

# Stromtragfähigkeitsgrenzen von elektrischen Leitungssystemen

Situation, Hintergründe und Konsequenzen

Diplomarbeit



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
Technische Universität Graz

Betreuer

Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hansjörg Hauer  
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Jürgen Fabian

Vorgelegt von Bernd Künstl

Institutsleiter: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I  
Telefon: (+43 316) 873 – 7401  
Telefax: (+43 316) 873 – 7408  
<http://www.ihs.tugraz.at>  
<http://www.tugraz.at>

Graz / November - 2011



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

## **Danksagung**

*Ich möchte an dieser Stelle dem Institutsvorstand Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr für Seine Unterstützung und Sein Interesse an dieser Arbeit danken. Durch Ihn wurde es mir ermöglicht, dieses Thema aufzugreifen und ausführlich zu behandeln.*

*Besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hansjörg Hauer aussprechen, der mich auf diese interessante Aufgabenstellung aufmerksam gemacht hat. Sein umfangreiches fachliches Wissen sowie Seine wertvolle Beratung und Betreuung hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.*

*Großer Dank gebührt auch Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Jürgen Fabian für die organisatorische und moralische Unterstützung sowie Seine ausgezeichnete Betreuung. Er hat mich stets mit gutem Rat und fundiertem Wissen unterstützt und hatte immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Probleme.*

*Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei der Firma AMSC Windtec GmbH und dem gesamten Electrical Power Systems Team für die fachliche und praktische Unterstützung bei der Durchführung des Abschnitts „Technische Anwendbarkeit von Stromschiensystemen in Windkraftanlagen“ meiner Diplomarbeit.*

*Ein großer Dank gebührt auch meinen langjährigen Freunden und Studienkollegen, die mich während meiner Studienzeit stets kameradschaftlich und hilfsbereit begleitet haben und auch in schwierigen Zeiten zu mir standen.*

*Ich möchte diese Arbeit ganz besonders meiner Familie und meiner Freundin Katharina widmen, die mir auf jede erdenkliche Weise Unterstützung gaben und mich durch alle Höhen und Tiefen begleitet haben. Ohne euren Rückhalt und euer Vertrauen hätte ich diese schöne Zeit nie erlebt.*

Graz, November 2011

Bernd Künstl

## **Kurzfassung**

Durch die Liberalisierung des europäischen Strommarktes und den stetig steigenden Bedarf an elektrischer Energie, versuchen Erzeuger und Händler ihr Produkt, den elektrischen Strom, möglichst gewinnbringend abzusetzen. Durch den harten Wettbewerb sind die Unternehmen gezwungen ihre elektrischen Betriebsmittel und Anlagen möglichst effizient und ökonomisch einzusetzen und gelangen dabei immer öfter an die Grenzen der Belastbarkeit. Durch Einsparungen an Platz und Werkstoffen, werden immer häufiger Reserven für Einflüsse abgebaut, welche im Vorfeld nicht (ausreichend) berücksichtigt/beachtet wurden oder noch nicht bekannt sind. Mit zunehmender Auslastung, steigen auch die Beanspruchungen durch den Strom. Betriebsmittel werden durch die Wirkung des Betriebs- und Fehlerstroms thermisch und elektrodynamisch beansprucht. Dabei dürfen zulässige Werkstoffgrenzwerte nicht überschritten werden, um die Funktionssicherheit und die Personensicherheit nicht zu gefährden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Ursache und der Entstehung von strombedingten Beanspruchungen auf Betriebsmittel der Energietechnik. Es werden die physikalischen Auswirkungen auf elektrische Leiter, Isolatoren, Kontakte und Anlagenteile beschrieben und die Bestimmung sowie Festlegung zulässiger Beanspruchungsgrenzen erläutert. Um einen praktischen Bezug herzustellen, wird die technische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen analysiert und eine Gegenüberstellung mit vergleichbaren Kabelinstallationen angestellt.

Schlüsselwörter:

Stromtragfähigkeit, Hochstromtechnik, Schaltgeräte, Beanspruchungsgrenzen, thermische Strombelastungen, elektromagnetische Kräfte, Schienenverteilssysteme

## **Abstract**

Through the liberalization of the European energy market and the steadily increasing demand for electric power, producers and traders try to sell their product, the electric current, most profitably. Due to the fierce competition, companies try to use their electrical equipment and installations as efficiently and economically as possible and get it more often to the load capacity. By savings in space and materials reserves, which were not being pre-considered or pre-proved enough, are often reduced. With increasing load, the stresses increase with the electric current. Electrical equipments are stressed by the effects of the operation and the fault current in a thermal and electro-dynamic way. Rated material limits must not be exceeded in order to not endanger the functional safety and the safety of people. The aim of this paper is the discussion of the cause and genesis of loads on equipment for power engineering caused by the electric current. It describes the physical effects on electrical conductors, insulators, contacts and system components, and elucidates the determination and definition of allowed stress limits. To provide a practical relation, the technical applicability of busbar trunking systems in wind energy converters will be analyzed and a comparison with comparable cable installations will be given.

### Keywords:

Current load capacity, high-current technology, switching devices, stress limits, thermal current load, electromagnetic forces, busbar trunking systems

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Beanspruchungen im Elektroenergiesystem.....</b>	<b>13</b>
3.1	Beanspruchungen durch den Strom .....	14
3.2	Stromverdrängung in elektrischen Leitern.....	15
3.2.1	Der Haut- oder Skineffekt .....	15
3.2.2	Der Nah- oder Proximityeffekt.....	17
3.2.3	Der Stromverdrängungsfaktor.....	18
<b>4</b>	<b>Thermische Beanspruchungsgrenze .....</b>	<b>20</b>
4.1	Thermische Vorgänge in elektrischen Anlagen.....	20
4.1.1	Wärmequellen .....	20
4.1.1.1	Stromwärmeverluste.....	20
4.1.1.2	Magnetische Verluste .....	22
4.1.1.3	Dielektrische Verluste.....	22
4.1.1.4	Sonnen- und Himmelsstrahlung.....	23
4.1.2	Wärmespeicherung.....	23
4.1.3	Wärmeübertragung.....	24
4.1.3.1	Wärmeleitung .....	24
4.1.3.2	Konvektive Wärmeübertragung .....	25
4.1.3.3	Wärmestrahlung .....	27
4.2	Thermische Beanspruchungsgrenze bei Langzeitbeanspruchung .....	30
4.2.1	Erwärmungsberechnung von Stromleitern .....	30
4.2.1.1	Erwärmungsberechnung über die Leistungsbilanz.....	30
4.2.1.2	Erwärmungsberechnung in Wärmenetzwerken.....	34
4.2.2	Thermische Beanspruchung von Leiterwerkstoffen .....	35
4.2.2.1	Leiterwerkstoffe und ihre Eigenschaften .....	35
4.2.2.2	Wärmedehnung .....	39
4.2.2.3	Thermomechanische Spannungen .....	40

4.2.2.4	Einfluss der Temperatur auf die mechanische Festigkeit .....	41
4.2.2.5	Das Werkstoffkriechen.....	42
4.2.2.6	Materialermüdung.....	43
4.2.3	Thermische Beanspruchung von Isolierwerkstoffen .....	44
4.2.3.1	Aufgaben und Arten von Isolierstoffen .....	44
4.2.3.2	Thermische Wirkung auf gasförmige und flüssige Isolierstoffe.....	45
4.2.3.3	Thermische Wirkung auf Feststoffisolierungen .....	45
4.2.4	Thermische Beanspruchung von elektrischen Kontakten.....	49
4.2.4.1	Grundlagen elektrischer Kontakte.....	49
4.2.4.2	Erwärmung elektrischer Kontakte .....	55
4.2.4.3	Schweißverhalten strombelasteter ruhender Kontakte.....	57
4.2.4.4	Langzeitverhalten von Kontakten.....	59
4.2.4.5	Materialien und Anwendungen ruhender elektrischer Kontakte .....	61
4.3	Thermische Beanspruchungsgrenze bei Kurzzeitbeanspruchung.....	63
4.3.1	Kurzschlussenergie von Stromleitern.....	63
4.3.2	Ermittlung der thermischen Kurzschlussfestigkeit .....	65
4.3.3	Thermische Kurzzeitbeanspruchung von Leiterwerkstoffen .....	67
4.3.4	Thermische Kurzzeitbeanspruchung von Isolierwerkstoffen.....	67
4.3.5	Thermische Kurzzeitbeanspruchung von Kontakten .....	68
4.3.5.1	Beanspruchung durch den Lichtbogen .....	69
4.3.5.2	Lichtbogenabbrand.....	71
4.3.5.3	Verschweißen von einschaltenden Kontaktstücken .....	72
4.3.5.4	Verschweißen von geschlossenen Kontaktstücken .....	73
4.3.5.5	Veränderung des Kontaktwiderstands .....	74
4.3.5.6	Beanspruchungen und Anforderungen an Kontaktwerkstoffe für schaltende Kontakte .....	75

