimnis der Schmelzsicherung.
- **Quarzsand:** Bei dem Schmelzen des Drahtes kann es zu einem Lichtbogen kommen. Dieser wird durch den Quarzsand gelöscht und somit der Stromkreis geöffnet.

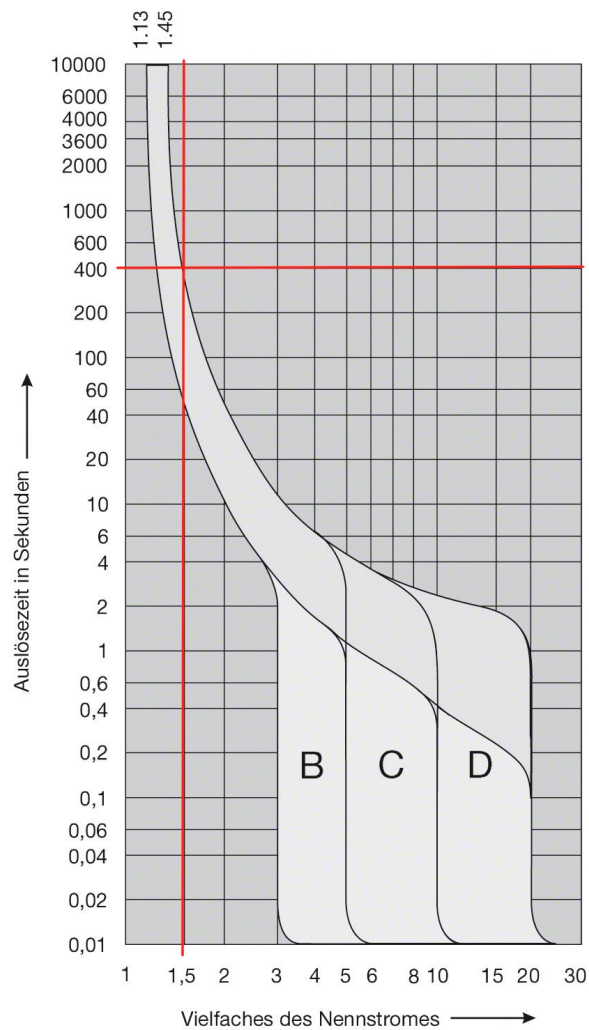


Abbildung 2.5.: Ablesen des Zeit-Strom-Diagramm eines LSS (Diagramm von [1])

### 2.3.2. Zeit-Strom-Diagramm

Das in Bild 2.6 abgebildete Zeit-Strom-Diagramm zeigt gL-gG Schmelzsicherungen. Die Wichtigsten sind in dieser Kennlinie abgebildet. Auch diese Sicherung hat einen Prüfstrom, welchen die Sicherung eine definierte Zeit lang halten muss. Wichtig ist weiterhin auch die logarithmische Achsteilung zu achten.

Großer Prüfstrom  $I_2$  muss in der Zeit  $t < 1$  h auslösen.

$$I_2 = 1,45 \cdot I_N \quad (2.3)$$



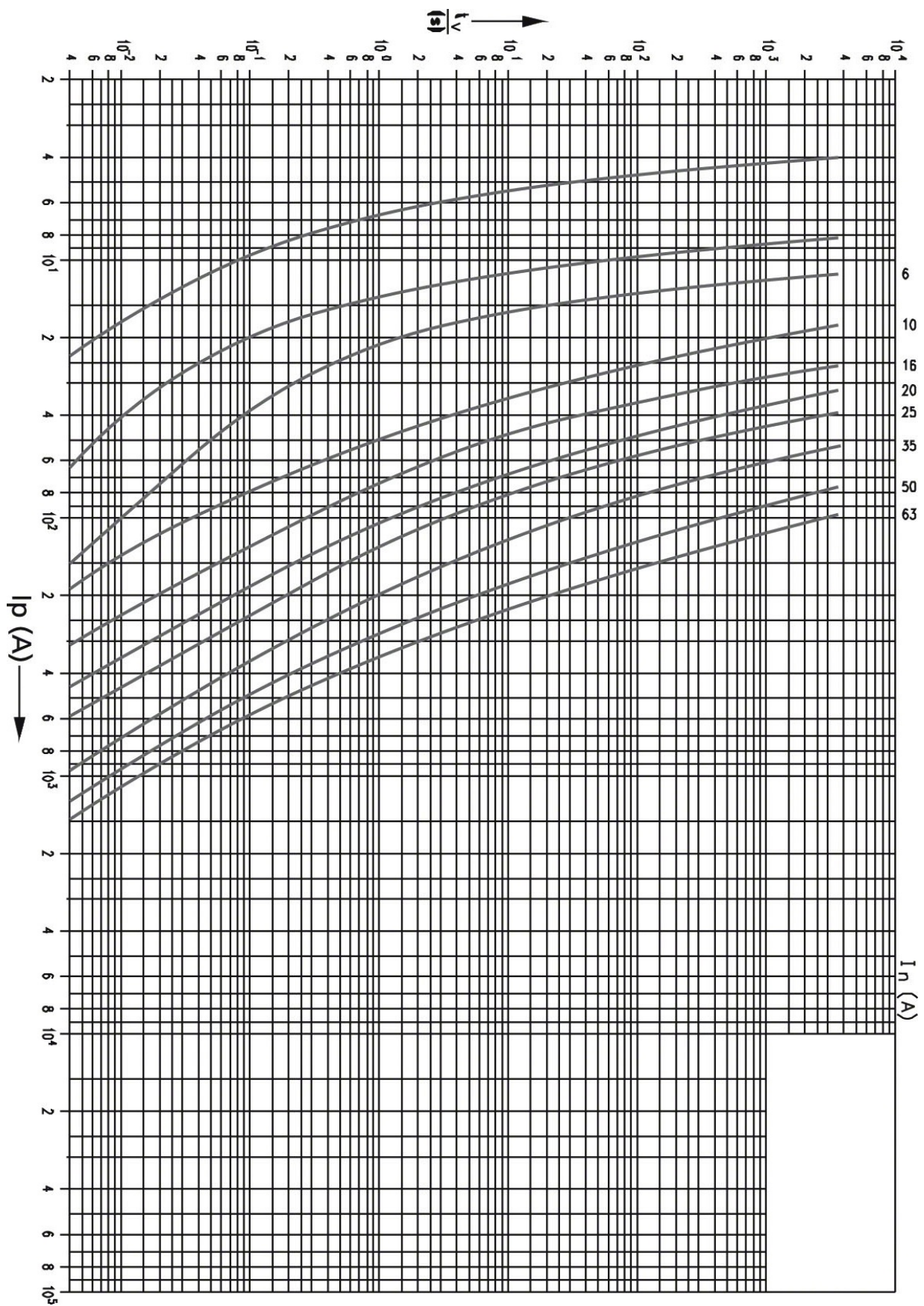


Abbildung 2.6.: Zeit-Strom-Diagramm Schmelzsicherung (von [1])

### 2.3.3. Verwendung des Zeit-Strom-Diagramms

Es werden beliebige Werte gewählt, um die Umgangsweise zu verdeutlichen.

Der Kurzschlussstrom beträgt  $I_K = 200 \text{ A}$

Die Abschaltzeit  $t_A = 20 \text{ ms}$

Es wird die Sicherung gesucht, die bei diesen Werten nicht auslöst und somit in den Stromkreis eingebracht werden kann. In Abbildung 2.7 werden nun zwei Markierungen eingebracht für den jeweiligen Strom und die jeweilige Zeit.

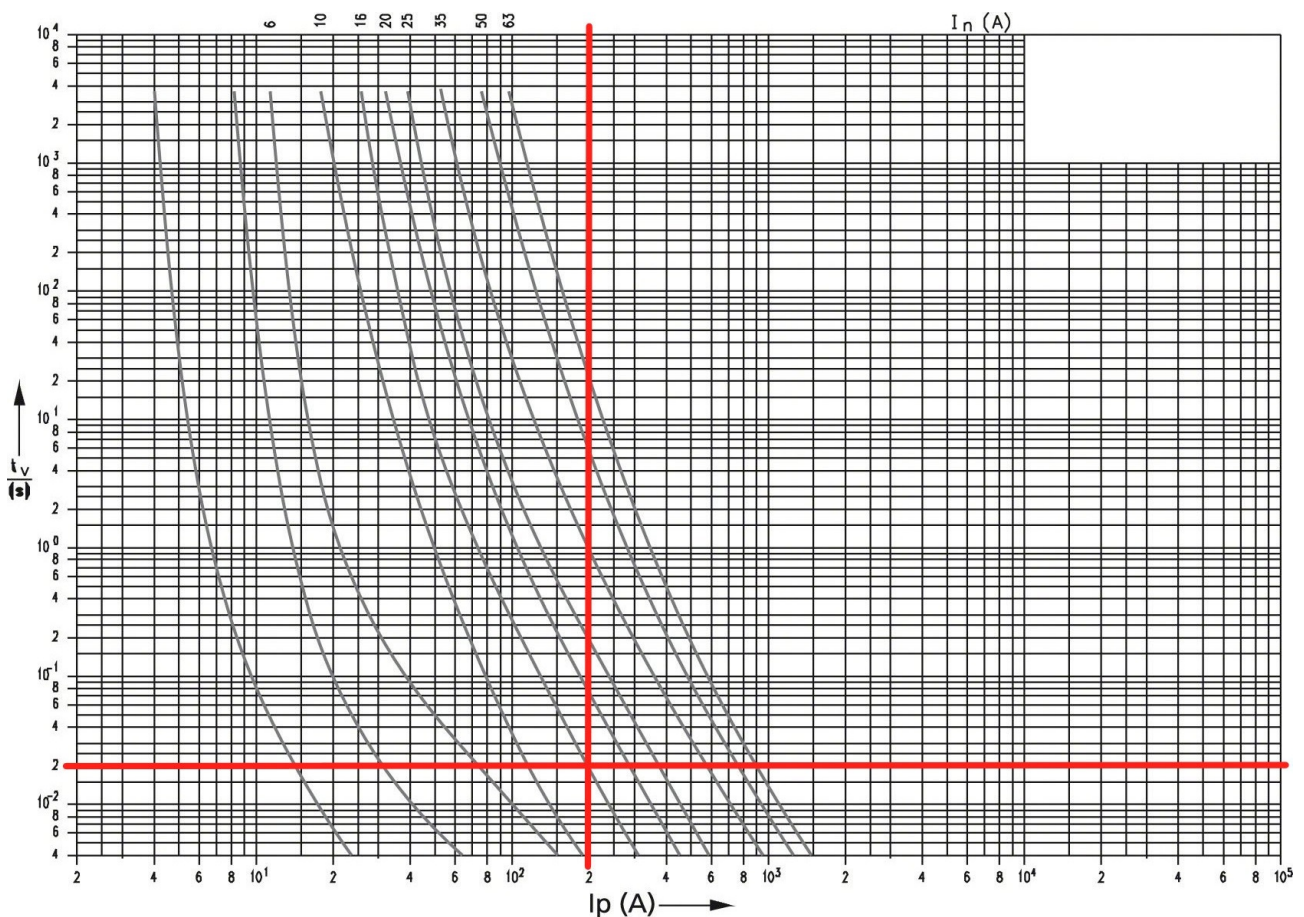


Abbildung 2.7.: Ablesen des Zeit-Strom-Diagramm einer Schmelzsicherung (Diagramm von [1])

Wie man in dem Bild 2.7 sieht, liegt der Schnittpunkt genau auf der Kennlinie der 16 A Sicherung. Sollte dies nicht der Fall sein, so ist die nächst kleine Sicherung zu wählen. Also jene Kennlinie, welche näher an der Zeitachse liegt.



## 2.4. Grundlagen der Energieversorgungsnetze

### 2.4.1. Abschaltzeiten im öffentlichen Versorgungsnetz

Tabelle 2.3.: Abschaltzeiten

Was		TN - Netz	TT - Netz
Für Endstromkreise bis 32 A	230 V AC	0,4 s	0,2 s
Für Endstromkreise bis 32 A	400 V AC	0,2 s	0,07 s
Verteilungsstromkreis und Stromkreis > 32 A		5 s	1 s
Motorstromkreis		5 s	5 s

In der neuen VDE 0100 Teil 410 wurden auch die Abschaltzeiten für die Versorgungsnetze neu geregelt. Es ist für die Ermittlung des Kurzschlusschutzes wichtig, dass die Abschaltzeiten bekannt sind. Es wird in Kapitel 5 auf diese Werte eingegangen.

