



**Bild 2.4:** Thermisches Ersatzschaltbild und Temperaturprofil eines Kabels

Wird diese Gleichung in längenbezogener Schreibweise dargestellt, so ergibt sich als Verlustleistung pro Längeneinheit, d. h. als längenbezogene Verlustleistung  $P'_V$ :

$$P'_V = I^2 \cdot R' \quad (2.5)$$

Anschaulich besagt diese Gleichung, dass je Meter des Kabelstücks eine Verlustleistung von beispielsweise 50 W an die Umgebung abgeführt werden muss. Diese Verlustleistung stellt einen Wärmestrom dar, der in Bild 2.4 mit  $I_{\text{therm}}$  bezeichnet ist. Der Wärmestrom verursacht an den thermischen Wärmeübergangswiderständen quasi einen thermischen Spannungsfall, der als Temperaturdifferenz erfasst wird.

Der Wärmewiderstand der Kabelisolation ist in Bild 2.4 mit  $R_{\text{Iso\_therm}}$  bezeichnet.  $R_{\text{Umgebung\_therm}}$  kennzeichnet den Wärmeübergangswiderstand vom Kabel zur Umgebung.

Deutlich wird in dieser Betrachtung, dass die resultierende Kabeltemperatur  $\vartheta_{\text{Kabel}}$  entscheidend durch den Wärmeübergangswiderstand vom Kabel zur Umgebung bestimmt wird. Ein schlechter Wärmeübergang führt zu erhöhten Kabeltemperaturen.

Vergleichbar entwickelt sich die Temperatur am Leiter  $\vartheta_{\text{Leiter}}$ . Die verwendete Kabelisolation bestimmt die zulässige Maximaltemperatur am Leiter. Diese beträgt beispielsweise für den Isolierstoff PVC 70 °C oder für den Isolierstoff XLPE (VPE) 90 °C.

Da die maximale Leitertemperatur somit vorgegeben wird, darf in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\text{Umgebung}}$  und vom Wärmeübergangswiderstand  $R_{\text{Umgebung\_therm}}$  ein maximaler Wärmestrom und damit eine maximale elektrische

Verlustleistung im Kabel nicht überschritten werden, um eine unzulässige Erwärmung des Kabels ausschließen zu können.

Allerdings gilt diese Betrachtungsweise auch in die umgekehrte Richtung: Wird der Wärmeübergangswiderstand  $R_{\text{Umgebung\_therm}}$  verringert, reduziert sich der Temperaturanstieg gegenüber der Umgebung, was zu einer reduzierten Leitertemperatur führt. Entsprechendes gilt für eine Reduzierung der Umgebungstemperatur.

Das in Bild 2.4 dargestellte Temperaturprofil spiegelt den Zusammenhang aus Wärmestrom und Wärmeübergangswiderständen anschaulich wider. Der Zusammenhang mit dem ohmschen Gesetz ( $U = R \cdot I$ ) und damit die Analogie zwischen thermischem und elektrischem Strömungsfeld ist unverkennbar.

Wird der Wärmeübergangswiderstand verschlechtert, da z. B. Kabel unerwartet mit weiteren, ebenfalls stark ausgelasteten Kabeln in einer gemeinsamen Kabelwanne verlegt sind, so erhöht sich die Temperatur am Leiter.

Die Strombelastbarkeit des Kabels  $I_z$  verringert sich unter diesen Umständen. Da der Planer die Strombelastbarkeit jedoch unter Berücksichtigung des Betriebsstroms ausgewählt haben dürfte, kann auf diese Weise der Betriebsstrom die Strombelastbarkeit übersteigen, was entsprechend Bild 2.2 zu einer Reduzierung der Lebensdauer, in extremeren Fällen auch zur Brandentstehung führen kann.

Aus diesen Gründen wird in den einschlägigen VDE-Bestimmungen, z. B. [27], [29], derartigen Einflüssen durch so genannte Reduktionsfaktoren Rechnung getragen. Eine kompakte Darstellung zur Kabelauswahl findet sich auch in [30].

## 2.2.1 Gefährdung durch Überlast

Die Festlegung der Strombelastbarkeit erfolgt über die Definition einer maximal zulässigen Temperatur am Leiter. Diese Temperatur beträgt 70 °C bei PVC- bzw. 90 °C bei XLPE-Kabeln, stellt jedoch in der Art und Weise ihrer Festlegung bereits eine Vereinfachung dar. Zwar ist beim Überschreiten dieser Grenztemperatur von einer beschleunigten Alterung auszugehen, allerdings setzen diese Alterungsprozesse nicht abrupt beim Überschreiten dieser Grenztemperatur ein.