## **5 Elektrodynamische Beanspruchungsgrenze..... 76**

5.1	Kräfte im elektromagnetischen Feld.....	76
5.2	Mechanische Beanspruchungen elektrischer Anlagen.....	79
5.2.1	Auftretende Belastungen im Betrieb .....	79
5.2.2	Mechanische Spannungen in biegesteifen Leitern.....	81
5.2.3	Kraftwirkung auf biegesteife Leiter und deren Stützpunkte .....	83

5.2.4	Kraftverteilung an Krümmungen .....	85
5.2.5	Bestimmung der maßgeblichen Kennfrequenz von Leitern .....	85
5.2.6	Auslegung von Leiterseilen und Kabeln .....	86
5.3	Elektromechanische Beanspruchung von Leiterwerkstoffen .....	87
5.3.1	Plastische Verformungen.....	87
5.3.2	Materialermüdung.....	88
5.4	Elektromechanische Beanspruchung von Isolierwerkstoffen.....	88
5.5	Elektromechanische Beanspruchung von Kontakten .....	89
<b>6</b>	<b>Technische Gesichtspunkte.....</b>	<b>91</b>
6.1	Genormte Spannungen und Ströme .....	91
6.1.1	IEC-Normspannungen .....	91
6.1.2	IEC-Normwerte für Bemessungsströme.....	92
6.2	Netzebenen in Österreich .....	93
6.3	Betriebsströme .....	93
6.4	Kurzschlussströme .....	94
6.4.1	Kurzschlussstromberechnung.....	95
6.4.1.1	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $I_k''$ .....	96
6.4.1.2	Stoßkurzschlussstrom $i_p$ .....	97
6.4.1.3	Abklingender aperiodischer Anteil des Gleichstroms $i_{d.c.}$ .....	97
6.4.1.4	Ausschaltwechselstrom $I_b$ .....	98
6.4.1.5	Dauerkurzschlussstrom $I_k$ .....	98
6.4.2	Klassifizierung der Fehlerarten .....	98
<b>7</b>	<b>Wirtschaftliche Gesichtspunkte.....</b>	<b>99</b>
<b>8</b>	<b>Grenztemperaturen elektrischer Leitungssysteme .....</b>	<b>101</b>
8.1	Kabel .....	101
8.2	Stromschienen.....	102
8.3	Leiterseile .....	102
8.4	Dauer- und Kurzschlusstemperaturen von Schaltgeräten und Kabeln .....	103

8.5	Thermische Isolierstoffklassen gemäß IEC 60085 .....	103
<b>9</b>	<b>Technische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen.....</b>	<b>105</b>
9.1	Aktuelle Situation am weltweiten Windenergiemarkt.....	105
9.2	Aufbau und Betriebseigenschaften von Stromschienensystemen .....	106
9.3	Praktische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen .....	108
9.3.1	Verlustleistung bei Kabel und Stromschienen.....	108
9.3.2	Montage, Verlegung, Platzverbrauch und Wartung.....	110
9.3.3	Wahl der Schutzklasse .....	111
9.3.4	Mechanische Belastungen im Betrieb.....	111
9.4	Kostenvergleich .....	112
9.5	Allgemeine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Kabel und Schienenverteilsystemen .....	114
9.5.1	Vor- und Nachteile von Kabelsystemen .....	114
9.5.2	Vor- und Nachteile von Schienenverteilsystemen .....	115
9.6	Fazit .....	116
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>117</b>
<b>11</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>119</b>
<b>12</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>125</b>
12.1	Zeichenerklärung.....	129

# 1 Motivation

Ziel dieser Arbeit ist es die thermischen und mechanisch-dynamischen Auswirkungen des elektrischen Stroms an Betriebsmitteln und Anlagen der elektrischen Energietechnik zu erfassen und zu erläutern. Des Weiteren sollen Stromtragfähigkeitsgrenzen einzelner Betriebsmittel aufgezeigt werden und ein Bezug zu damit verbundenen wirtschaftlichen und technischen Problemen hergestellt werden. Anhand des praktischen Beispiels „Windkraftanlagen“ werden Vor- sowie Nachteile in der technischen Umsetzung von Stromschienensystemen gegenüber vergleichbaren Kabelinstallationen diskutiert.

Um die Auswirkungen des elektrischen Stroms auf Komponenten der Energietechnik beschreiben zu können, ist es notwendig die physikalischen Zusammenhänge und Grundprozesse, welche dabei ablaufen, zu verstehen. Unumgänglich ist auch die Einbeziehung des Verhaltens von Werkstoffeigenschaften bei thermischen und elektrodynamischen Beanspruchungen.

In dieser Arbeit sind Folgen und Auswirkungen strombedingter Beanspruchungen auf Leiter, Isolatoren und Kontakte aufgezeigt, Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen für verschiedene Werkstoffe der Elektrotechnik zusammengefasst und praktisch-technische Kriterien für die Auslegung und den Betrieb elektrischer Betriebsmittel beschrieben.

Um elektrotechnische Anlagen sicher, effizient und wirtschaftlich zu betreiben, ist deren technische Auslegung sehr entscheidend. Die verwendeten Komponenten und Werkstoffe müssen aufeinander abgestimmt werden und deren Belastbarkeitsgrenzen dürfen, durch die Beanspruchungen im Dauerbetrieb als auch im Fehlerfall, nicht unzulässig überschritten werden.

## 2 Einleitung

Aufgrund des ständig steigenden Bedarfs an elektrischer Energie und des harten Wettbewerbs zwischen Stromerzeugern und -händlern, werden Anlagen und Betriebsmittel immer stärker ausgelastet und bis an deren Belastbarkeitsgrenzen betrieben. Hinzu kommt, dass durch vermehrte Investitionen in das Engineering viele Werkstoffe durch neue hochbelastbare Stoffe ersetzt werden und Einsparungen an Platz und Material vorgenommen werden. Es ist ein Trend zu beobachten, dass immer häufiger stille Reserven für jene Einflüsse abgebaut werden, die in der Entwicklung nicht (ausreichend) berücksichtigt/beachtet wurden oder deren Auswirkungen noch nicht ausreichend bekannt sind. Liegt die Auslastung eines Betriebsmittels nahe an seiner maximalen Belastbarkeit, werden dadurch die vorgehaltenen Reserven für den Fehlerfall deutlich reduziert. Als Folgen davon können irreversible Materialveränderungen und Beschädigungen an Anlagen entstehen, welche einen zuverlässigen und fehlerfreien Weiterbetrieb u.U. beeinträchtigen oder nicht mehr ermöglichen können. Für eine ausreichende Dimensionierung ist die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge zwischen der Beanspruchung und des Betriebsverhaltens elektrischer Komponenten notwendig.