Endstromkreise sind Stromkreise mit fest angeschlossenen Betriebsmitteln oder Betriebsmitteln die über eine Steckvorrichtung versorgt werden. Verteilungsstromkreise haben keine direkt angeschlossenen Betriebsmittel, sondern dienen lediglich zur Verteilung der elektrischen Energie. In Motorstromkreisen muss zwischen zwei Situationen unterschieden werden:

1. Die Installation des Motors in der Industrie. Es kann hierbei davon ausgegangen werden, dass bei einer definierten Steckvorrichtung oder bei einem Festanschluss genau ein Gerät betrieben wird. Somit gelten hier immer die Abschaltzeiten aus Tabelle 2.3 - Motorstromkreise (auch hier ist Vorsicht geboten und erfordert meistens eine genaue Besichtigung vor Ort!).
2. Geht man im Privathaushalt von fest angeschlossenen Motoren aus, haben sie die oben genannten Abschaltzeiten. Werden die Motoren jedoch über Steckvorrichtungen angeschlossen, so gelten hier nicht mehr die Abschaltzeiten für Motoren, sondern die Abschaltzeiten der normalen Stromkreise. Dies hat einen einfachen Hintergrund. Es kann in einem Privathaushalt nicht davon ausgegangen werden, dass die Steckvorrichtung lediglich für den Motor genutzt wird. Die Zuleitung für die Steckvorrichtung muss so angepasst werden, dass sie in jeden Betriebsfall rechtzeitig bei einem Kurzschluss oder im Überstromfall abschaltet.

## 2.5. Idealisierte Berechnungen

In den folgenden Berechnungen wird von den folgenden idealisierten Bedingungen ausgegangen:

$$\cos \varphi = 1.$$

Bei dieser idealisierten Betrachtung werden keine imaginären Widerstände der Kabel und Leitungen berücksichtigt. Für die weiteren Berechnungen werden nur die ohmschen Anteile der Leitungen betrachtet. Dadurch ergibt sich eine Vereinfachung der Rechnung.

Für weitere Berechnungen gelten also:

$$\cos \varphi = 1 \Rightarrow R = Z \quad (2.4)$$

Diese idealisierte Berechnung wird nicht für die Ermittlung des Betriebsstroms des Gerätes angewendet. Es ergäbe sich dort ein zu großer Rechenfehler, der in den weiteren Berechnungen gravierende Auswirkungen hätte.

Des Weiteren werden einige Berechnungen unter idealisierten Betriebsbedingungen betrachtet und unter vereinfachten Bedingungen Sicherungen ausgewählt. Dieses Dokument soll lediglich als grobe Linie für die Berechnung dienen und daher wird an vielen Stellen mit idealen Bedingungen gerechnet. Dieses Dokument kann nicht die genaue Besichtigung vor Ort ersetzen!

## 3. Auswahl der Sicherung

Für die Auswahl der Sicherung ist es wichtig, die technischen Daten des Gerätes zu kennen, um somit die Betriebsstromaufnahme des Gerätes zu ermitteln. Im Folgenden wird hier auf zwei wichtige Auswahlmethoden eingegangen:

1. Auswahl der Sicherung bei normalen Verbrauchern beispielsweise der Waschmaschine
2. Auswahl der Sicherung in Motorstromkreisen

### 3.1. Ermittlung des Betriebsstroms des Gerätes

$$I_B = \frac{P_{AB}}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot X} \quad (3.1)$$

Bedeutung der einzelnen Elemente:

$I_B$  = Betriebsstrom des Gerätes

$\cos \varphi$  = Leistungsfaktor des Gerätes

$X = \sqrt{3}$  bei einem Drehstromverbraucher und 1 bei einem Wechselstromverbraucher

$\eta$  = Wirkungsgrade des Gerätes

$P_{AB}$  = Abgegebene Leistung des Gerätes. Wird die aufgenommene Leistung verwendet, ist  $\eta = 1$ .

Mit der Formel 3.1 kann der Betriebsstrom eines Wechselstromes oder Drehstromverbrauchers ermittelt werden.

#### 3.1.1. Beispiel für die Ermittlung des Betriebsstroms

In den folgenden Beispielen werden die beiden oben erwähnten Fälle behandelt.

**3.1.1.1. Beispiel für einen Drehstromasynchronmotor**

Es wird für die Ermittlung ein Drehstromasynchronmotor mit folgenden technischen Daten gewählt:

$$\cos \varphi = 0,82$$

$$U = 400 \text{ V}$$

$$\eta = 0,9$$

$$P_{AB} = 4,8 \text{ kW}$$

$$I_B = \frac{P_{AB}}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot X} = \frac{4,8 \text{ kW}}{0,9 \cdot 0,82 \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}} = 9,4 \text{ A}$$

Dieser Motor hat also eine Stromaufnahme von 9,4 A. Dieser Wert kann jetzt verarbeitet werden.

**3.1.1.2. Beispiel für einen normalen Verbraucher**

Für die Ermittlung der Stromaufnahme werden die technischen Daten des Gerätes ermittelt:

$$\cos \varphi = 0,95$$

$$U = 230 \text{ V}$$

$$P_{AUF} = 2,5 \text{ kW}$$

Da hier die aufgenommene Leistung des Gerätes angegeben ist, kann der Wirkungsgrad in der Berechnung entfallen.

$$I_B = \frac{P_{AUF}}{\cos \varphi \cdot U \cdot X} = \frac{2,5 \text{ kW}}{0,95 \cdot 230 \text{ V}} = 11,44 \text{ A}$$

Dieses Gerät hat also eine Stromaufnahme von 11,44 A. Dieser Wert kann jetzt verarbeitet werden.

## 3.2. Auswahl der Sicherung

Die Sicherung wird unter idealen Bedingungen gewählt. Für die Auswahl der Sicherung ist es wichtig, die Stromaufnahme des jeweiligen Gerätes zu kennen.

Hierbei ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$I_B \leq I_{N.Sicherung} \quad (3.2)$$

Der Betriebsstrom des Gerätes muss niedriger sein als der Nennstrom der Sicherung. Bei den Beispielen wird davon ausgegangen, dass diese Bedingung immer erfüllt ist. Weiterhin ist die Kenntnis des Einschaltstromes, des ohmschen Verbrauchers oder des Motors wichtig. Jedes Gerät hat in seinem Einschaltmoment einen höheren Strom als im Betrieb des Gerätes. Der Einschaltstrom muss nun von der gewählten Sicherung gehalten werden, bis dieser Strom wieder abgeklungen ist. Da die Geräte verschiedene Einschaltströme haben können, kann hier keine generelle Aussage getroffen werden. Die jeweiligen Einschaltströme der Geräte müssen für eine weitere erfolgreiche Ermittlung der Sicherung bekannt sein, so wie die Zeit, in der der Einschaltstrom zum Fließen kommt. Es wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

1. Ermittlung des Einschaltstromes
2. Ermittlung der Zeit, in der der Einschaltstrom fließt
3. Vergleich der Werte mit denen der Sicherungen und Auswahl der passenden Sicherung

Wird in einem Endstromkreis eine Steckvorrichtung angebracht, die der Versorgung verschiedenster Geräte dienen kann, sollte die Sicherung passend auf den Nennstrom der Steckvorrichtung ausgelegt werden.

In einem Privathaushalt sollte die Sicherung immer auf den Nennstrom der Steckvorrichtung ausgelegt werden, da hier verschiedenste Geräte betrieben werden können. Der Errichter kann hier **nicht** von dem Betrieb mit einem festen Gerät ausgehen.

In der Industrie sieht es anders aus. Hier kann auch bei Steckvorrichtungen von dem Betrieb mit bestimmten Geräten ausgegangen werden. Hierbei kann aber keine generelle Aussage getroffen werden, es erfordert eine persönliche Begutachtung und Einschätzung der Sachlage vor Ort.

### 3.2.1. Beispiel für ein Stromkreis mit ohmschen Verbrauchern, Glühlampen

Es werden an einen Stromkreis Glühlampen mit einer Gesamtleitung von  $P = 1035 \text{ W}$  und einem Betriebsstrom von  $I_B = 4,5 \text{ A}$  angeschlossen. Die Glühlampen haben als Faustregel ca. den 6-fachen Einschaltstrom.

$$I_B = 4,5 \text{ A}$$

$$I_{EIN} = 4,5 \text{ A} \cdot 6 = 27 \text{ A}$$

Der Einschaltstrom liegt hier bei  $t < 1 \text{ s}$ . Die Abschaltzeit des Leitungsschutzschalters bei nicht Erreichen des Kurzschlussstromes ist auf jeden Fall  $t > 1 \text{ s}$ . Nun werden diese Daten mit den entsprechenden technischen Daten der Leitungsschutzschalter verglichen.

Tabelle 3.1.: Ansprechen der Leitungsschutzschalter

Sicherung	Ansprechen des Kurzschlusschutzauslösers
LSS TYP B 6 A	18 A
LSS TYP B 10 A	30 A
LSS TYP B 16 A	48 A

In Tabelle 3.1 sind die drei möglichen Kandidaten als Sicherung für diesen Stromkreis aufgeführt. Die Leitungsschutzschalter der Kategorie B wurden gewählt, da in Einfamilienhäusern als Standardabsicherung Leitungsschutzschalter der Kategorie B verwendet werden. Ein Vergleich des Einschaltstromes der Glühlampen und dem Ansprechen des Kurzschlusschutzauslösers zeigt, dass es nicht möglich ist, eine B 6 A Sicherung zu verwenden. Diese kann den Betriebsstrom zwar halten, jedoch nicht den Einschaltstrom der Verbraucher. Der Leitungsschutzschalter des Typ B 10 A liegt nur minimal über dem Einschaltstrom der Glühlampen. Er wird in den meisten Einschaltmomenten den Strom halten können, jedoch gibt es auch hier Schwankungen in der Qualität und somit im Ansprechen des Kurzschlusschutzauslösers. Bei den Glühlampen kann es durch Qualitätsschwankungen, Temperaturschwankungen und andere Einflüsse, auch zu Schwankungen des Einschaltstromes kommen. Daher kann es passieren, dass die Sicherung in bestimmten Situationen auslöst und somit das Ziel der Sicherungsdimensionierung verfehlt würde. Daher ist als einziger Leitungsschutzschalter bedenkenlos der LSS Typ B 16 A zu empfehlen.

### 3.2.2. Beispiel für einen Stromkreis mit einem Motor

Es existieren verschiedenste Lösungsmöglichkeiten für den Schutz eines Motorstromkreises. Auf eine dieser Varianten wird sich festgelegt und im weiteren Verlauf des Dokuments wird nur

diese Variante betrachtet und alle anderen werden außen Acht gelassen. Um die Leitung gegen Überstrom zu schützen, wird ein Motorschutz verwendet. Auf die Auswahl dieses Motorschutzes wird hierbei verzichtet, da es passend für die jeweilige Situation vor Ort ausgewählt werden muss. Der Kurzschlusschutz der Leitung wird von einer gL-gG-Schmelzsicherung übernommen. Diese Sicherung muss den Anlaufstrom des Motors halten können.

Technische Daten des Motors:

$$\cos \varphi = 0,82$$

$$U = 400 \text{ V}$$

$$\eta = 0,9$$

$$P_{AB} = 2,1 \text{ kW}$$

$$I_{EIN} = 5 \cdot I_B$$

$$t_{EIN} = 5 \text{ s}$$

$$I_B = \frac{P_{AB}}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} = \frac{2,1 \text{ kW}}{0,9 \cdot 0,82 \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}} = 4,2 \text{ A}$$

$$I_{EIN} = 5 \cdot I_B = 5 \cdot 4,2 \text{ A} = 21 \text{ A}$$

Mit den Werten  $I_{EIN} = 21 \text{ A}$  und  $t_{EIN} = 5 \text{ s}$  wird nach der Methode des vorherigen Kapitels eine Schmelzsicherung gewählt. Die gewählte Schmelzsicherung ist hier gL-gG 10 A.

### 3.3. Selektivität bei der Auswahl von Sicherungen

Das Bild 3.1 zeigt die Selektivität unter den Schmelzsicherungen, welche in Kapitel 2.3 erläutert wurden. Zunächst stellt man sich die grundlegende Frage, was ist denn überhaupt SELEKTIVITÄT?

Grundsätzlich muss natürlich die Sicherung auslösen, welche unmittelbar vor dem Fehler existiert. Hat beispielsweise der Herd einen Fehler und erzeugt einen Kurzschluss, so muss die Sicherung für den Herd auslösen und keine Sicherung im Hausanschlusskasten. Wird ein Loch in die Zuleitung zu einer Wohnung im Mehrfamilienhaus gebohrt, soll nur die Sicherung für

diese Wohnung auslösen. Hier ist es unter allen Umständen zu vermeiden, dass die Hauptsicherung auslöst und somit alle Wohnungen im Dunkeln stehen. Es heißt, dass die Sicherungen selektiv zueinander sein müssen.