Wesentliche VDE-Bestimmung für die Auslegung von Kabelanlagen ist in diesem Zusammenhang [27], wobei auch [31] zumindest in Deutschland noch Anwendung findet.

Für die im Weiteren zu betrachtende Dimensionierung des Schutzes ist zu prüfen, ob eine geringfügige Überschreitung in der konkreten Anwendung tatsächlich zu einer unzulässigen Reduzierung der Lebensdauer führt oder unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Planung nicht sogar möglich oder gar geboten ist.

Im Einzelfall kann beispielsweise anhand der Aufstellung gemäß Tabelle 2.3 abgeschätzt werden, ob tatsächlich eine unzulässige Einschränkung der Lebensdauer zu erwarten ist. Grundlage für diese Darstellung bildet die Arrhenius-Funktion. Insbesondere bei Anlagen, welche von vorneherein für eine begrenzte Lebensdauer ausgelegt werden, mag eine derartige Überlegung technisch gerechtfertigt und wirtschaftlich interessant sein.

**Tabelle 2.3:** Lebensdauer als Funktion der Betriebstemperatur für PVC-Kabel [32]

maximale Betriebstemperatur des Kabels	Lebensdauer
70 °C	30 Jahre
73 °C	20 Jahre
78 °C	10 Jahre
84 °C	5 Jahre
88 °C	3 Jahre
98 °C	1 Jahr

Im Langzeitbereich der Grenzbelastungskennlinie nach Bild 2.3 herrschen stationäre Bedingungen, bei denen erzeugte und abgeführte Wärme sich im Gleichgewicht befinden und die zulässige Grenztemperatur nicht überschritten wird. Mit zunehmender Überlastung des Kabels wird diese Grenztemperatur immer weiter überschritten. Zwar ist qualitativ dieser Zusammenhang einleuchtend, quantitativ ist eine Bestimmung der Lebensdauer – insbesondere im Bereich geringer Überlastungen – allerdings nur näherungsweise möglich.

Eine Berechnung der Betriebstemperatur kann unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Strombelastbarkeit  $I_z$  eines Kabels erfolgen. Bei einer nach Norm ermittelten Strombelastbarkeit ist vom Erreichen der maximalen Betriebstemperatur – z. B. 70 °C für ein PVC-Kabel – auszugehen.

Der Betriebsstrom  $I_b$  des Kabels wird üblicherweise kleiner, maximal jedoch gleich der Strombelastbarkeit  $I_z$  des Kabels sein. Da die Erwärmung proportional zur Verlustleistung und damit zum Quadrat des Stroms erfolgt, lässt sich die zu erwartende Übertemperatur  $\Delta\vartheta$  bei stationärer Belastung näherungsweise berechnen zu:

$$\Delta\vartheta = 40\text{K} \cdot \left(\frac{I_b}{I_z}\right)^2 \quad (2.6)$$

Wird diese Übertemperatur zur Umgebungstemperatur addiert, ergibt sich die Betriebstemperatur des Kabels.

Dieser Rechenweg erscheint unter Berücksichtigung von Zeit- und Kostendruck nur bedingt umsetzbar. Empfehlenswert ist stattdessen die Verwendung softwaregestützter Werkzeuge.

Für eine Zeitdauer von bis zu einer Stunde darf eine Überlastbarkeit des Kabels von bis zu 45 % angesetzt werden.

## 2.2.2 Gefährdung durch Kurzschluss

Typisch für einen Kurzschluss sind die niedrige Impedanz der Fehlerstelle und der daraus resultierende hohe Kurzschlussstrom.

Dieser hohe Kurzschlussstrom bewirkt eine starke Erwärmung der Betriebsmittel. Vereinfachend wird für diesen Belastungsfall eine adiabate oder auch adiabatische Erwärmung unterstellt, bei welcher die gesamte zugeführte Wärmeenergie im Leiter verbleibt und keine Wärmeabfuhr an die Umgebung erfolgt. Bei einer Kurzschlussdauer von bis zu etwa 5 Sekunden, entsprechend etwa dem 10-fachen Wert der Strombelastbarkeit  $I_z$ , ist die Berechtigung für diese Annahme auch unter Bezugnahme auf [16] gegeben.