Mit steigender elektrischer Auslastung und durch Veränderungen der Umgebungsbedingungen, erhöhen sich auch die Belastungen durch die Dauer- und Kurzschlussströme. Auf Grund der Wirkung des elektrischen Stroms werden Leiter, Isolatoren, Kontakte und angrenzende Anlagenteile sowohl erwärmt als auch elektrodynamisch beansprucht. Werden dabei zulässige Materialgrenzwerte wie die Temperatur oder mechanische Festigkeit überschritten, führt dies zu einer Veränderung der Materialeigenschaften, wodurch die Lebensdauer beeinflusst wird. Einleitend werden in Abschnitt 3 die verschiedenen Beanspruchungen, mit Fokus auf die strombedingten Beanspruchungen, im Elektroenergiesystem erläutert. Des Weiteren wird die gegenseitige Beeinflussung elektrischer Leiter auf Grund der Wirkung der magnetischen Felder behandelt und die Stromverdrängungseffekte näher beschrieben. Abschnitt 4 beschäftigt sich mit der thermischen Wirkung des Stroms bei Langzeit- und Kurzzeitbelastungen. Wichtig dabei ist, die Grundprozesse der Wärmeübertragung zu verstehen und die verschiedenen Methoden der Erwärmungsberechnung von Stromleitern kennen zu lernen. Wird ein Leiter erwärmt, überträgt er die Wärme auch an die angrenzende Isolierung und an Stützpunkte. Dabei entstehen verschiedenste Prozesse, welche unterschiedliche Auswirkungen auf die Werkstoffe haben. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Einfluss der Temperatur auf die Oberfläche und die Kontakteigenschaften von elektrischen Kontakten. Besonders bei

schaltenden Kontakten ist die Beanspruchung durch den energiereichen Lichtbogen ein wesentliches Problem.

Abschnitt 5 beschäftigt sich v.a. mit den elektrodynamischen Beanspruchungen, deren Ursache und deren Auswirkungen auf Anlagenteile. Durch die starken Kurzschlusskräfte werden besonders biegesteife Leiter, Stützpunkte und Isolationen mechanisch beansprucht, aber auch Einflüsse, wie Eis-, Wind- und Eigengewichtslast, beanspruchen elektrische Betriebsmittel zusätzlich.

In Abschnitt 6 werden genormte Spannungen und Ströme aufgelistet sowie die Berechnung von Kurzschlussströmen im Netz erläutert. Die wirtschaftlichen Gesichtspunkte zum Thema „Betrieb an der Strombelastbarkeitsgrenze“ und die damit verbundenen technischen Probleme, werden in Abschnitt 7 anhand einiger praxisrelevanter Beispiele näher gebracht. Bezüglich der Festlegung und der Höhe der Stromtragfähigkeit von Betriebsmitteln, werden in Abschnitt 8 allgemeine thermische Belastbarkeitsgrenzwerte von Kabeln und Leitern zusammengefasst. Um einen praktischen Bezug zur Arbeit herzustellen, wurde die technische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen analysiert und mit vergleichbaren Kabelinstallationen verglichen. Punkte wie Betriebsverhalten, Leitungsverluste, Material- und Installationsaufwand, Platzbeanspruchung sowie die Probleme die beim Betrieb von Schienenverteilssystemen auftreten können, sind Kernthemen bei dieser Betrachtung.

### 3 Beanspruchungen im Elektroenergiesystem

Die verschiedenen Beanspruchungen, welche auf Betriebsmittel der Elektroenergietechnik wirken, können in drei Klassen eingeteilt werden:

- elektrische,
- thermische und
- mechanische

Beanspruchungen. Ihre Ursachen können sowohl externer (äußere Quelle) als auch interner (innere Quelle) Natur sein. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Beanspruchungen [1].

**Tabelle 1: Unterteilung der Beanspruchungen im Elektroenergiesystem gemäß [1]**

	Beanspruchung		
	elektrisch	thermisch	mechanisch
<b>Äußere Quelle</b>	Blitzentladungen, magnetisches Erdfeld*, Elektrostatisches Erdfeld* benachbarte Leiter	Sonneneinstrahlung benachbarte Abstrahlung von Verlustwärme	Windlast, Eislast, Wasserdruck (Tiefseekabel)
<b>Innere Quelle</b>	Elektrische Feldstärke durch Betriebs- und Überspannungen	Stromwärmeverluste, dielektrische Verluste, magnetische Verluste	magnetische Kräfte, Wärmedehnungskräfte, elektrostatische Kräfte* Vibrationen

\* i.d.R. vernachlässigbar

Des Weiteren treten noch atmosphärische Beanspruchungen durch chemische Einflüsse und Verschmutzungen auf.

Bei der Einwirkdauer der Belastung ist zwischen Langzeit- und Kurzzeitbeanspruchung zu unterscheiden. Zu den Langzeitbeanspruchungen zählen u.a. die betriebsbedingten Erwärmungen der Strombahnen und angeschlossener Teile, also auch die statischen mechanischen Kräfte, welche auf Stromleiter und alle zugehörigen Anlagenteile wirken. Zu den Kurzzeitbeanspruchungen zählen Fehlerströme, durch Erd- und Kurzschlüsse, Ströme bei Schalthandlungen sowie Ströme durch atmosphärische Entladungen. Diese führen, neben starken Erwärmungen, zu extremen Stromkräften, Stör-Lichtbögen und transienten Überspannungen.

In dieser Arbeit werden die Ursachen und die Auswirkungen strombedingter thermischer und elektrodynamischer Beanspruchungen auf Leiterwerkstoffe, Isolierstoffe und elektrische Kontakte der Energietechnik, bei Lang- sowie Kurzeinwirkung, aufgezeigt und erläutert.

### 3.1 Beanspruchungen durch den Strom

Strombelastungen entstehen einerseits durch den Dauerstrom und andererseits durch hohe kurzzeitige Ströme. Dadurch werden elektrische Betriebsmittel und Anlagen sowohl thermisch als auch mechanisch-dynamisch beansprucht. Die Folgen daraus sind, dass stromführende Leiter, Isolatoren, Kontakte und Hilfskonstruktionen betriebsbedingt altern und ihre Eigenschaften verändern. Um die sichere und kontinuierliche Funktion einer elektrotechnischen Einrichtung im Betrieb aufrecht zu halten, ist eine fundierte Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge zwischen der Beanspruchung und des Betriebsverhaltens notwendig. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die physikalischen Wirkungen der Strombelastung.

Die Hauptaufgabe von Stromleitern ist auftretende Betriebs- und Kurzschlussströme sicher zu tragen. Dabei sollen alle zu erwartenden Strombelastungen unter der Stromtragfähigkeitsgrenze liegen. Das Stehvermögen der Strombahn wird dabei u.a. durch den Nennstrom (Dauerstrom), Kurzzeitstrom und den Steh-Stoßstrom (momentaner Höchstwert) ausgedrückt [2].