Es sind Grundlegend zwei Fälle zu unterscheiden.

### 1. Schmelzsicherung - Schmelzsicherung:

Dieser Fall beschreibt eine Schmelzsicherung, welche hinter eine Schmelzsicherung eingebaut ist. Diese Fall zeigt sich bei einem Mehrfamilienhaus für die Absicherung der einzelnen Wohnungen. Für diesen Fall ist das Bild 3.1 zu sehen. Man liest das Bild, indem man sich zuerst die Sicherung an der linken Seite heraus sucht, welche als erstes verbaut ist. Hier als Beispiel eine 63 A Sicherung. Der Punkt markiert nun jene Sicherungen, welche noch sicher verbaut werden können, so dass jeweils die dem Fehler am nächsten gelegene Sicherung auslöst. Dies ist in diesen Fall eine 35 A Sicherung. Es dürfte in diesem Fall also Maximal eine 35 A Absicherung für eine Wohneinheit vorgesehen werden.

### 2. Schmelzsicherung - Leitungsschutzschalter:

Hier gilt es eine einfache Faustregel zu beachten. Generell sollte der Leitungsschutzschalter eine Nennstromgröße kleiner sein, als die vorgeschaltete Sicherung. Im Fall einer 35 A Schmelzsicherung ist der größte erlaubt Leitungsschutzschalter ein 25 A LSS.

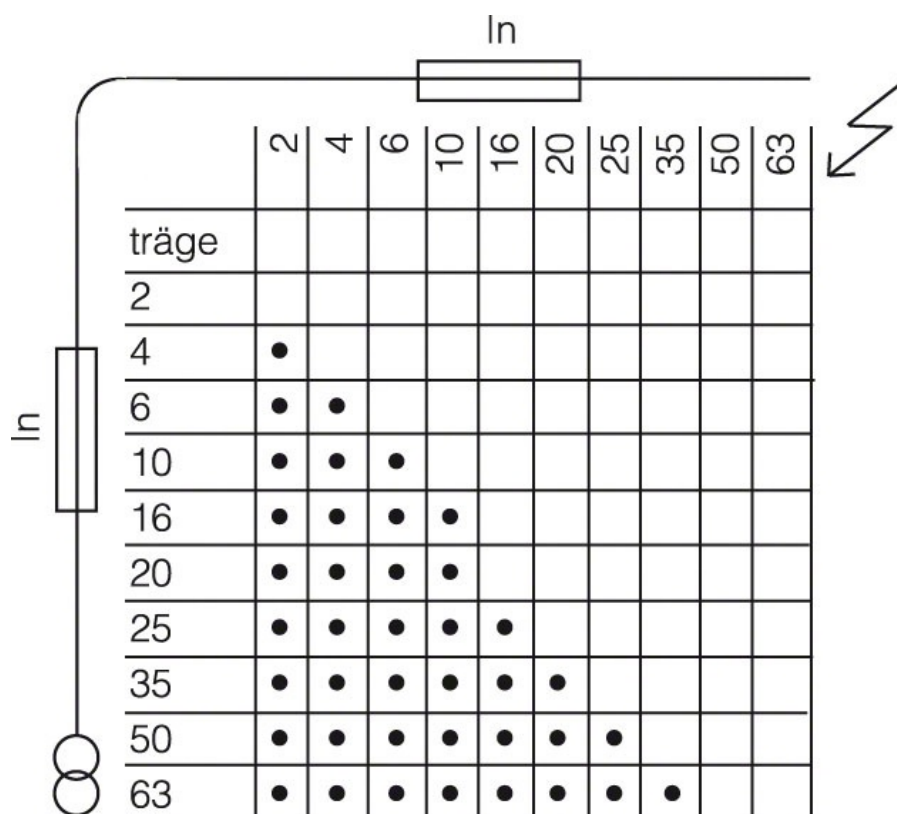


Abbildung 3.1.: Selektivität bei Schmelzsicherungen (von [1])



## 4. Überstromschutz von Kabel und Leitungen

Eine Leitung/Kabel besitzt einen maximalen Strom, den sie dauerhaft halten kann. Eine Übersicht über die Ströme findet man in Kapitel 4.2.1. Wird die Leitung dauerhaft überlastet, kann sie schweren Schaden nehmen und es kann bis zu einem Brand kommen. Die Leitung nach dem Überstromschutz zu dimensionieren, erfordert eine bestimmte Reihenfolge.

1. Welcher Strom wird verwendet? Nennstrom der Sicherung oder Betriebsstrom des Gerätes?
2. Ermittlung der Strombelastbarkeit mit den Reduktionsfaktoren und dem Betriebsstrom
3. Auswahl des Kabel, der Leitung anhand der Bedingungen nach VDE 0100 Teil 430

### 4.1. Welcher Strom wird in der Berechnung verwendet?

Hier gibt es mehrere Situationen, auf die wir näher eingehen müssen. Es sind dafür mehrere Informationen nötig. Welche Art von Gerät wird angeschlossen? Wo wird dieses Gerät angeschlossen, in der Industrie oder einem Privathaushalt? Wie wird das Gerät geschützt, mittels einer normalen Sicherung (ausgewählt nach Kapitel 3) oder eines Motorschutzes? Im weiteren Verlauf wird auf mehrere Situationen eingegangen.

#### 4.1.1. Anschluss eines Motors in der Industrie

Hierbei gehen wir immer von der bereits in Kapitel 3 beschriebenen Situation aus, nämlich dass der Überstromschutz des Motor von einem Motorschutz übernommen wird.

1. Der Motor wird über eine Steckvorrichtung angeschlossen.

- Befindet sich der Motorschutz vor der Steckvorrichtung, kann auf der Leitung kein höherer Strom fließen, als der vom Motor aufgenommene Strom. Somit wird für weitere Berechnungen der Betriebsstrom des Motors angenommen.
  - Befindet sich der Motorschutz hinter der Steckvorrichtung, kann die Leitung durch ein falsch angeschlossenes Gerät überlastet werden. Da diese Situation unter allen Umständen zu vermeiden ist, muss hier der Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung verwendet werden.
2. Wird der Motor direkt angeschlossen, also ohne jegliche Steckvorrichtungen, so kann die Leitung auf den Betriebsstrom des Motors ausgelegt werden. Da man auch hier von einem Motorschutz ausgeht, wird dieser den Stromkreis abschalten, sobald der Betriebsstrom überschritten wird. Daher kann die Leitung an die Stromaufnahme des Motors angepasst werden.

### **4.1.2. Anschluss allgemeiner Geräte in der Industrie**

Werden in der Industrie allgemeine Geräte angeschlossen, gehen wir von dem Anschluss durch eine Steckvorrichtung aus. Da wir in dieser Situation nicht von einem bestimmten Betriebsstrom ausgehen können, muss die Leitung auf den Nennstrom, der nach Kapitel 3 gewählten Sicherung ausgelegt werden. An dieser Stelle sei noch mal erwähnt, dass die Sicherung passend zum maximalen Strom der Steckvorrichtung gewählt werden sollte.

### **4.1.3. Anschluss von Geräten (Motor, allgemeine Geräte) in Privathaushalten**

Hierbei werden wir nicht zwischen fest angeschlossenen Geräten oder dem Anschluss durch eine Steckvorrichtung unterscheiden. Es gibt hier nur eine einzige Regelung, nämlich dass immer der Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung zu verwenden ist. Es gibt hier auch Ausnahmen, denen wir allerdings keine weitere Beachtung schenken. Dies ist auch ganz einfach zu begründen. In einem Privathaushalt muss davon ausgegangen werden, dass an einer Steckvorrichtung alle möglichen Geräte angeschlossen werden. Daher muss die Zuleitung jeder Steckvorrichtung auf den Nennstrom der Sicherung ausgelegt werden. Wird ein Gerät fest angeschlossen (Herd, Durchlauferhitzer), muss auch diese Zuleitung auf den Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung ausgelegt werden. Auch in dieser Situation kann nicht davon ausgegangen werden, dass niemals ein Gerät gewechselt wird.

#### 4.1.3.1. Herdzuleitung

Gerade bei der Zuleitung zum Herd müssen wir davon ausgehen, dass hier die verschiedensten Geräte angeschlossen werden und somit die Leitung auf den Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung auszulegen ist. Es gibt hierbei leider auch Meisterschulen, die der Ansicht sind, dass die Herdzuleitung als fest angeschlossener Wärmeverbraucher zu verstehen ist und somit die Zuleitung auf den Betriebsstrom ausgelegt werden kann. Diese Aussage ist definitiv inkorrekt! Die Herdzuleitung ist auf den Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung auszulegen. Wäre diese Aussage richtig, käme dies einem Verbot gleich einen anderen Herd an dieser Zuleitung zu betreiben. Diese Aussage ist vollkommen praxisfremd und somit kann es nicht korrekt in die Realität umgesetzt werden.

Des Weiteren sei erwähnt, dass nach DIN 18015 Teil 1 die Herdzuleitung auf eine Belastbarkeit von 20 A auszulegen ist.

## 4.2. Ermittlung der Mindeststrombelastbarkeit von Kabel und Leitungen

In einer jeden Situation muss die Mindeststrombelastbarkeit von Kabel und Leitungen ermittelt werden, um sie später mit den Bedingungen nach VDE zu vergleichen und somit einen Querschnitt zu verifizieren. Die Mindeststrombelastbarkeit der Leitung wird nach Formel 4.1 ermittelt. Hier ist wichtig, dass der Nennstrom der Sicherung oder des fest angeschlossenen Verbrauchers bekannt ist (siehe Kapitel 4.1). Weiterhin sind Faktoren wichtig, welche die Belastbarkeit verringert. Diese Faktoren werden in den Kapiteln 4.2.2 sowie 4.2.3.

$$I_{Z.MIN} = \frac{I_{Nennstrom}}{f(H) \cdot f(T)} \quad (4.1)$$

$I_{Z.MIN}$  = Ermittelte Mindestbelastbarkeit der Leitung / Kabel

$I_{Nennstrom}$  = Nennstrom der Sicherung oder des Verbrauchers, siehe Kapitel 4.1

$f(H)$  = Häufung von Leitungen, siehe Kapitel Kapiteln 4.2.2

$f(T)$  = Temperaturerhöhung der Leitung, siehe 4.2.3

### 4.2.1. Belastbarkeit von Kabel und Leitungen

Tabelle 4.1.: Belastbarkeit von Kabel und Leitungen aus Kupfer bei 30°C

Verlegeart	A1		A2		B1		B2		C	
Belastete Adern	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
1,5 mm <sup>2</sup>	15,5	13,5	15,5	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5
2,5 mm <sup>2</sup>	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24
4 mm <sup>2</sup>	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32
6 mm <sup>2</sup>	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41
10 mm <sup>2</sup>	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57
10 mm <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59,43*
16 mm <sup>2</sup>	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76
25 mm <sup>2</sup>	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96
35 mm <sup>2</sup>	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119
50 mm <sup>2</sup>	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144
70 mm <sup>2</sup>	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184
95 mm <sup>2</sup>	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223
120 mm <sup>2</sup>	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259
150 mm <sup>2</sup>	240	216	219	196	-	-	-	-	344	299

A1: Aderleitung in Rohr in Wärme gedämter Wand

A2: Mehraderleitung in Rohr in Wärme gedämter Wand

B1: Aderleitung in Rohr auf der Wand

B2: Mehraderleitung in Rohr auf der Wand

C: Mehradriges Kabel direkt auf der Wand

\* Die bei 10 mm<sup>2</sup> genannte Strombelastung bezieht sich auf 25°C Umgebungstemperatur und bei Verlegung auf Mauerwerk oder ähnlich gut wärmeableitenden Materialien. Mit dem Faktor für 25°C (1,06) ergibt sich eine Belastung von 63 A

Die Tabelle 4.1 zeigt die Belastbarkeit von Kabel und Leitungen bei den jeweiligen Verlegemethoden. Zu beachten ist, dass die Tabelle für eine Umgebungstemperatur von 30°C ausgelegt ist und alle Angaben in Ampere gelistet sind. Weiterhin ist die Tabelle auf eine Maximale Temperatur von 70°C ausgelegt. Um die Belastbarkeit aus der Tabelle auszulesen, muss bekannt sein, wie die Leitung bzw. das Kabel verlegt wird. Des Weiteren muss die Art der Spannungsversorgung bekannt sein.

2 Belastete Adern entsprechen dem Wechselstrom

3 Belastete Adern entsprechen dem Drehstrom

Nun kann in der jeweiligen Spalte die Belastbarkeit des Kabels oder der Leitung ermittelt werden.