Während dieser Kurzschlussdauer bewirkt die im Kabel entsprechend Gleichung (2.5) umgesetzte Verlustleistung einen Energieeintrag in das Kabel, der zu einem Temperaturanstieg führt. Bei bekannter Temperatur des Kabels zum Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts (Anfangstemperatur), bekannter maximal zulässiger Grenztemperatur des Kabels (Endtemperatur)<sup>4</sup> sowie dem spezifischen Widerstand und der spezifischen Wärmekapazität des Leitermaterials wäre eine Berechnung des maximal zulässigen Energieeintrags und damit der maximal zulässigen Ausschaltzeit für ein Schutzgerät grundsätzlich möglich. Aus praktischer Sicht ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass der Wärmeeintrag über die Verlustleistung bestimmt wird und der Widerstand des Kabels sich mit zunehmender Kurzschlussdauer erhöht.

Aus Gleichung (2.5) folgt für den längenbezogenen Energieeintrag während der Kurzschlussdauer  $W'_{KS}$  und die Kurzschlussdauer  $t_k$  der Zusammenhang

$$W'_{KS} = \int_0^{t_k} I^2 \cdot R(\vartheta)' \cdot dt \quad (2.7)$$

Da der Widerstand pro Längeneinheit  $R'$  von der Temperatur  $\vartheta$  abhängig ist, kann Gleichung (2.7) nicht ohne weiteres nach der Kurzschlussdauer  $t_k$  aufgelöst werden.

Wohl nicht zuletzt aus diesem Grund hat sich in der Praxis die ersatzweise Verwendung des  $I^2 \cdot t$ -Werts eingebürgert. Dieser Wert stellt quasi ein Äquivalent zum Ener-

<sup>4</sup> Die zulässige Grenztemperatur soll 160 °C bei weichgelöteten Leiterverbindungen und 200 °C bei verzinneten Leitern nach [27] nicht überschreiten. Als zulässige Endtemperatur gibt [16] für PVC-isolierte Kabel einen Wert von 160 °C für Querschnitte bis zu 300 mm<sup>2</sup> an.

gieeintrag in das Kabel dar. Wird für den Strom  $I$  der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom  $I_{\text{th}}$  verwendet, so stellt der Term  $I_{\text{th}}^2 \cdot t$  den Energieeintrag in das Kabel während der Kurzschlussdauer dar.

Kurzschlussströme müssen grundsätzlich in einer Zeit unterbrochen werden, bei der die Isolierung der Leiter nicht die erlaubte Grenztemperatur überschreitet. Für den maximal zulässigen Energieeintrag in das Kabel wird ein Term  $k^2 \cdot S^2$  definiert. Dabei stellt  $k$  einen Materialkoeffizienten und  $S$  den Leiterquerschnitt dar.

Da der Energieeintrag in das Kabel beim Kurzschluss kleiner sein muss als dieser maximal zulässige Grenzwert, ergibt sich daraus die Ungleichung

$$I_{\text{th}}^2 \cdot t_{\text{k}} < k^2 \cdot S^2 \quad (2.8)$$

Für die zulässige Kurzschlussdauer folgt durch Umformung von Gleichung (2.8):

$$t_{\text{k}} < \left( \frac{k \cdot S}{I_{\text{th}}} \right)^2 \quad (2.9)$$

mit

- $t_{\text{k}}$  maximal zulässige Ausschaltzeit in [s]
- $S$  Leiterquerschnitt in [mm<sup>2</sup>]
- $I_{\text{th}}$  thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom in [A]
- $k$  Materialkoeffizient in [A√s/mm<sup>2</sup>]

Für den Materialkoeffizienten  $k$  gilt entsprechend [16]:

- $k = 115 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$  für PVC-isolierte Kupferleiter
- $k = 115 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$  bei Weichlotverbindungen in Kupferleitern
- $k = 141 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$  für gummiisolierte Kupferleitungen
- $k = 76 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$  für PVC-isolierte Aluminiumleiter

Weitere Werte für den Materialkoeffizienten  $k$  finden sich in [33]<sup>5</sup>. Dieses Berechnungsverfahren ist auch als Näherung in [16] eingeführt.

## 2.3 Motoren

Für Pumpen und Lüfter kommen aus Kostengründen häufig Asynchronmaschinen zur Anwendung. Deren Wirkungsweise beruht darauf, dass bei Anschluss an das Drehstromsystem die drei Ständerwicklungen eine magnetische Durchflutung aufbauen, die sich als eine Grundwelle über den Läufer rotierend ausbildet.

Die Drehzahl dieser Grundwelle ist abhängig von der Polpaarzahl  $p$  der Maschine. Eine Polpaarzahl  $p = 1$  bedeutet, dass die drei Ständerwicklungen über 360° und

<sup>5</sup> Anhang A