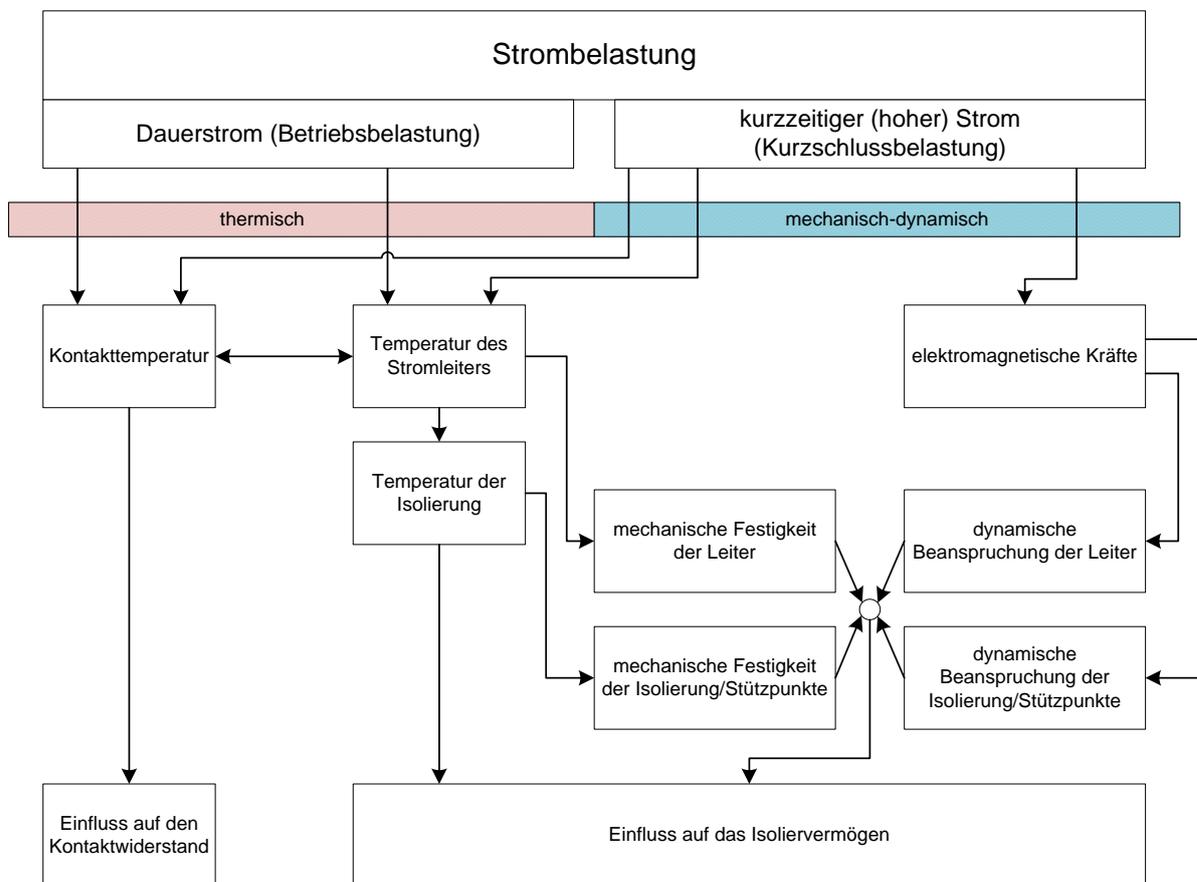


Abbildung 3.1: physikalische Wirkungen der Strombelastung [2]

Bevor in dieser Arbeit näher auf die thermischen und elektrodynamischen Beanspruchungen auf Leiter, Isolatoren und Kontakten eingegangen wird, ist es notwendig die typischen physikalischen Effekte darzustellen, welche die Stromverteilung in der Strombahn bestimmen.

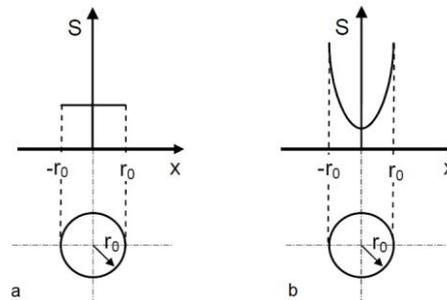
### **3.2 Stromverdrängung in elektrischen Leitern**

Der Stromfluss in elektrischen Leitern führt dazu, dass sich magnetische Felder in deren Umgebung ausbilden, welche durch magnetische Feldlinien dargestellt werden können. In stromdurchflossenen Leitern verlaufen diese geschlossen und bilden konzentrische Kreise. Die technische Stromrichtung und die Orientierung der magnetischen Feldlinien sind im Sinne einer Rechtsschraube definiert. Die magnetische Feldstärke  $H$ , auch magnetische Erregung genannt, wird durch elektrische Ströme erzeugt. Es bezeichnet die Ursache des Magnetfeldes, welches sowohl für die Induktion, die Lorentzkraft als auch die Anziehung und Abstoßung von Permanentmagneten verantwortlich ist. Das Magnetfeld charakterisiert damit die Wirkung stationärer und veränderlicher Ströme innerhalb und außerhalb elektrischer Leiter [3].

Als eine Auswirkung magnetischer Felder sei hier die Stromverdrängung in elektrischen Leitern erwähnt, welche durch zwei wesentlichen Effekten, den Haut- oder Skineffekt sowie den Nah- oder Proximityeffekt, hervorgerufen wird [4].

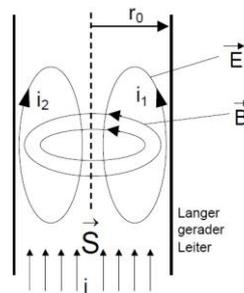
#### **3.2.1 Der Haut- oder Skineffekt**

Betrachtet man die Verteilung der Stromdichte über den gesamten Leiterquerschnitt eines von anderen stromführenden Leitern weit entfernt angeordneten stromführenden Leiters, so ist diese bei Gleichstrom konstant. Fließt Wechselstrom durch denselben Leiter, ist die Stromdichte an den Randzonen um einiges höher als im Inneren. Diese Eigenschaft wird als Haut- oder Skineffekt bezeichnet [5]. Abbildung 3.2 zeigt schematisch wie sich die Stromdichte  $S$  über den Querschnitt eines Rundleiters, mit und ohne Stromverdrängung, verteilt.



**Abbildung 3.2: Stromdichteverteilung a) ohne und b) mit Stromverdrängung in einem Rundleiter [6]**

Gut erkennbar wird dieser Effekt, wenn man die Verläufe der elektrischen und der magnetischen Feldlinien innerhalb und außerhalb des Leiters betrachtet. Das durch den fließenden Wechselstrom entstehende magnetische Wechselfeld induziert Wirbelströme im Leiter, welche sich dem ursprünglichen Strom überlagern [7]. Dadurch wird die Stromdichte in den achsnahen Bereichen herabgesetzt und an den Randzonen verstärkt, wie es in Abbildung 3.3 dargestellt ist.



**Abbildung 3.3: Wirbelverkopplung in einem massiven Leiter [6]**

Der Wechselstromwiderstand des Leiters wird im Verhältnis zum Gleichstromwiderstand größer, da für den Stromfluss nicht mehr der gesamte Querschnitt als homogene Einheit zu Verfügung steht [4]. Die Verlustleistung ist somit beim Betrieb mit Wechselspannung höher als bei Gleichspannung.

Mit Hilfe von Finite-Elemente-Simulationen lässt sich dieser Effekt sehr anschaulich darstellen. Abbildung 3.4 zeigt das Ergebnis einer solchen Simulation. Hier wurde ein Kupferleiter mit einem Querschnitt von 300 mm<sup>2</sup> und einer PVC-Isolierung im Betrieb mit Wechselspannung nachgebildet. Die Simulation zeigt deutlich, dass es zu einer Anhebung der Stromstärke, in Richtung des Leiterrandes, kommt [8].

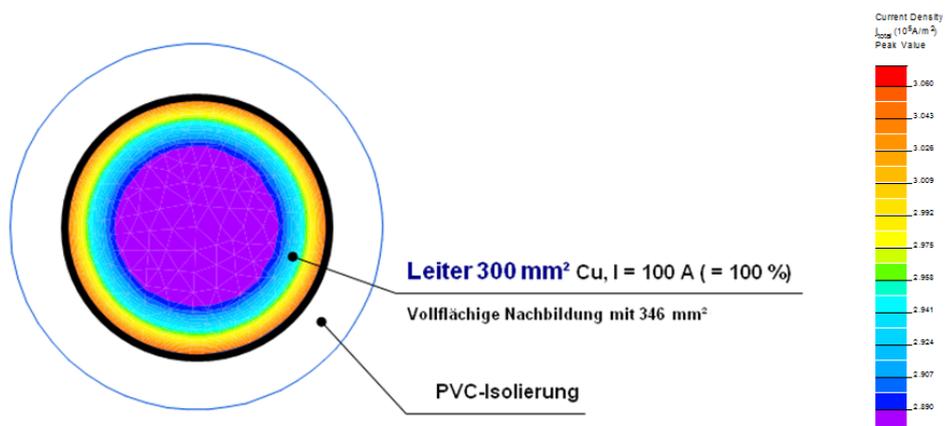


Abbildung 3.4: Skineffekt in einem Kupferleiter [8]