Die 4.2 zeigt die Belastbarkeit von Kabeln bei der Verlegung in der Erde. Es gilt hierbei eine Temperatur von 20°C! Weiterhin ist zu beachten, dass alle Werte in Ampere gelistet sind.

Tabelle 4.2.: Belastbarkeit von Kabel und Leitungen auf Kupfer in der Erde

Leitungsart	NYY		NYCWY	
Verlegeart	Einzelader	Mehradern	Einzelader	Mehradern
1,5 mm <sup>2</sup>	30	27	31	27
2,5 mm <sup>2</sup>	39	36	40	36
4 mm <sup>2</sup>	50	47	51	47
6 mm <sup>2</sup>	62	59	63	59
10 mm <sup>2</sup>	83	79	84	79
16 mm <sup>2</sup>	107	102	108	102
25 mm <sup>2</sup>	138	133	139	133
35 mm <sup>2</sup>	164	159	166	160
50 mm <sup>2</sup>	195	188	196	190
70 mm <sup>2</sup>	238	232	238	234
95 mm <sup>2</sup>	286	280	281	280
120 mm <sup>2</sup>	325	318	315	319
150 mm <sup>2</sup>	365	359	347	357

Einzelader: Ein Drehstromkabel, das aus drei Einzeln verlegten Kabeln besteht.

Mehradern: Ein Mehraderdrehstromkabel. Alle Adern sind hier in einem Kabel untergebracht.

#### 4.2.2. Faktor der Häufung f(H)

Der Faktor der Häufung, zu sehen in Tabelle 4.3, ist ein gern vergessener Faktor. Eine jede Leitung bzw. ein jedes Kabel erwärmt sich im Betrieb, da in ihnen eine Leistung umgesetzt wird. Diese Wärme hat einen Einfluss auf die Belastbarkeit der Leitung. Je wärmer die Leitung wird, desto weniger belastbar ist die Leitung. In den Grundlagen wurden die gängigsten Faktoren für die Häufung aufgezählt.

Liegen jetzt zwei oder mehr Leitungen in ihrem Verlauf von mehr als 1 Meter parallel, so muss für diese Leitungen eine Häufung angerechnet werden. Ebenfalls muss die Häufung für Leitungen berücksichtigt werden, die mit mehr als 30 % ihrer Nennbelastbarkeit, nach VDE 0298 Teil 4, belastet werden. Aber auch hier muss nicht gleich jede Leitung als zusätzliche Häufung

Tabelle 4.3.: Häufung

Verlegeanordnung	Umrechnungsfaktoren									
Anzahl der Leitungen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gebündelte Verlegung auf der Wand, in der Wand, im Rohr oder im Kanal	1	0,8	0,7	0,65	0,6	0,57	0,54	0,52	0,5	0,48
Einlagig auf der Wand	1	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,7	0,7

angesehen werden. Wichtig ist, wie hoch die Leitung dauerhaft mit der Nennbelastung belastet wird. Berechnen wir eine Leitung, in deren Verlauf zwei weitere Leitungen liegen, die mit je 50 % belastet sind, so zählt dieses hier nur als eine zusätzlich voll belastete Leitung. Hierbei wird also bei zwei Leitungen der Reduktionsfaktor ermittelt.

Allgemein kann gesagt werden, parallel liegende Leitungen mit einer Belastung von 30 % - 60 % werden als zusätzliche Häufung mit 0,5 Leitungen angesehen. Sollte sich hierbei eine Kommazahl ergeben, wird immer auf die nächst höhere natürliche Zahl aufgerundet. Hierzu wird die von uns zu berechnende Leitung hinzu addiert (also +1) und bei der sich ergebenden Anzahl an belasteten Leitungen, wird in Tabelle (1.3) der Reduktionsfaktor abgelesen.

Hierzu ein kurzes Beispiel. Wir haben eine Herdleitung verlegt. Im Verlauf dieser Leitung, liegt die Leitung für die Versorgung des Wohnzimmers. Die Auslastung dieser Leitung liegt bei 40 %. Nach dem obigen Daten ergibt sich eine Häufung von 1,5 Leitungen (Die Grundlegende Leitung zum Herd ist Nr. 1 und die des Wohnzimmers ist die 0,5). Da in keiner Tabelle die Häufung von 1,5 zu finden ist, muss bei 2 geschaut werden.

Ergibt sich eine dauerhafte Belastung von > 60 % für die parallel liegende Leitung, so wird hier von einer Häufung von einer zusätzlichen Leitung ausgegangen. Auch hier wird die von uns zu berechnende Leitung hinzu addiert (also +1) und bei der sich ergebenden Anzahl an belasteten Leitungen wird der Reduktionsfaktor abgelesen.

## Häufung in Privathaushalten

Zur Häufung in Privathaushalten gibt es sehr viele verschiedene Meinungen. Selbst in Fachzeitschriften wird sporadisch die Meinung vertreten, dass in Privathaushalten die Häufung zu vernachlässigen ist. Das ist meines Erachtens ein grob fahrlässiges Vorgehen und kann zu einer nicht zu unterschätzenden Gefahr werden. Zwei einfache Beispiele sollen verdeutlichen, wie wichtig die Häufung auch in Privathaushalten ist. Es handelt sich hier lediglich um Beispiele, die nicht die genaue Betrachtung vor Ort ersetzen. Die Beispiele sollen lediglich verdeutlichen, dass auch in Privathaushalten eine Häufung eindeutig vorhanden ist. Hier kann es zu erhöhter Belastung kommen, deswegen sollte der Planer immer größere Querschnitte wählen, um eine unzulässige Erwärmung der Leitung aus zu schließen. Des Weiteren kann grade in

Privathaushalten nicht von einer definierten Belastung ausgegangen werden. Wie genau die Leitungen belastet werden, muss immer der Planer vor Ort entscheiden. Daher werden für die folgenden Beispiele definierte Werte gewählt, diese können von den tatsächlichen Werten in der Leitungsberechnung abweichen.

1. Wie wir schon festgestellt haben, sind Häufungen von weniger als einem Meter parallel verlegter Kabel bzw. Leitungen nicht zu beachten. Was ist aber wenn die Zuleitungen zum Herd, Waschmaschine und dem Trockner mehrere Meter parallel verlegt werden? Dieser Fall ist in meiner Berufserfahrung schon öfters vorgekommen. Es ergibt sich sehr wohl eine Häufung von Leitungen, welche die Belastbarkeit der Leitungen deutlich reduziert. Berechnen und verlegen wir die Zuleitung zum Herd und liegt zu dieser Leitung die Zuleitungen zum Trockner und zur Waschmaschine parallel, so kann man von einer dauerhaften Belastbarkeit von mindestens 80 %, bei den beiden parallel liegenden Leitungen, ausgehen. In dieser Situation wird also von einer Häufung mit zwei Leitungen ausgegangen. Es wird somit der Reduktionsfaktor für drei Leitungen abgelesen.
2. Wir betrachten eine alltägliche Situation. Die Zuleitungen zum Herd, zur Geschirrspülmaschine und die Zuleitungen für die Arbeitssteckdosen in der Küche werden über mehrere Meter parallel verlegt. Es wird nun in der Geschirrspülmaschine Geschirr gespült, Belastung der Leitung 30 % - 40 %. Gleichzeitig wird mittels eines Wasserkochers Wasser erhitzt um es beim Kochen zu benutzen oder Tee auf zu brühen, Belastung der Leitung 50 % - 60 %. Zusätzlich wird auf dem Herd das Mittagessen zubereitet, Belastung der Leitung auch gute 50 %. Hier bei kommen wir auf eine Häufung von 2 Leitungen. Diese Häufung muss bei der Berechnung der Zuleitungen zum Herd, zu der Geschirrspülmaschine und für die Arbeitssteckdosen beachtet werden.

#### 4.2.3. Faktor der Temperatur Erhöhung/Erniedrigung $f(T)$

Tabelle 4.4.: Umrechnungsfaktoren der Temperatur

Umrechnungstemperatur	Berechnungsfaktor
20	1,12
25	1,06
30	1
35	0,94
40	0,87

Tabelle 4.4 zeigt den Faktor der Temperatur Erhöhung/Erniedrigung. Dieser Faktor ist auch ein gerne vergessener Faktor in der Leitungsberechnung. Die Leitung kann durch einen dauerhaften Stromfluss oder durch äußere Einflüsse erwärmt werden. Dieser Faktor beschreibt

die Belastbarkeit der Leitung die durch die Veränderung der Umgebungstemperatur geändert wird. Nach DIN muss die Leitung auf eine Umgebungstemperatur von 25°C ausgelegt werden. Ich halte es jedoch für sicherer die Leitung auf 30°C aus zu legen, da diese Temperatur im Sommer auch in Innenräumen erreicht werden kann. Im weiteren Verlauf dieses Dokumentes wird immer von einer Temperatur von 30°C ausgegangen, es sei denn es wird ausdrücklich etwas anderes erwähnt.

#### 4.2.4. Beispiele für Ermittlung der Mindeststrombelastbarkeit von Kabel und Leitungen

Als Beispiele werden möglichst realistische Szenarien gewählt und durchgerechnet. Es handelt sich hier um frei definierte Werte, die von den tatsächlichen Werten in eine Berechnung abweichen können. Es ist eine genaue Besichtigung vor Ort unabdingbar.

##### 4.2.4.1. Beispiel für eine Herdzuleitung

Es wird die Zuleitung zu einem Herd verlegt. Dieser Herd befindet sich in einem Privathaushalt. In dem Verlauf liegen die Leitungen für die Waschmaschine und des Trockners parallel über mehrere Meter. Die Leitungen der Waschmaschine und die Zuleitung von dem Trockner werden dauerhaft mit ca. 80 % belastet. Die dauerhafte Verlegetemperatur liegt bei 25°C. Nach DIN 18015 Teil 1 muss die Herdzuleitung auf eine Nennbelastbarkeit von 20 A ausgelegt werden. Nach Formel 4.1 gilt:

$$I_{Nennstrom} = 20 \text{ A}$$

$$f(H) = 0,7$$

$$f(T) = 1,06$$

$$I_{Z.MIN} = \frac{I_{Nennstrom}}{f(H) \cdot f(T)} = \frac{20 \text{ A}}{0,7 \cdot 1,06} = 27 \text{ A}$$

Die Zuleitung zum Herd muss also eine Mindestbelastbarkeit von 27 A aufweisen.



**4.2.4.2. Beispiel für eine Zuleitung einer Waschmaschine**

Die Waschmaschine wird in einem normalen Einfamilienhaus aufgestellt. Es wurde für diese Waschmaschine bereits ein Leitungsschutzschalter von Typ B 16 A ermittelt. Für die folgende Berechnung wird ein Nennstrom von 16 A angenommen. Parallel zu der Leitung liegt die Zuleitung zum Wohnzimmer und dessen dauerhafte Belastung ist mit 45 % anzusetzen. Da beide Leitungen in ihrem Verlauf einlagig auf der Wand verlegt werden gilt für die Häufung,  $f(H) = 0,85$ . Nach Formel 4.1 gilt:

$$I_{Nennstrom} = 16 \text{ A}$$

$$f(H) = 0,85$$

$$f(T) = 1,0$$

$$I_{Z.MIN} = \frac{I_{Nennstrom}}{f(H) \cdot f(T)} = \frac{16 \text{ A}}{0,85 \cdot 1,0} = 19 \text{ A}$$

Die Zuleitung zu der Waschmaschine muss also eine Mindestbelastbarkeit von 19 A aufweisen.

**4.2.4.3. Beispiel für eine Zuleitung zu einem Motor**

Der für diese Berechnung verwendete Motor wird einem früherem Beispiel übernommen. Die Zuleitung zum Motor wird in der Industrie verlegt und wird direkt angeschlossen. Der Überstromschutz wird von einem Motorschutz übernommen. Dieser Motorschutz sorgt ebenfalls dafür, dass der Nennstrom der Überstromschutzeinrichtung dem Betriebsstrom des Gerätes entspricht. Die Zuleitung wird auf der Wand in Elektroinstallationsrohr verlegt und parallel liegen drei weitere voll belastet Zuleitungen für andere Motoren in diesem Rohr. Die Leitungen sind gebündelt verlegt, wie es bei der Verlegung in Elektroinstallationsrohren üblich ist. Es gilt also die Häufung für 4 Leitungen die zu ermitteln ist, da auch die von uns verlegte Zuleitung eine Belastung von  $> 60 \%$  aufweist. Nach Formel 4.1 gilt:

$$I_{Nennstrom} = 9,4 \text{ A}$$

$$f(H) = 0,65$$

$$f(T) = 1,0$$

$$I_{Z.MIN} = \frac{I_{Nennstrom}}{f(H) \cdot f(T)} = \frac{9,4 \text{ A}}{0,65 \cdot 1,0} = 14,5 \text{ A}$$

### 4.3. Auswahl der Kabel und Leitungen nach VDE 0100 Teil 430

In der VDE 0100 Teil 430 sind zwei Bedingungen eindeutig geregelt die für die Leitungsberechnung unbedingt einzuhalten sind.