Der Skineffekt kann analytisch mit Hilfe der Eindringtiefe quantifiziert werden. Diese ist ein Maß für die Abnahme der Stromdichte im Leiter. Je größer die Kreisfrequenz  $\omega$  und je größer die Permeabilität  $\mu$  ist, desto kleiner ist die Eindringtiefe  $\delta$  [7].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}} \quad (3.1)$$

$\kappa$  spezifische elektrische Leitfähigkeit

### 3.2.2 Der Nah- oder Proximityeffekt

Liegen mehrere stromdurchflossene Leiter eng bei einander, überlagern sich deren magnetischen Wechselfelder räumlich und zeitlich [4]. Werden z.B. zwei parallele Stromleiter gleichsinnig mit demselben Strom durchflossen, verringert sich die Stromverdrängung an den Innenseiten der Leiter, weil sich die beiden Magnetfelder  $H_1$  und  $H_2$  in Summe teilweise aufheben, siehe Abbildung 3.5 a). Verlaufen die Stromrichtungen gegeneinander, wie in Abbildung 3.5 b) gezeigt wird, erhöht sich die Stromverdrängung, da sich die Magnetfelder in Summe nicht mehr so stark aufheben. Die Höhe der Stromverdrängung hängt also stark von Abstand und der Geometrie der Leiter (Profil), der Richtung der Ströme und dem Leitermaterial ab [6].

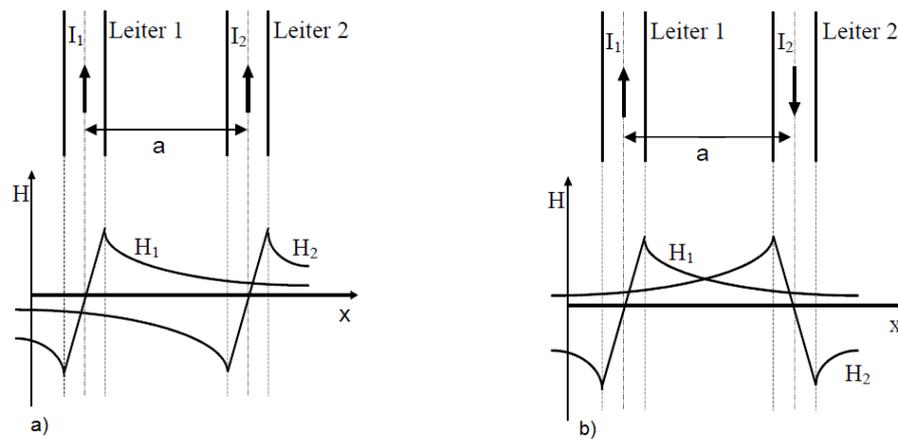


Abbildung 3.5: Verlauf der Feldstärken zweier Leiter mit a) parallelem und b) antiparallelem Stromfluss [6]

Die Stromverdrängung in Stromschienen wurde ebenso mittels FEM-Simulationen untersucht. In Abbildung 3.6 a) ist die Stromverdrängung, an drei gleichsinnig durchflossenen, rechteckigen Teileitern sehr gut erkennbar. In den rot-gelb gekennzeichneten Bereichen, herrschen hohe Stromdichten. Abbildung 3.6 b) zeigt zwei Teileiteranordnungen die gegensinnig durchflossen sind. Im Bereich zwischen den Leiteranordnungen kommt es zu einer Erhöhung der Feldstärke, dies ist durch den Verlauf der Feldlinien gut sichtbar. An den beiden inneren Teileitern ist die Stromdichte am größten, was wiederum zu einer ungleichmäßigen Belastung der einzelnen Teileiter führt.

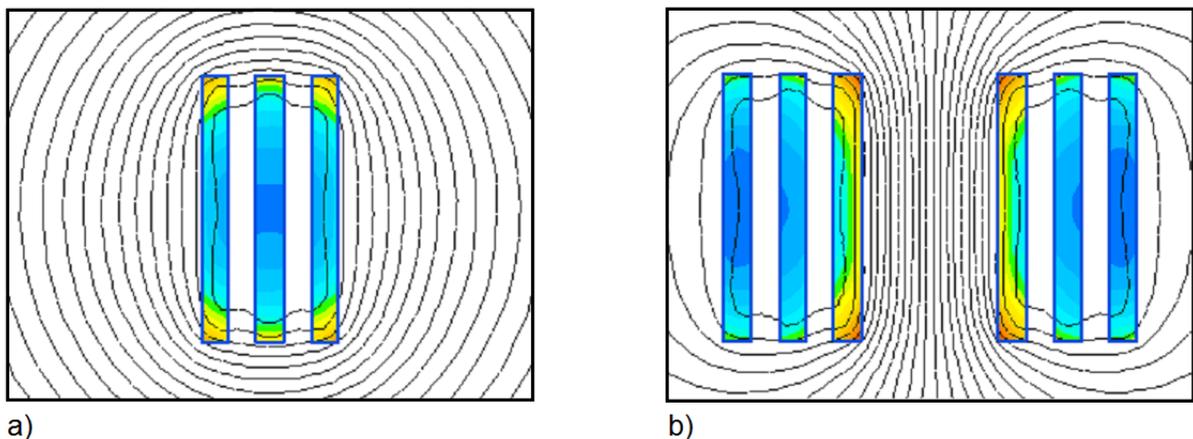


Abbildung 3.6: a) Skin- und b) Proximityeffekt an Stromschienen [8]

### 3.2.3 Der Stromverdrängungsfaktor

Ein Maß für die Stromverdrängung in elektrischen Leitern, ist der Stromverdrängungsfaktor  $k$ . Dieser gibt das Verhältnis zwischen dem Wechselstrom- und dem Gleichstromwiderstand bei gleichen Abmessungen an. Bei der Betrachtung von Wechsel- und

Drehstromanwendungen ist dieser Faktor unbedingt zu berücksichtigen. Er ist eine Funktion der Permeabilität und der Leitfähigkeit des Leiterwerkstoffes, der Leitergeometrie, der Abstände benachbarter Leiter, der Frequenz und der gegenseitigen Phasenlage der Leiterströme [4]. Zur Berücksichtigung der jeweiligen Stromverdrängungseffekte, werden die Korrekturfaktoren  $k_S$ , für den Skineffekt, und  $k_P$ , für den Proximityeffekt, angegeben. In Tabelle 2 sind Werte für den Stromverdrängungsfaktor  $k$  für gängige Schienenanordnungen angegeben. Die Abstände zwischen den einzelnen Schienen betragen dabei 10 mm. Weitere Korrekturfaktoren für verschiedenste Leiterprofile sind in u.a. in [6] angegeben.

**Tabelle 2: Stromverdrängungsfaktor  $k$  für Rechteckschienen (50 Hz) [2]**

Abmessungen (mm x mm)	1 Schiene		2 Schienen		3 Schienen	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
<b>50 x 10</b>	1,05	1,02	1,12	1,05	1,25	1,12
<b>60 x 10</b>	1,07	1,03	1,17	1,08	1,34	1,17
<b>80 x 10</b>	1,11	1,05	1,27	1,13	1,49	1,26
<b>100 x 10</b>	1,15	1,08	1,33	1,19	1,61	1,35
<b>120 x 10</b>	1,18	1,10	1,38	1,23	1,70	1,45
<b>160 x 10</b>	1,23	1,14	1,48	1,31	1,84	1,54

Betrachtet man Gleichstrom ergibt sich der Wirkwiderstand zu:

$$R_{\sim} = \frac{l}{\kappa A} \quad (3.2)$$

$$\kappa = \frac{1}{\varrho} \quad (3.3)$$

$\varrho$  spezifischer elektrischer Widerstand

Mit Hilfe des Stromverdrängungsfaktors erhält man aus dem Gleichstromwiderstand  $R_{\sim}$  den Wechselstromwiderstand  $R_{\sim}$  [4]:

$$R_{\sim} = \frac{l}{\kappa A} k \quad (3.4)$$

## 4 Thermische Beanspruchungsgrenze

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, werden elektrische Anlagen und Betriebsmittel auf verschiedene Arten beansprucht (siehe Tabelle 1). In den folgenden Abschnitten stehen die thermischen Beanspruchungen im Vordergrund. Bevor jedoch auf das thermische Verhalten und dessen Auswirkung auf den Betrieb näher eingegangen werden kann, ist es notwendig die Ursachen für Erwärmungen, als auch die physikalischen Vorgänge, welche für die Übertragung von Wärme verantwortlich sind, allgemein darzustellen.

### 4.1 Thermische Vorgänge in elektrischen Anlagen

#### 4.1.1 Wärmequellen

Wärmestromquellen in der Energietechnik sind [2]:

- der stromdurchflossene Leiter mit seinen Stromwärmeverlusten (Joulesche Verluste),
- Verbindungen und Kontakte in der Strombahn mit deren Stromwärmeverlusten, welche überwiegend durch den Enge- bzw. Kontaktwiderstand bestimmt sind,
- ferromagnetische Metallteile im magnetischen Wechselfeld mit ihren Hystereseverlusten und Wirbelstromverlusten,
- elektrisch leitfähige Kapselungen mit Wirbelstrom- und Hystereseverlusten,
- Isolierstoffe im elektrischen Feld mit dielektrischen Verlusten,
- Sonnen- und Himmelsstrahlung bei Betriebsmitteln und Anlagen im Freien ohne Verschattung.

##### 4.1.1.1 Stromwärmeverluste

Stromwärmeverluste  $P_{St}$  entstehen in Stromschienen, Kabeln, Freileitungen und in allen Gerätestrombahnen. Diese elektrische Verlustleistung wird dabei vollständig in Wärme (Joulesche Wärme) umgesetzt [2, 6].

$$P_{St} = kI^2R_-(\vartheta) \quad (4.1)$$

Bestimmend für die Höhe der Stromwärmeverluste ist der fließende Strom  $I$ , der Stromverdrängungsfaktor  $k$  sowie der temperaturabhängige elektrische Widerstand (Gleichstromwiderstand) des Leiters.

$$R_{20} = \varrho_{20} \frac{l}{A} \quad (4.2)$$

$$R_-(\vartheta) = R_{20}[1 + \alpha_T(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \quad (4.3)$$

$$\alpha_T = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta R_{20}} \quad (4.4)$$

Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen elektrischen Widerstandes  $\alpha_T$  gibt die relative Widerstandsänderung gegenüber der tatsächlichen Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$  bezogen auf  $20^\circ\text{C}$  an.  $R_{20}$  ist der Widerstand bei einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$ . Er berechnet sich aus der Länge  $l$  und dem Querschnitt  $A$  des Leiters sowie dem spezifischen Widerstand  $\varrho_{20}$  des Leiterwerkstoffes bei  $20^\circ\text{C}$  [3]. Die Bezugstemperatur wird mit  $20^\circ\text{C}$  angenommen, da sie der mittleren Umgebungstemperatur in den nördlichen Breiten entspricht. Der lineare Temperaturkoeffizient gilt für die gewählte Bezugstemperatur [9]. Die lineare Beziehung (4.3) gilt allerdings nur näherungsweise für bestimmte Werkstoffe [3]. Möchte man ein größeres Temperaturintervall erfassen (z.B. Raum- bis Schmelztemperatur) ist diese Beziehung mit einem quadratischen Temperaturkoeffizienten  $\beta_T$  zu erweitern, siehe (4.5) [7]. Für sehr genaue Berechnungen, muss man die geringe Temperaturabhängigkeit von  $\alpha_T$  auch noch berücksichtigen [10]. Werte für den Temperaturkoeffizienten von gebräuchlichen Leiterwerkstoffen sind aus Tabelle 21 im Anhang zu entnehmen.

$$R_-(\vartheta) = R_{20}[1 + \alpha_T(\vartheta - 20^\circ\text{C}) + \beta_T(\vartheta - 20^\circ\text{C})^2] \quad (4.5)$$

Bei Metallen ist der spezifische Widerstand stark von der Temperatur abhängig. Dieser nimmt mit steigender Temperatur zu. Handelt es sich um reine Metalle ist dieser Anstieg nahezu linear. Gewisse Legierungen wie z.B. Manganin (86% Kupfer (Cu), 12% Mangan (Mn) und 2% Nickel (Ni)) verhalten sich jedoch anders. Wie aus Abbildung 4.1 auf Seite 22 ersichtlich ist, verändert sich hier  $\varrho$  in Abhängigkeit der Temperatur nur sehr gering [11].

Beim Erreichen des absoluten Nullpunktes ( $T = 0$  Kelvin) müsste die Leitfähigkeit eines idealen Metallkristalls unendlich werden, jedoch geht diese bei vielen Metallen und Legierungen schon bei wenigen Kelvin über dem Nullpunkt in einen supraleitfähigen Zustand über. Nähert sich die Temperatur des Metalls an seine Schmelztemperatur heran, kommt es zu einem raschen Anstieg des spezifischen Widerstandes, der in weiterer Folge auf einen höheren Wert springt und in der flüssigen Phase wieder linear anwächst. Des Weiteren sei erwähnen, dass sich der Widerstandswert auch auf Grund der temperaturabhängigen Längen- und Querschnittsänderung des Leiters ändert [7].

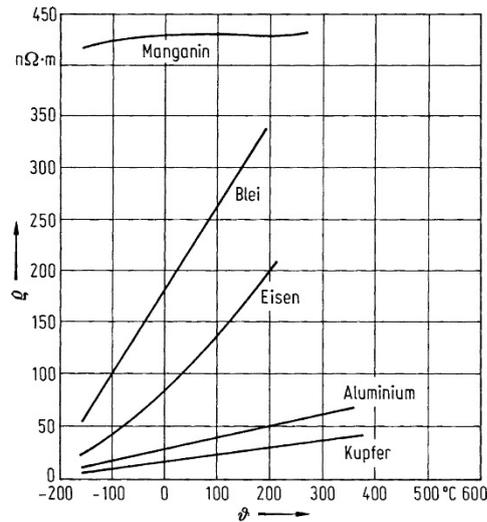


Abbildung 4.1: Temperaturabhängigkeit spezifischer Widerstände [11]

#### 4.1.1.2 Magnetische Verluste

Neben den Leiterverlusten sind auch die Wirbelstromverluste  $P_W$  und die Hystereseverluste  $P_H$  vom Strom abhängig. Diese Verluste sind von der Geometrie, der Bauform, den Verlauf und der Anordnung von Strombahnen, den magnetischen und elektrischen Materialeigenschaften sowie von dem elektromagnetischen Feld abhängig. Erzeugt werden diese u.a. in Kapselungen, elektrischen Maschinen, Transformatoren, Kabel, Gerüstkonstruktionen und Schaltanlagen. Auf Grund der Tendenz zu immer höheren Nennströmen und Nennbelastungen in gekapselten Anlagen, wird die Betrachtung dieser Verluste bei der Dimensionierung und dem Betrieb immer wichtiger [2].