1. Bedingung:

$$I_B \leq I_{N.Sicherheit} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung} \quad (4.2)$$

2. Bedingung:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \quad (4.3)$$

#### 4.3.1. Erste Bedingung nach VDE 0100 Teil 430

Die erste Bedingung lautet:

$$I_B \leq I_{N.Sicherheit} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung}$$

$I_B$  = Betriebsstrom des angeschlossenen Gerätes

$I_{N.Sicherheit}$  = Hier wird der Nennstrom der Überstromschutzeinrichtung verwendet. Was als Überstromschutzeinrichtung verwendet wird und welcher Strom für die Berechnung wichtig ist, wurde bereits ausführlich beschrieben.

$I_{Z.MIN}$  = Diese Ermittlung des Stromes wurde bereits ausführlich behandelt.

$I_{Z.Leitung}$  = Wird aus den Grundlagentabellen abgelesen. Zu beachten ist hierbei, die Art des Verbrauchers, Drehstrom oder Wechselstrom und die Verlegung der Leitung. Weiterhin werden die ermittelten Werte verglichen und es wird ein Querschnitt gewählt.

##### 4.3.1.1. Beispiel für eine Herdzuleitung

Wie wir bereits wissen, muss die Mindestbelastbarkeit der Leitung  $I_{Z.MIN} = 27 \text{ A}$  sein. Daraus folgt:

$$I_B = 20 \text{ A}$$

$$I_{N.Sicherheit} = 20 \text{ A}$$

$$I_{Z.MIN} = 27 \text{ A}$$

Die DIN 18015 Teil 1 schreibt eine Mindestbelastbarkeit der Leitung von 20 A vor, daher wird in der weiteren Berechnung von diesem Strom ausgegangen. Die in der Praxis übliche 16 A Absicherung wird hier nicht beachtet, da die Berechnung DIN gerecht ausgeführt wird. Wie wir bereits wissen muss  $I_{Z.Leitung}$  mindestens so groß sein, oder größer sein als  $I_{Z.MIN}$ . Da keine Verlegebedingung genannt wurde, gehen wir von einer normalen Unterputzverlegung aus. Dies wäre also Verlegeart C. Des Weiteren handelt es sich bei einem Herd um einen Drehstromverbraucher, also werden 3 Adern belastet. Daher wird bei C  $\rightarrow$  3 belasteten Adern, der notwendige Strom ermittelt. Wenn wir die Tabelle begutachten, sehen wir einen Wert von  $I_{Z.Leitung} = 32 \text{ A}$  bei einem Querschnitt von  $4 \text{ mm}^2$

Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

$$I_B \leq I_{N.Sicherung} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung}$$

$$20 \text{ A} \leq 20 \text{ A} \leq 32 \text{ A} \implies 27 \text{ A} \leq 32 \text{ A}$$

Diese Bedingung ist erfüllt mit einem Querschnitt von  $4 \text{ mm}^2$ . Würde diese Bedingung mit  $2,5 \text{ mm}^2$  durchgerechnet, so würde diese Bedingung nicht erfüllt. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass es sich hierbei um eine durchaus realistische Berechnung handelt und trotzdem  $4 \text{ mm}^2$  verwendet werden muss.

**Ermittelter Querschnitt  $4 \text{ mm}^2$ . Dieses ist eine durchaus praxisnahe Dimensionierung.**

#### 4.3.1.2. Beispiel für eine Waschmaschine

Wie wir bereits wissen, muss die Mindestbelastbarkeit der Leitung  $I_{Z.MIN} = 19 \text{ A}$  sein. Daraus folgt:

$$I_B = 16 \text{ A}$$

$$I_{N.Sicherung} = 16 \text{ A}$$

$$I_{Z.MIN} = 19 \text{ A}$$

Wie wir bereits wissen, muss  $I_{Z.Leitung}$  mindestens so groß bzw. größer sein als  $I_{Z.MIN}$ . Da keine Verlegebedingung genannt wurde, gehen wir von einer Verlegung der Leitung in einem Kunststoffrohr aus. Dieses wäre also Verlegeart B2. Des Weiteren handelt es sich bei einer

Waschmaschine um einen Wechselstromverbraucher, also werden zwei Adern belastet. Daher wird bei B2  $\rightarrow$  2 belasteten Adern, der notwendige Strom ermittelt. Wenn wir die Tabelle begutachten, sehen wir einen Wert von  $I_{Z.Leitung} = 23 \text{ A}$  bei einem Querschnitt von  $2,5 \text{ mm}^2$ . Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

$$I_B \leq I_{N.Sicherung} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung}$$

$$16 \text{ A} \leq 16 \text{ A} \leq 23 \text{ A} \implies 19 \text{ A} \leq 23 \text{ A}$$

Diese Bedingung ist erfüllt mit einem Querschnitt von  $2,5 \text{ mm}^2$ .

**Ermittelter Querschnitt  $2,5 \text{ mm}^2$ .**

#### 4.3.1.3. Beispiel für einen Motor

Wie wir bereits wissen, muss die Mindestbelastbarkeit der Leitung  $I_{Z.MIN} = 14,5 \text{ A}$  sein. Daraus folgt:

$$I_B = 9,4 \text{ A}$$

$$I_{N.Sicherung} = 9,4 \text{ A}$$

$$I_{Z.MIN} = 14,5 \text{ A}$$

Wie wir bereits wissen, muss  $I_{Z.Leitung}$  mindestens so groß bzw. größer sein als  $I_{Z.MIN}$ . Es wurde bereits erklärt, dass die Zuleitung zum Motor direkt auf der Wand in Elektroinstallationsrohr verlegt wird. Dieses wäre also Verlegeart B2. Des Weiteren handelt es sich bei einem Motor um einen Drehstromverbraucher, also werden 3 Adern belastet. Daher wird bei B2  $\rightarrow$  3 belasteten Adern, der notwendige Strom ermittelt. Wenn wir die Tabelle begutachten, sehen wir einen Wert von  $I_{Z.Leitung} = 15 \text{ A}$  bei einem Querschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$ . Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

$$I_B \leq I_{N.Sicherung} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung}$$

$$9,4 \text{ A} \leq 9,4 \text{ A} \leq 15 \text{ A} \implies 14,5 \text{ A} \leq 15 \text{ A}$$

Diese Bedingung ist erfüllt mit einem Querschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$ .

**Ermittelter Querschnitt  $1,5 \text{ mm}^2$ .**

#### 4.3.2. Zweite Bedingung nach VDE 0100 Teil 430

Nach Formel 4.3 gilt:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z$$

mit  $I_2 = 1,45 \cdot I_{N.Sicherung}$  folgt für die zweite Bedingung:

$$1,45 \cdot I_{N.Sicherung} \leq 1,45 \cdot I_Z \mid \cdot \frac{1}{1,45}$$

$$I_{N.Sicherung} \leq I_{Z.Leitung}$$

Diese Bedingung ist bereits in der ersten Bedingung geprüft worden und wird daher nicht weiter beachtet. **ACHTUNG!** Diese Berechnung gilt nur für die in diesem Dokument erwähnten Sicherungen. Ältere Schmelzsicherungen der Typ gL haben einen anderen  $I_2$  Wert!

## 5. Kurzschlusschutz von Kabel und Leitungen

Bei jedem Verbraucher kann es zu einer Verbindung eines Außenleiters, mit dem Schutzleiter kommen. Bei dieser Verbindung kommt es zu einem hohen Stromfluss und durch diesen können die Leitungen geschädigt werden. Auf die vielen Arten des Kurzschlusses wird hier nicht weiter eingegangen, da es den Umfang des Dokuments sprengen würde. Der Kurzschlusschutz von Kabel und Leitungen sollte nun in der folgenden Reihenfolge ermittelt werden:

1. Zulässige Abschaltzeit ermitteln
2. Widerstand der Leiterschleife und den Kurzschlussstrom ermitteln
3. Abschaltzeit der Sicherung und die vorgeschriebene Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 410 ermitteln
4. Bedingungen nach VDE 0100 Teil 430 prüfen

### 5.1. Zulässige Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 430

Die Zulässige Abschaltzeit wird nach VDE 0100 Teil 430 nach Formel 5.1 ermittelt.

$$t_{VA} = \left( \frac{k \cdot A}{I_K} \right)^2 \quad (5.1)$$

$t_{VA}$  = Zulässige Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 430

$A$  = Querschnitt der zu berechnenden Leitung

$I_K$  = Kurzschlussstrom auf der Leitung

Tabelle 5.1.: k Koeffizient

Art der Leitung/Kabel	Koeffizient $k$
PVC isolierten Kupferleiter	115
PVC isolierten Aluminiumleitern	76
Gummiisolierten Kupferleitern	141

Der  $k$  Wert ( $k = 1 \cdot \frac{\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$ ) ist der Materialkoeffizient. Die gängigsten sind in Tabelle 5.1 dokumentiert. Auf die Einheit von  $k$  wird, aus Übersichtlichkeit, in der Tabelle 5.1 verzichtet.

Die Sicherung im Stromkreis ist dafür verantwortlich den Strom, in der dafür vorgesehenen Zeit, abzuschalten. Die Zeit  $t_{VA}$  darf dabei nicht überschritten werden.

## 5.2. Ermittlung des Widerstandes der Leiterschleife und des Kurzschlussstromes

Berühren sich der Außenleiter und der PE, so wird die Leiterschleife geschlossen und es kommt zu einem hohen Stromfluss. Folglich ist dieser Stromfluss der Kurzschlussstrom. Für die Ermittlung des Kurzschlussstromes ist die Spannung wichtig. Zwischen dem Außenleiter und dem PE liegt dabei eine Spannung von  $U_0 = 230 \text{ V}$  an. Die anderen Arten des Kurzschlusses finden hier keine Beachtung, da dieser Kurzschluss für den Menschen am gefährlichsten ist und somit umgehend abgeschaltet werden muss.

### 5.2.1. Ermittlung des Widerstandes der Leiterschleife

Der Widerstand der Leiterschleife besteht aus zwei Komponenten:

1. Der Widerstand der Leiterschleife  $R$  des öffentlichen Versorgungsnetzes bis zu der Anschlussstelle der verlegten Leitung/Kabel. Hierbei gibt es nur eine verlässliche Messmethode. Es sollte ein Messgerät, welches die Prüfungen nach VDE 0100 Teil 610 erledigen kann, gewählt werden, um damit den Widerstand der Leiterschleife zu ermitteln. Berechnungen oder Schätzungen dieses Widerstandes sind zu ungenau, oder fallen in dem Kompetenzbereich eines Diplom Ingenieurs der Elektrotechnik.
2. Hierbei muss der Widerstand der verlegten Leitung oder des verlegten Kabels ermittelt werden. Dies wird nach Formel 5.2 erledigt.

$$R_{Leitung} = \frac{2 \cdot L}{K \cdot A} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (5.2)$$

$L$  = Länge der Leitung

$A$  = Querschnitt der zu berechnenden Leitung

$K$  = Elektrische Leitfähigkeit der Leitung, bei Kupfer  $K = 56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega}$

$\alpha$  = Temperaturkoeffizient, bei Kupfer  $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$

$\Delta T$  = Dieser Faktor beschreibt eine Temperaturdifferenz. Diese resultiert aus der maximal erlaubten Temperatur der Leitung (  $T_{NYM} = 70^\circ\text{C}$  ), der Temperatur der Elektrischen Leitfähigkeit  $K$  (  $T_K = 20^\circ\text{C}$  ) sowie einem Sicherheitsaufschlag von  $T_{Sicherheit} = 10\text{ K}$ . Daraus resultiert:  $\Delta T = (T_{NYM} - T_K) + T_{Sicherheit} = 60\text{ K}$

Wurden nun beide Werte ermittelt, werden sie addiert um den Gesamtwiderstand der Leiterschleife heraus zu finden. Der Gesamtwiderstand wird nach Formel 5.3 ermittelt.

$$R_{Ges.} = R + R_{Leitung} \quad (5.3)$$

#### 5.2.1.1. Beispiel für eine Herdzuleitung

Als Widerstand der Leiterschleife, bis zum Anschlusspunkt der Leitung, wurde  $R = 0,8\ \Omega$  gemessen. Als Leitung soll ein NYM-J 5 x 2,5 mm<sup>2</sup> verlegt werden, über die Länge von 21 m. Somit ist  $R = 0,8\ \Omega$  und  $R_{Leitung}$ :

$$\begin{aligned} R_{Leitung} &= \frac{2 \cdot L}{K \cdot A} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \\ &= \frac{2 \cdot 21\text{ m}}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 2,5\text{ mm}^2} \cdot \left( 1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \cdot 60\text{ K} \right) = 0,37\ \Omega \end{aligned}$$

Der Gesamtwiderstand errechnet sich somit zu:

$$R_{Ges} = R + R_{Leitung} = 0,8\ \Omega + 0,37\ \Omega = 1,17\ \Omega$$

Somit ergibt sich für den Widerstand der Leiterschleife im Kurzschlussfall zu  $R_{GES} = 1,17\ \Omega$ .