#### 4.1.1.3 Dielektrische Verluste

In Isolierstoffen werden dielektrische Verluste  $P_D$  aufgrund von Polarisations-, Leitungs- und Teilentladungsmechanismen generiert. Sie zählen zu den stromunabhängigen Verlusten, weil sie nicht direkt vom Laststrom, sondern durch das elektrische Wechselfeld hervorgerufen werden [12]. Allgemein lassen sich die dielektrischen Verluste über die Spannung, die Kreisfrequenz, den Verlustfaktor  $\tan\delta$  und der Ersatzkapazität  $C$  berechnen [13].

$$P_D = Q_C \tan\delta = \omega C U^2 \tan\delta \quad (4.6)$$

Befindet sich ein Dielektrikum an Wechselspannung, eilt der Strom der Spannung um nahezu  $90^\circ$  voraus. Aufgrund von Polarisations- und Leitfähigkeitsverlusten weicht der Phasenwinkel  $\varphi$  um einen geringen Verlustwinkel  $\delta$  von den  $90^\circ$  ab, siehe Abbildung 4.2. Der Wirkstrom  $I_\delta$  ist mit der Spannung  $U$  in Phase und ergibt die, im Dielektrikum umgesetzte,

Verlustleistung  $P_D$  ( $P_\delta$ ).  $I_C$  eilt der Spannung um  $90^\circ$  vor und ergibt daraus die Blindleistung  $Q_C$ . Der Verlustfaktor  $\tan\delta$  gibt das Verhältnis von dielektrischer Verlustleistung zu kapazitiver Blindleistung in einem Dielektrikum an.

$$\tan\delta = \frac{P_D}{Q_C} = \frac{I_\delta U}{I_C U} \quad (4.7)$$

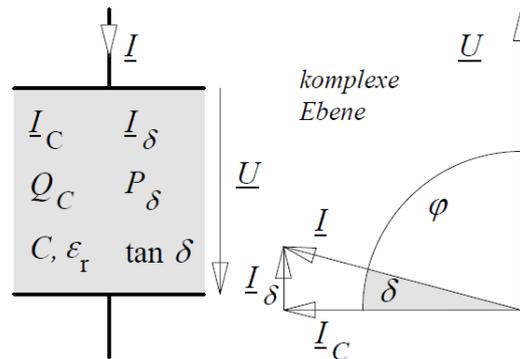


Abbildung 4.2: Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Dielektrikums [13]

Eine Erhöhung der Feuchtigkeit und/oder der Leitfähigkeit eines Dielektrikums, vergroert den Verlustfaktor und damit auch die erzeugten Verluste. Des Weiteren ist eine starke Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur gegeben [13].

#### 4.1.1.4 Sonnen- und Himmelsstrahlung

Als letzte nennenswerte Wärmequelle sind hier die Sonnen- und Himmelsstrahlung  $P_{SH}$  erwähnt. Geräte und Stromschiene in Freiluftaufstellung sowie frei in Luft verlegte Kabel und Freileitungsseile erwärmen sich durch den Einfluss von  $P_{SH}$  zusätzlich. Aus diesem Grund ist bei der Auslegung und Bemessung von Anlagen dieser Faktor zu berucksichtigen.

#### 4.1.2 Wärmespeicherung

Die Wärme, welche durch die eben erwähnten Verluste erzeugt wird, kann zu einem bestimmten Teil im Stromleiter und in der Isolierung gespeichert werden [2].

$$Q = c m(\vartheta - \vartheta_0) = C_{th}(\vartheta - \vartheta_0) \quad (4.8)$$

Die gespeicherte Wärme  $Q$ , lässt sich im Wesentlichen uber die Masse  $m$  des Objektes und die spezifische Wärmekapazität  $c$  ermitteln. Werte fur die Wärmekapazität von gängigen

Leiter- und Isolierwerkstoffen sind dem Anhang zu entnehmen. Wie viel Wärme in einem Körper gespeichert werden kann, hängt von dessen Materialeigenschaften und der Geometrie ab.

Bis zu einem bestimmten Grad kann Wärmeenergie in einem Volumen gespeichert werden. Steigt die Temperatur weiter an, wird die Wärme mittels verschiedener Wärmeübertragungsmechanismen an die Umgebung abgegeben [9].

### 4.1.3 Wärmeübertragung

Die durch die genannten Wärmequellen erzeugte Wärmeleistung wird, nach Erreichen eines thermisch stationären Zustandes, durch Wärmeleitung, konvektive Wärmeübertragung und Wärmestrahlung abtransportiert. Zusätzlich kann auch ein Wärmetransport in einem vorhandenen Kühlmittelstrom erreicht werden [2, 9].

#### 4.1.3.1 Wärmeleitung

Thermische Energie wird in festen Medien, als auch in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen, von einem Molekül zum anderen weitergegeben. Dieser Vorgang wird als Wärmeleitung bezeichnet. In elektrischen Anlagen oder Betriebsmitteln treten Wärmeleitungen zwischen unterschiedlich erwärmten Bereichen auf. Die Richtung des Temperaturgefälles ist für die Ausbreitung der Wärmeströmung bestimmend. Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  gibt die Intensität der Wärmeströmung in  $\text{W}/\text{m}^2$  an. Versuche haben gezeigt [14], dass diese in homogenen Körpern proportional der Temperaturabnahme in x-Richtung des kartesischen Koordinatensystems ist.

$$\frac{d q}{d t} = \dot{q} = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (4.9)$$

Der Temperaturgradient beschreibt die Änderung der Temperatur längs eines Wegstückes  $x$  abhängig von der Zeit  $t$ . Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist eine Stoffgröße die anhand von Versuchen ermittelt wird (siehe Anhang). Neben dem Wärmetransport durch Atomschwingungen kommt in elektrisch leitfähigen Körpern die Bewegung der freien Ladungsträger hinzu, welche zu einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit führt. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  oder auch Wärmeleistung  $P_L$  genannt, welcher senkrecht durch eine Fläche  $A$  tritt, errechnet sich grundsätzlich nach Gleichung (4.10) [2, 14].

$$\dot{Q} = \dot{q} A = P_L = -\lambda A \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (4.10)$$

Das negative Vorzeichen definiert den Wärmestrom, der durch Wärmeleitung von einem Ort mit höherer Temperatur in Richtung eines Ortes mit niedrigerer Temperatur übertragen wird [1]. Wird die Wärmeleitung je Volumeneinheit betrachtet ist die Berechnung in x-, y- und z-Richtung durchzuführen.

Um Wärmeleitungsberechnungen bestimmter Temperaturfelder durchzuführen, kann die Analogie zur Berechnung von elektrischen Feldern ausgenutzt werden. Über korrespondierende physikalische Größen können Berechnungsgleichungen, welche für das elektrische Feld gültig sind, in das Wärmeströmungsfeld umgemünzt werden [12]. Als Beispiel sei hier der Begriff des Wärmeleitwiderstandes erwähnt. Er leitet sich aus der Division von Temperaturdifferenz durch Wärmestrom ab und entspricht dem Ohmschen Gesetz. Diese Analogie ist in (4.11) und (4.12) für einen Leiter der Länge  $l$  dargestellt [16].

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda A} = \frac{\Delta\vartheta}{\dot{Q}} \quad (4.11)$$

$$R_{el} = \frac{l}{\kappa A} = \frac{U}{I} \quad (4.12)$$

Für anwendungsorientierte Berechnungen der Wärmeleitung in verschiedensten Anordnungen wird auf [14, 15] verwiesen.