**5.2.1.2. Beispiel für eine Motorzuleitung**

Als Widerstand der Leiterschleife, bis zum Anschlusspunkt der Leitung, wurde  $R = 0,3 \Omega$  gemessen. Als Leitung soll ein NYM-J 4 x mm<sup>2</sup> verlegt werden, über die Länge von 31 m. Somit ist  $R = 0,3 \Omega$  und  $R_{Leitung}$ :

$$R_{Leitung} = \frac{2 \cdot L}{K \cdot A} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$= \frac{2 \cdot 31 \text{ m}}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} \cdot \left(1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \cdot 60 \text{ K}\right) = 0,91 \Omega$$

Der Gesamtwiderstand errechnet sich somit zu:

$$R_{Ges} = R + R_{Leitung} = 0,3 \Omega + 0,91 \Omega = 1,21 \Omega$$

Somit ergibt sich für den Widerstand der Leiterschleife im Kurzschlussfall zu  $R_{GES} = 1,21 \Omega$ .

**5.2.2. Ermittlung des Kurzschlussstromes, der auf der Leitung zum fließen kommt**

Es gibt viele Arten des Kurzschlusses. Für diesen Kurzschluss ist lediglich der Kurzschlussstrom von Bedeutung, der zum Fließen kommt bei einer Verbindung eines Außenleiters mit dem PE. Die Spannung ist hierbei  $U_0 = 230 \text{ V}$ .

Wie genau wird nun der Kurzschlussstrom  $I_K$  ermittelt? Lediglich mit einer einfachen Berechnung mit dem ohmschen Gesetz. Die Spannung ist bekannt mit  $U_0 = 230 \text{ V}$  und der Widerstand wurde ebenfalls ermittelt. Somit folgt daraus Formel 5.4:

$$I_K = \frac{U_0}{R_{Ges}} \quad (5.4)$$

**5.2.2.1. Beispiel für die Ermittlung des Kurzschlussstromes bei einer Herdzuleitung**

Wir greifen hier auf die Daten des Kapitel 5.2.1.1 zurück. Dort hatten wir bereits  $R_{GES} = 1,17 \Omega$  ermittelt. Wir setzen diesen Wert jetzt in Kapitel 5.4 ein und ermitteln den Kurzschlussstrom  $I_K$ .

$$I_K = \frac{U_0}{R_{Ges}} = \frac{230 \text{ V}}{1,17 \Omega} = 197 \text{ A}$$

Der Kurzschlussstrom der auf der Herdzuleitung zum Fließen kommt, beträgt  $I_K = 197 \text{ A}$ .

#### 5.2.2.2. Beispiel für die Ermittlung des Kurzschlussstromes bei einer Motorzuleitung

Wir greifen hier auf die Daten des Kapitel 5.2.1.2 zurück. Dort hatten wir bereits  $R_{GES} = 1,21 \Omega$  ermittelt. Wir setzen diesen Wert jetzt in Kapitel 5.4 ein und ermitteln den Kurzschlussstrom  $I_K$ .

$$I_K = \frac{U_0}{R_{Ges}} = \frac{230 \text{ V}}{1,21 \Omega} = 190 \text{ A}$$

Der Kurzschlussstrom der auf der Motorzuleitung zum Fließen kommt, beträgt  $I_K = 190 \text{ A}$ .

### 5.3. Abschaltzeit der Sicherung, Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 410

Die Abschaltzeit  $t$  nach VDE 0100 Teil 410 kann in Kapitel 2.4.1 ermittelt werden. Um die Abschaltzeit der Sicherung zu ermitteln (welche bereits nach Kapitel 3 ausgewählt wurde), ist es wichtig zu wissen welche Sicherung für den Kurzschlusschutz verwendet wird. Es gibt hierbei zwei grundlegende Möglichkeiten, auf die ich näher eingehen möchte.

#### 5.3.1. Abschaltzeit eines Leitungsschutzschalters

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, ist es wichtig zu wissen, bei welchem Strom der Leitungsschutzschalter sicher auslöst. Bei einem Leitungsschutzschalter der Kategorie B ist dies bei dem fünffachen des Nennstromes. Bei einem Leitungsschutzschalter der Kategorie C, wäre das bei dem zehnfachen des Nennstromes.

Wird dieser Nennstrom nun erreicht, so löst der Leitungsschutzschalter in der Zeit  $t_A \leq 0,01 \text{ s}$  aus. Bei einem Leitungsschutzschalter des Typs B 16 A müssen also mindestens 80 A Kurzschlussstrom  $I_K$  zum Fließen kommen (siehe Tabelle 2.1).

### 5.3.2. Abschaltzeit einer Schmelzsicherung des Typs gLgG

Auf dem Bild 2.6 sind die Kennlinie der Schmelzsicherungen zu sehen. Mit Hilfe eines einfachen Beispiels wird verdeutlicht, wie wir die Abschaltzeit ermitteln. Nachfolgend wird der Kurzschlussstrom und die Sicherung definiert. Auf dieses Basis ermitteln wir die Abschaltzeit.

Sicherung 25A gLgG

$$I_K = 200 \text{ A}$$

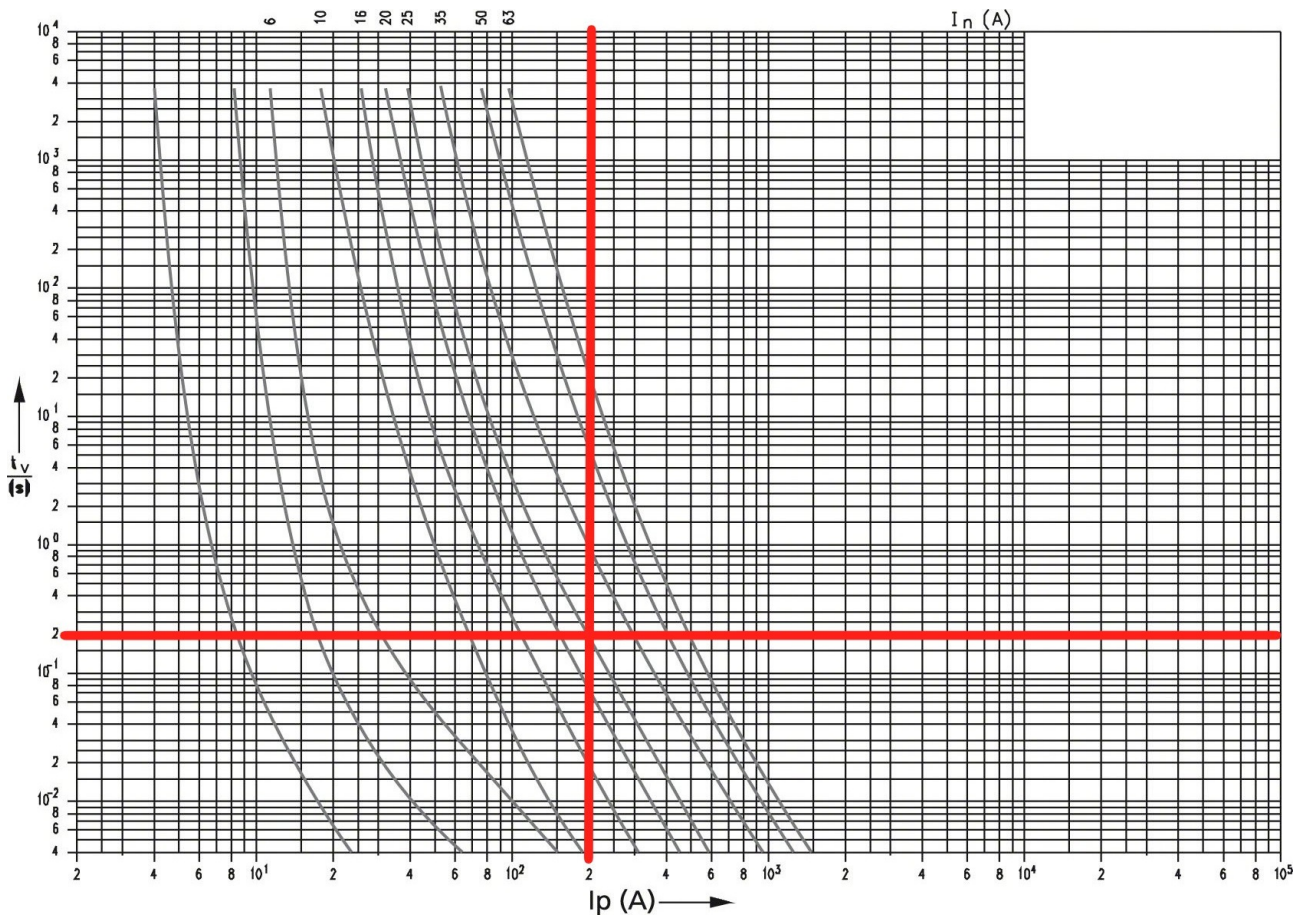


Abbildung 5.1.: Ermittlung der Abschaltzeit (von [1])

Wir markieren nun den Kurzschlussstrom von  $I_K = 200 \text{ A}$  und markieren den Schnittpunkt des Stromes mit der oberen Kennlinie unserer Sicherung. Aus dem Diagramm können wir somit einen Abschaltzeit von  $t_A = 0,2 \text{ s}$  ablesen.

## 5.4. Bedingungen nach VDE 0100 Teil 430

Es gibt zwei wichtige Bedingungen, die bei der Berechnung einzuhalten sind. Die erste Bedingung besagt, dass die Abschaltzeit der Sicherung gleich oder kleiner sein muss, als die zulässige Abschaltzeit. Die zweite Bedingung besagt, dass die Abschaltzeit der Sicherung gleich oder kleiner sein muss, als die erlaubte Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 410.

1. Bedingung

$$t_A \leq t_{VA} \quad (5.5)$$

2. Bedingung

$$t_A \leq t \quad (5.6)$$

### 5.4.1. Beispiel für eine Herdzuleitung

Nach Kapitel 5.2.2.1 wurde der Kurzschlussstrom bereits mit  $I_K = 197 \text{ A}$  ermittelt. Für die Herdzuleitung wurde bereits, nach Kapitel 3, eine Absicherung mit einem Leitungsschutzschalter Typ B 16 A gewählt. In Kapitel 4 wurde ein Querschnitt von  $A = 4,0 \text{ mm}^2$  ermittelt. In der Berechnung arbeiten wir mit  $A = 4,0 \text{ mm}^2$ , da dieser Querschnitt in den meisten Fällen für einen Herd ausreichend ist. Es wird nun geprüft, ob die Bedingungen eingehalten werden.

Ermittlung von  $t_{VA}$ :

$$t_{VA} = \left( \frac{k \cdot A}{I_K} \right)^2 = \left( \frac{115 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mm}^2} \cdot 2,5 \text{ mm}^2}{197 \text{ A}} \right)^2 = 2,13 \text{ s}$$

Die B 16 A Sicherung schaltet (siehe Kapitel 5) bei einem Strom von  $I_K \geq 80 \text{ A}$  in  $t_A \leq 0,01 \text{ s}$  ab.

Es handelt sich hier um einen Drehstromverbraucher und um einen Endstromkreis von 16 A. Daher ergeben sich, nach VDE 0100 Teil 410, zwei Abschaltzeiten. Wird die kleinere Abschaltzeit eingehalten, wird automatisch auch die größere eingehalten. Somit gilt für die Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 410:  $t = 0,07 \text{ s}$ .

Nun überprüfen wir die beiden Bedingungen:

1. Bedingung

$$t_A \leq t_{VA} \Rightarrow 0,01 \text{ s} \leq 2,13 \text{ s}$$

## 2. Bedingung

$$t_A \leq t \Rightarrow 0,01 \text{ s} \leq 0,07 \text{ s}$$

Wie wir erkennen, werden beide Bedingungen eingehalten. Der Querschnitt von  $A = 2,5 \text{ mm}^2$  wurde somit verifiziert.

**5.4.2. Beispiel für eine Motorzuleitung**

Nach Kapitel 5.2.2.2 wurde der Kurzschlussstrom bereits mit  $I_K = 190 \text{ A}$  ermittelt. Für die Motorzuleitung wurde bereits, nach Kapitel 3, eine Absicherung mit einer Schmelzsicherung Typ 10 A gL-gG errechnet. In Kapitel 4 wurde ein Querschnitt von  $A = 1,5 \text{ mm}^2$  ermittelt. Es wird nun geprüft, ob die Bedingungen eingehalten werden.

Ermittlung von  $t_{VA}$ :

$$t_{VA} = \left( \frac{k \cdot A}{I_K} \right)^2 = \left( \frac{115 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mm}^2} \cdot 1,5 \text{ mm}^2}{190 \text{ A}} \right)^2 = 0,83 \text{ s}$$

Für die Schmelzsicherung Typ 10A gL-gG ist eine Abschaltzeit von  $t_A = 0,004 \text{ s}$  ermittelt worden.

Es handelt sich hier um einen Motorstromkreis. Daher ergeben sich, nach VDE 0100 Teil 410, zwei Abschaltzeiten. Wird die kleinere Abschaltzeit eingehalten, wird automatisch auch die größere eingehalten. Somit gilt für die Abschaltzeit nach VDE 0100 Teil 410:  $t = 1 \text{ s}$ .

Nun überprüfen wir die beiden Bedingungen:

## 1. Bedingung

$$t_A \leq t_{VA} \Rightarrow 0,004 \text{ s} \leq 0,83 \text{ s}$$

## 2. Bedingung

$$t_A \leq t \Rightarrow 0,004 \text{ s} \leq 1 \text{ s}$$

Wie wir erkennen, werden beide Bedingungen eingehalten. Der Querschnitt von  $A = 1,5 \text{ mm}^2$  wurde somit verifiziert.

## 6. Spannungsfall

Das Thema Spannungsfall ist besonders wichtig bei einer Leitungsberechnung. Oft genug erleben wir die Auswirkungen einer schlecht dimensionierten Leitung. Jeder von uns kennt die folgende Situation. Wir kommen in einer älteren Wohnung an und setzen uns gemütlich auf das Sofa. Danach machen den Deckenfluter an, um den Raum mit einem angenehmen Licht zu fluten. Schalten wir nun den Fernseher an sehen wir sofort die Auswirkungen jener alten schlecht dimensionierten Leitung. Das Licht wird für einen kurzen Moment MERKLICH DUNKLER. Diese Situation ist besonders ärgerlich, wenn Verbraucher mit hohen Leistungen (Herd, Waschmaschine, Trockner, Geschirrspülmaschine) öfters eingeschaltet werden. Das Licht flackert und der gemütliche Abend ist dahin!

Aus diesem Grund ist das Thema Spannungsfall mit einer der wichtigsten Punkte. Hier geht es um die Kundenzufriedenheit nach der Verlegung unserer Leitung.

### 6.1. Grundlagen zum Spannungsfall

### 6.2. Grenzwerte und gesetzliche Bestimmungen

#### 6.2.1. Grenzwerte nach DIN 18015 Teil 1

**Der max. erlaubte Spannungsfall beträgt 3 % ab dem Zähler bis zur Anschlussstelle der Verbraucher.**

In der Praxis hat es sich leider durchgesetzt, den Spannungsfall zu vernachlässigen. Fakt ist, es sind max. 3 % erlaubt. Wird diese Grenze überschritten, so kann dies dazu führen, dass im Fehlerfall kein Versicherungsschutz mehr besteht und der Elektriker auf den Kosten sitzen bleibt.

Beispiel des Spannungsfalls in Verbindung mit einer UV:

Hauptverteilung mit Zähler  $\longrightarrow$  Unterverteilung  $\longrightarrow$  Anschlussstelle des Verbrauchers

Hauptverteilung mit Zähler  $\longrightarrow$  Unterverteilung = 1 % Spannungsfall

Unterverteilung  $\longrightarrow$  Anschlussstelle des Verbraucher = 2 % Spannungsfall

### 6.2.2. TAB

Die TAB aus Niedersachsen schreibt folgende Grenzwerte auf der Hauptleitung vor: (Hauptleitung = Hausanschlusskasten  $\longrightarrow$  Zähler).

Tabelle 6.1.: Spannungsfall nach TAB

Von	Bis	Spannungsfall
	100 kVA	0,5 %
100 kVA	250 kVA	1 %
250 kVA	400 kVA	1,25 %
400 kVA		1,5 %

### 6.2.3. VDE 0100 Teil 520

**Die VDE schreibt einen Grenzwert von 5 % für andere elektrische Verbraucher und 3% für Beleuchtung vor.**

Die 5 % sollten auch über die Verlängerungsleitungen ausgedehnt werden, die an den Steckdosen angeschlossen sind (Empfehlung VDE).

Das heißt: 5 % vom Hausanschlusskasten bis zum Endverbraucher inklusive seiner Zuleitung.

## 6.3. Formelsammlung

Es gibt verschiedenen Möglichkeiten, die Leitung, nach dem Spannungsfall, zu verifizieren. Man unterscheidet weiterhin, bei den Formeln, zwischen Wechselstrom und Drehstromverbrauchern. Weiterhin ist der Strom wichtig, welcher in der Berechnung zu verwenden ist. Wir orientieren uns an Kapitel 4.1 und benutzen die dort beschriebenen Ströme.

### 6.3.1. Formel für Wechselstromverbraucher

Berechnung des Spannungsfalles in %:

$$\Delta u = \frac{200 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot A \cdot U} \quad (6.1)$$

$$A = \frac{200 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot \Delta u \cdot U} \quad (6.2)$$

$L$  = Länge der Leitung

$I$  = Strom nach Kapitel 4.1

$\cos \varphi$  = Leistungsfaktor des Gerätes, welches an die Leitung angeschlossen wird

$A$  = Querschnitt der zu berechnenden Leitung

$K$  = Elektrische Leitfähigkeit der Leitung, bei Kupfer  $K = 56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega}$

$U$  = Spannung. Hier 230 V!

$\Delta u$  = Spannungsfall in %

### 6.3.2. Formeln für Drehstromverbraucher

Berechnung des Spannungsfalles in %:

$$\Delta u = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot A \cdot U} \quad (6.3)$$

$$A = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot \Delta u \cdot U} \quad (6.4)$$

$L$  = Länge der Leitung

$I$  = Strom nach Kapitel 4.1

$\cos \varphi$  = Leistungsfaktor des Gerätes, welches an die Leitung angeschlossen wird

$A$  = Querschnitt der zu berechnenden Leitung

$K$  = Elektrische Leitfähigkeit der Leitung, bei Kupfer  $K = 56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega}$

$U$  = Spannung. Hier 400 V!



$\Delta u$  = Spannungsfall in %

### 6.3.3. Beispiele zur Berechnung des Spannungsfalls

#### 6.3.3.1. Beispiel für eine Herdzuleitung

Die Länge der Herdzuleitung beträgt 20 m und sie ist mit einem Leitungsschutzschalter Typ B16 A abgesichert. Es wurden durch andere Berechnungen bereits ein Querschnitt von  $A = 2,5 \text{ mm}^2$  ermittelt. Wir ermitteln nun nach Formel 6.3 den auftretenden Spannungsfall:

$$\begin{aligned}\Delta u &= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot A \cdot U} \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 16 \text{ A} \cdot 20 \text{ m} \cdot 1}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 2,5 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ V}} = 1 \text{ \%}\end{aligned}$$

Der Spannungsfall hält alle Grenzwerte nach Kapitel 6.2 ein. Der Querschnitt  $A = 2,5 \text{ mm}^2$  wurde verifiziert.

#### 6.3.3.2. Beispiel für eine Motorzuleitung

Die Länge der Motorzuleitung beträgt 18 m. Der Motor wird direkt und ohne Steckvorrichtungen angeschlossen. Die Schmelzsicherung ist vom Typ 10 A gL-gG und der Betriebsstrom beträgt  $I = 4,6 \text{ A}$  und der Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,82$ . Als Zuleitung wurde ein Querschnitt von  $A = 1,5 \text{ mm}^2$  ermittelt. Nach Formel 6.3 gilt:

$$\begin{aligned}\Delta u &= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot A \cdot U} \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 4,6 \text{ A} \cdot 18 \text{ m} \cdot 0,82}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 1,5 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ V}} = 0,35 \text{ \%}\end{aligned}$$

Der Spannungsfall hält alle Grenzwerte nach Kapitel 6.2 ein. Der Querschnitt  $A = 1,5 \text{ mm}^2$  wurde verifiziert.

## 6.4. Spannungsfall für dein Handy

Hier kannst du dir die aktuelle App für dein iPhone runder laden:



## 7. Komplettbeispiele zur Leitungsberechnung

### 7.1. Beispiel für eine Motorzuleitung

Die Zuleitung zum Motor wird in der Industrie verlegt und wird direkt angeschlossen. Der Überstromschutz wird von einem Motorschutz übernommen. Die Zuleitung wird auf der Wand in Elektroinstallationsrohr verlegt und parallel liegen zwei weitere voll belastete Zuleitungen für andere Motoren in diesem Rohr. Die Leitungen sind gebündelt verlegt, wie es bei der Verlegung in Elektroinstallationsrohren üblich ist. Der Widerstand der Leiterschleife an der Anschlusselle wurde mit  $R = 0,4 \Omega$  ermittelt. Die Länge der verlegten Leitung beträgt 25 m.

$$I_{Ein} = 5 \cdot I_B$$

$$\cos \varphi = 0,82$$

$$U = 400 \text{ V}$$

$$P_{AB} = 2,1 \text{ kW}$$

$$t_{Ein} = 5 \text{ s}$$

$$\eta = 0,9$$

#### 7.1.1. Auswahl der Sicherung

$$I_B = \frac{P_{AB}}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} = \frac{2,1 \text{ kW}}{0,9 \cdot 0,82 \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}} = 4,2 \text{ A}$$

$$I_{EIN} = 5 \cdot I_B = 5 \cdot 4,2 \text{ A} = 21 \text{ A}$$

Mit den Werten  $I_{EIN} = 21 \text{ A}$  und  $t_{Ein} = 5 \text{ s}$  wird nach der Methode in Kapitel 2 eine Schmelzsicherung gewählt. Die gewählte Schmelzsicherung ist hier: gL-gG 10 A.

### 7.1.2. Überstromschutz

Der Überstromschutz wird von einem Motorschutzschalter übernommen. Dieser verhindert, dass kein Strom höher als der Betriebsstrom fließen kann. In diesem Fall entspricht der Betriebsstrom also dem Nennstromaufnahme des vorgeschalteten Überstromschutzvorrichtung. Aus dem Text erkennt man, dass hier eine Häufung mit drei Leitungen vorliegt.

$$I_{Nennstrom} = 4,2 \text{ A}$$

$$f(H) = 0,7$$

$$f(T) = 1,0$$

$$I_{Z.MIN} = \frac{I_{Nennstrom}}{f(H) \cdot f(T)} = \frac{4,2 \text{ A}}{0,7 \cdot 1,0} = 6 \text{ A}$$

Aus der Beschreibung wissen wir, dass es sich um einen Drehstromverbraucher handelt und die Leitung in Rohr verlegt wird. Daraus ergibt sich, dass wir in Tabelle 4.1 bei Verlegeart C  $\rightarrow$  3 belastete Adern unseren Querschnitt auswählen müssen. Wenn wir die Tabelle begutachten, so sehen wir einen Wert von  $I_{Z.Leitung} = 15 \text{ A}$  bei einem Querschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$ . Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

$$I_B \leq I_{N.Sicherung} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung}$$

$$4,2 \text{ A} \leq 4,2 \text{ A} \leq 15 \text{ A} \implies 6 \text{ A} \leq 15 \text{ A}$$

Diese Bedingung ist erfüllt mit einem Querschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$ .

Nach Kapitel 4.3.2 brauchen wir die 2. Bedingung nach VDE nicht zu prüfen.

**Ermittelter Querschnitt  $1,5 \text{ mm}^2$ .**

### 7.1.3. Kurzschlusschutz

Als Widerstand der Leiterschleife, bis zum Anschlusspunkt der Leitung, wurde  $R = 0,4 \Omega$  gemessen. Als Leitung soll eine NYM-J 4 x  $1,5 \text{ mm}^2$  verlegt werden über die Länge von 25 m.

Für den Widerstand der Leitung gilt:

$$R_{Leitung} = \frac{2 \cdot L}{K \cdot A} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$= \frac{2 \cdot 25 \text{ m}}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} \cdot \left( 1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \cdot 60 \text{ K} \right) = 0,74 \Omega$$

Daraus folgt für den Gesamtwiderstand:

$$R_{Ges} = R + R_{Leitung} = 0,4 \Omega + 0,74 \Omega = 1,14 \Omega$$

Der Kurzschlussstrom beträgt:

$$I_K = \frac{U_0}{R_{Ges}} = \frac{230 \text{ V}}{1,14 \Omega} = 202 \text{ A}$$

Nun kann die Zulässige Abschaltzeit  $t_{VA}$  ermittelt werden:

$$t_{VA} = \left( \frac{k \cdot A}{I_K} \right)^2 = \left( \frac{115 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mm}^2} \cdot 1,5 \text{ mm}^2}{202 \text{ A}} \right)^2 = 0,73 \text{ s}$$

Mit dem Kurzschlussstrom  $I_K = 202 \text{ A}$  und der Schmelzsicherung  $10 \text{ A gL-gG}$  wurde die Abschaltzeit, mit  $t_A = 0,004 \text{ s}$  ermittelt. Da es sich hierbei um einen Drehstromverbraucher und einen Endstromkreis von  $10 \text{ A}$  handelt, können wir aus Tabelle 2.3 die erlaubte Abschaltzeit ablesen. Da es zwei Werte gibt, wird der kleinere benutzt. Wird der kleine Wert eingehalten, wird der größere automatisch mit eingehalten. Somit ist  $t = 1 \text{ s}$ .

Nun überprüfen wir die beiden Bedingungen nach VDE 0100 Teil 430:

1. Bedingung

$$t_A \leq t_{VA} \Rightarrow 0,004 \text{ s} \leq 0,73 \text{ s}$$

2. Bedingung

$$t_A \leq t \Rightarrow 0,004 \text{ s} \leq 1 \text{ s}$$

**Ermittelter Querschnitt  $1,5 \text{ mm}^2$ .**

### 7.1.4. Spannungsfall

$$\Delta u = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot A \cdot U}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 4,2 \text{ A} \cdot 25 \text{ m} \cdot 0,82}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 1,5 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ V}} = 0,44 \%$$

Die erlaubten Grenzwerte werden eingehalten.

**Ermittelter Querschnitt 1,5 mm<sup>2</sup>.**

### 7.1.5. Abschlussbetrachtung

Alle Ermittlungen haben einen Querschnitt von 1,5 mm<sup>2</sup> verifiziert. Daher entscheiden wir uns, eine Leitung NYM-J 4 x 1,5 mm<sup>2</sup> zu verlegen.

## 7.2. Beispiel für die Zuleitung zu einem Herd

Es wird die Zuleitung zu einem Herd verlegt. Dieser Herd befindet sich in einem Privathaushalt. Parallel zu der Leitung des Herdes liegt die Zuleitung für die Geschirrspülmaschine sowie die Zuleitung für die Arbeitsteckdosen in der Küche. Alle drei Leitungen werden Unterputz verlegt. Die dauerhafte Verlegetemperatur liegt bei 25°C. Nach DIN 18015 Teil 1 muss die Herdzuleitung auf eine Nennbelastbarkeit von 20 A ausgelegt werden. Die Länge der Zuleitung beträgt 21 m. Der Widerstand an der Anschlussstelle der Unterverteilung beträgt  $R = 0,8 \Omega$  im TN-Netz. Die Leistung des Herdes ist mit  $P = 11 \text{ kW}$  angegeben.

### 7.2.1. Auswahl der Sicherung

$$I_B = \frac{P_{ZU}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = \frac{11 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 15,9 \text{ A}$$

Für den Herd wird eine B 16 A Sicherung gewählt. Da bei einem solchem Verbraucher keine hohen Einschaltströme zu erwarten sind.

### 7.2.2. Überstromschutz

Für den Überstromschutz ist die gewählte B 16 A Sicherung zuständig. Da aber die Forderung für eine Belastbarkeit von 20 A besteht, muss diese Leitung auf diesen Strom ausgelegt sein. Es kann nun in der Geschirrspülmaschine Geschirr gespült werden, Belastung der Leitung 30 % - 40 %. Gleichzeitig wird mittels eines Wasserkochers Wasser erhitzt um es beim Kochen zu benutzen oder Tee auf zu brühen, Belastung der Leitung 50 % - 60 %. Zusätzlich wird auf dem Herd das Mittagessen zubereitet, Belastung der Leitung auch gute 50 %. Hier bei kommen wir auf eine Häufung von 2 zusätzlichen Leitungen.

$$I_{Nennstrom} = 20 \text{ A}$$

$$f(H) = 0,7$$

$$f(T) = 1,06$$

$$I_{Z.MIN} = \frac{I_{Nennstrom}}{f(H) \cdot f(T)} = \frac{20 \text{ A}}{0,7 \cdot 1,06} = 27 \text{ A}$$

Die Zuleitung zum Herd muss also eine Mindestbelastbarkeit von 27 A aufweisen.

Wie wir bereits wissen muss  $I_{Z.Leitung}$  mindestens so groß sein, oder größer sein als  $I_{Z.MIN}$ . Die genannte Unterputzverlegung entspricht Verlegeart C. Des Weiteren handelt es sich bei einem Herd um einen Drehstromverbraucher, also werden 3 Adern belastet. Daher wird bei C  $\rightarrow$  3 belasteten Adern, der notwendige Strom ermittelt. Wenn wir die Tabelle begutachten, sehen wir einen Wert von  $I_{Z.Leitung} = 32 \text{ A}$  bei einem Querschnitt von  $4 \text{ mm}^2$ . Überprüfen wir nun die Bedingung nach VDE:

$$I_B \leq I_{N.Sicherung} \leq I_{Z.Leitung} \implies I_{Z.MIN} \leq I_{Z.Leitung}$$

$$15,6 \text{ A} \leq 16 \text{ A} \leq 32 \text{ A} \implies 27 \text{ A} \leq 32 \text{ A}$$

Diese Bedingung ist erfüllt mit einem Querschnitt von  $4 \text{ mm}^2$ .

Nach Kapitel 4.3.2 brauchen wir die 2. Bedingung nach VDE nicht zu prüfen.

**Ermittelter Querschnitt  $4 \text{ mm}^2$ .**

### 7.2.3. Kurzschlusschutz

Als Widerstand der Leiterschleife, bis zum Anschlusspunkt der Leitung, wurde  $R = 0,8 \Omega$  gemessen. Als Leitung soll eine NYM-J 5 x 4 mm<sup>2</sup> verlegt werden über die Länge von 21 m.

Für den Widerstand der Leitung gilt:

$$\begin{aligned} R_{Leitung} &= \frac{2 \cdot L}{K \cdot A} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \\ &= \frac{2 \cdot 21 \text{ m}}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega}} \cdot \left( 1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \cdot 60 \text{ K} \right) = 0,23 \Omega \end{aligned}$$

Daraus folgt für den Gesamtwiderstand:

$$R_{Ges} = R + R_{Leitung} = 0,8 \Omega + 0,23 \Omega = 1,03 \Omega$$

Der Kurzschlussstrom beträgt:

$$I_K = \frac{U_0}{R_{Ges}} = \frac{230 \text{ V}}{1,03 \Omega} = 223 \text{ A}$$

Nun kann die Zulässige Abschaltzeit  $t_{VA}$  ermittelt werden:

$$t_{VA} = \left( \frac{k \cdot A}{I_K} \right)^2 = \left( \frac{115 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \text{ mm}^2}{223 \text{ A}} \right)^2 = 4,3 \text{ s}$$

Mit dem Kurzschlussstrom  $I_K = 223 \text{ A}$  und dem Leitungsschutzschalter B 10 A wurde die Abschaltzeit, mit  $t_A = 0,01 \text{ s}$  ermittelt. Da es sich hierbei um einen Drehstromverbraucher und einen Endstromkreis von 16 A handelt, können wir aus Tabelle 2.3 die erlaubte Abschaltzeit ablesen. Da es zwei Werte gibt, wird der kleinere benutzt. Wird der kleine Wert eingehalten, wird der größere automatisch mit eingehalten. Somit ist  $t = 0,2 \text{ s}$ .

Nun überprüfen wir die beiden Bedingungen nach VDE 0100 Teil 430:

1. Bedingung

$$t_A \leq t_{VA} \Rightarrow 0,01 \text{ s} \leq 4,3 \text{ s}$$

2. Bedingung

$$t_A \leq t \Rightarrow 0,01 \text{ s} \leq 0,2 \text{ s}$$

**Ermittelter Querschnitt 4 mm<sup>2</sup>.**



### 7.2.4. Spannungsfall

Hierbei ist zu beachten, dass die Leitung auf eine Belastbarkeit von 20A aufzulegen ist. Deswegen muss hier mit den angegebenen 20A gerechnet werden!

$$\begin{aligned}\Delta u &= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L \cdot \cos \varphi}{K \cdot A \cdot U} \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 20 \text{ A} \cdot 21 \text{ m} \cdot 1}{56 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2 \cdot \Omega} \cdot 4 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ V}} = 0,81 \%\end{aligned}$$

Die erlaubten Grenzwerte werden eingehalten.

**Ermittelter Querschnitt 4 mm<sup>2</sup>.**

### 7.2.5. Abschlussbetrachtung

Alle Ermittlungen haben einen Querschnitt von 4 mm<sup>2</sup> verifiziert. Daher entscheiden wir uns, eine Leitung NYM-J 5 x 4 mm<sup>2</sup> zu verlegen.

# Literaturverzeichnis

- [1] HAGER, 10.April 2012, URL <http://www.hager.de/>. (document), 2.1, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 3.1, 5.1

Teil III.

Anhang

## A. Versionen

- **Version 1.0:** Erste Version des Dokuments. Dieses wurde mit MS-Word erstellt.
- **Version 1.1 - 1.4:** Diverse Fehlerbehebungen.
- **Version 1.5:** Das Dokument wurde von MS Office 2003 für Windows auf MS Office 2008 für Mac ungeschrieben. Dabei ist das Kapitel mit den Oberwellen hinzugekommen. Einige Fehler wurden dabei behoben.
- **Version 2.0:**
  - Neuschaffung des Dokumentes Leitungsberechnung mit L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Grundlage war die Version 1.5 der Leitungsberechnung.pdf.
  - Hinzugefügt wurde die Tabelle 4.2 zum Thema Belastbarkeit von Kabel und Leitungen in der Erde.
  - Diverse Fehler der Version 1.5 wurden beseitigt.
  - Das Kapitel 7 Oberwellen wurde entfernt und in eine eigene Datei ausgelagert.
- **Version 2.0.1 - 2.0.5:** Diverse Fehlerbehebungen.
- **Version 2.1:**
  - Diverse Fehlerbehebungen.
  - Kapitel A ergänzt, damit die Entwicklung des Programms nachverfolgt werden kann.
  - Kapitel 1 wurde ergänzt. Hiermit soll es möglich sein einfach Leitungen zu dimensionieren ohne Berechnung! Die gängigsten Parameter werden in Tabellen festgehalten und der richtige Querschnitt muss nur noch in den Tabellen ermittelt werden!
- **Version 2.2:**
  - Neues Logo eingeführt für die Leitungsberechnung! Mein besonderer Dank geht an die Designerin Julia Eggeling!

- Überarbeitung des Deckblatts
- Überarbeitung der Kopfzeile
- Kapitel 2 überarbeitet
- Kleine Fehler beseitigt
- **Version 2.2.1:** Das Deckblatt wurde um den Link zur Webseite ergänzt!
- **Version 3.0:**
  - Die Schnellauswahl wurde an den Anfang gestellt
  - Die Tabellen für Belastbarkeit, Häufung und Temperatur wurden in die passenden Kapitel verschoben
  - Das Kapitel 2.2 wurde hinzugefügt, zum Thema Leitungsschutzschalter
  - Das Kapitel 2.3 wurde hinzugefügt, zum Thema Schmelzsicherungen
  - Das Kapitel 3.3 wurde hinzugefügt, zum Thema Selektivität bei der Auswahl von Sicherungen
- **Version 3.1:**
  - Einheiten werden einheitlich mit Leerzeichen und nicht kursiv dargestellt
  - Fehlende Verweise in den Bildern von Hager hinzugefügt
  - Fehler in der Normung der Achsen von den Diagrammen beseitigt
  - Diverse Verbesserungen am Layout
  - Hinweis hinzugefügt, dass es sich um Leitungen aus Kupfer handelt
  - Diverse kleine Fehlerkorrekturen
- **Version 3.2:**

Diverse Fehlerkorrekturen
- **Version 4.0:**
  - Neugestaltung von Kapitel 6
  - Neues Icon auf der ersten Seite
  - Diverse Fehlerkorrekturen