#### 4.1.3.2 Konvektive Wärmeübertragung

Bei der konvektiven Wärmeübertragung kommt es zu einem Wärmeaustausch zwischen einem festen und einem flüssigen oder gasförmigen Körper. An der Grenzfläche der beiden Medien wird die Wärmeleistung durch Leitung übertragen, anschließend wird der Wärmehalt durch die Bewegung des Fluids abtransportiert. Diese Strömung des Mediums kann natürlichen Ursprungs sein, infolge von Temperatur- und damit verbundenen Druckunterschieden, aber auch durch eine erzeugte Druckdifferenz durch Pumpen oder Gebläse herbeigeführt werden. Die Wärmeleistung wird nach dem Ansatz von NEWTON wie folgt berechnet [2, 14]:

$$P_K = \alpha_K O_K (\vartheta_1 - \vartheta_f) \quad (4.13)$$

$\vartheta_1$      Temperatur des festen Körpers

$\vartheta_f$      Temperatur des Fluids

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_K$  wird meist experimentell bestimmt und ist von der Temperatur und Geometrie der wärmeabgebenden Oberfläche  $O_K$ , der Dichte, der

spezifischen Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit, der kinematischen Viskosität und dem Kühlmedium als auch der Strömung des Kühlmediums abhängig [1]. Betrachtet man eine freie Konvektion mit laminarer Strömung, bei der das Umgebungsmedium Luft ist und der Luftdruck, die Umgebungstemperatur und die äußeren Abmessungen ( $b$ ,  $h$ ) berücksichtigt werden, gilt für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, in  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ , folgende Näherung [4]:

$$\alpha_K = 10^4 \sqrt{\frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{(\vartheta_2 + 273) h}} \sqrt{\frac{b}{1013}} \quad (4.14)$$

Für eine genauere Berücksichtigung der äußeren Einflüsse und der auftretenden physikalischen Vorgänge, werden s.g. Ähnlichkeitsbetrachtungen herangezogen. Diese verlangen neben konstanten Proportionen aller Größen die für den zu untersuchenden Vorgang bestimmend sind (z.B. Druck, Geschwindigkeit, Temperatur), auch noch konstante Proportionen der geometrischen Abmessungen. Für jede physikalische Größe gibt es eine Ähnlichkeitskonstante. Komplexe Vorgänge die durch sehr viele physikalische Größen beschrieben werden, haben eine Vielzahl von Ähnlichkeitskonstanten die in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen, jedoch nicht willkürlich gewählt werden dürfen. Der Zusammenhang zwischen den Konstanten ergibt sich aus den Gleichungen, welche den Zusammenhang der jeweiligen physikalischen Größen beschreiben. Daraus ergeben sich dimensionslose Ähnlichkeitskriterien, welche nach bedeutenden Forschern benannt werden [4].

Die Nußelt-Zahl  $Nu$ , welche nach dem deutschen Physiker W. Nußelt benannt wurde, ist eine Funktion der drei dimensionslosen Ähnlichkeitskriterien Reynolds-, Prandtl- und Grashofzahl, welche aus der Geometrie, den Stoffgrößen und der Temperaturdifferenz bestimmt werden. Auch die Art der Konvektion (frei, erzwungen oder Kombinationen der beiden) spielt dabei eine wichtige [4].

$$\alpha_K = Nu \frac{\lambda}{l} \quad (4.15)$$

Für die freie Konvektion ergibt sich zwischen den Ähnlichkeitskriterien der Zusammenhang:

$$Nu = f(Gr; Pr) . \quad (4.16)$$

Für die erzwungene Konvektion gilt:

$$Nu = f(Re; Pr) . \quad (4.17)$$

Prandtl-, Grashof- und Reynolds-Zahl sind wie folgt definiert:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (4.18)$$

$$Gr = \frac{g \beta \Delta\vartheta l^3}{\nu^2} \quad (4.19)$$

$$Re = \frac{v l}{\nu} \quad (4.20)$$

- $\nu$  kinematische Viskosität des Fluids
- $a$  Temperaturleitfähigkeit
- $g$  Fallbeschleunigung
- $l$  Anströmlänge
- $\beta$  räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient des Fluids
- $\Delta\vartheta$  Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Fluid
- $v$  Strömungsgeschwindigkeit

Für verschiedene Stromleiteranordnungen in elektrischen Betriebsmitteln, wurden Berechnungen mit Ähnlichkeitskonstanten u.a. in [2, 4, 9, 15] durchgeführt. Handelt es sich um einfache geometrische Formen lässt sich für den Wärmeübergang der Wärmeübergangskoeffizient näherungsweise bestimmen. Handelt es sich jedoch um komplexere geometrische Anordnungen oder befinden sich zusätzliche Wärmequellen in der Anordnung, muss die numerische Erfassung der Konvektion mittels einer Strömungssimulation des gesamten Modelles erfolgen. Aus den Ergebnissen der Strömungsgeschwindigkeiten und dem Temperaturfeld lässt sich der konvektive Wärmekoeffizient bestimmen [16].

#### 4.1.3.3 Wärmestrahlung

Eine Wärmeübergabe durch Strahlung erfolgt dadurch, dass thermische Energie in Form von elektromagnetischer Energie von festen Körpern oder Gasen ausgesendet wird. Umgekehrt wird die absorbierte Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt, wobei ein materieller Wärmeträger nicht vonnöten ist. Die Wärme- oder Temperaturstrahlung ist von der Temperatur und dem Stoff des strahlenden Körpers abhängig [14]. Die elektromagnetische Strahlung liegt im Wellenlängenbereich von 0,1 bis 1000  $\mu\text{m}$ . Durch Emission und Absorption von Energie findet zwischen Oberflächen unterschiedlicher Temperatur eine Energieübertragung (Wärmestrom) statt [15].

Für die Berechnung der Wärmestrahlung wird als Bezugsgröße die Strahlung eines schwarzen Körpers herangezogen da dieser ein idealer Strahler ist und ein fundiertes physikalisches Modell zur Beschreibung vorliegt. Bei einer bestimmten Temperatur (Wellenlänge) strahlt seine Oberfläche einen charakteristischen Maximalwert ab. Die spektrale spezifische Ausstrahlung von realen Körpern, bei einer bestimmten Oberflächentemperatur, ist stets geringer als die eines schwarzen Strahlers. Die Wärmeleistung, welche zwischen zwei parallelen gleich großen schwarzen Flächen unterschiedlicher Temperatur ausgetauscht wird, errechnet sich mit der *Stefan-Boltzmann-Konstante*  $\sigma$  zu [15]:

$$\dot{Q}_{12} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.21)$$

$$\sigma = 5,67040 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (4.22)$$

Handelt es sich um grau strahlende Oberflächen sind die jeweiligen Emissionszahlen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  zu berücksichtigen.  $C_{12}$  wird dabei als Strahlungsaustauschzahl bezeichnet. Diese hängt von der Geometrie und den Emissionszahlen ab.

Für parallel verlaufende Flächen beträgt  $C_{12}$ :

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.23)$$

Für den Strahlungsaustausch zwischen einem Innen- und einem Außenrohr, wie in Abbildung 4.3 dargestellt ist, ergibt sich  $C_{12}$  zu:

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4.24)$$

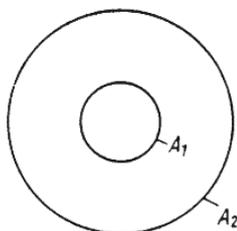


Abbildung 4.3: Innen- und Mantelrohr [15]

Allgemein wird die Strahlungsaustauschzahl wie folgt bestimmt:

$$C_{12} = \varepsilon_{12} \sigma \quad (4.25)$$

Die durch Strahlung entstehende Wärmeleistung errechnet sich folglich zu:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.26)$$

Die Emissionszahl gibt an, wie viel Strahlung ein Körper, im Verhältnis zu einem idealen Strahler (schwarzer Körper), abgeben kann und ist vom Material und der Temperatur abhängig [14]. Ist die Oberfläche des wärmeren Körpers  $O_1$  wesentlich größer als die ihm umgebene, kühlere Oberfläche  $O_2$ , was i.d.R. auf Strombahnelemente zutrifft, dann gilt  $\varepsilon_{12} \approx \varepsilon_1$  [2].

Aus (4.26) und der Wärmeübergangsgleichung nach dem Ansatz von NEWTON

$$P_S = \alpha_S O_S (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4.27)$$

ergibt sich für den Wärmeübergangskoeffizienten der Strahlung die Beziehung:

$$\alpha_S = \frac{\varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \quad (4.28)$$

$T_1$  und  $T_2$  sind hier die absoluten thermodynamischen Wandtemperaturen der beteiligten Flächen. Emissionszahlen von häufig verwendeten Materialien sind aus Tabelle 23 im Anhang zu entnehmen.

Die Anteile der Wärmestrahlung und der konvektiven Wärmeübertragung können zum Begriff *Wärmeübergang* zusammengefasst werden, weil diese in normaler Atmosphäre gemeinsam auftreten. Auch die Wärmeleitung kann einen kleinen Anteil zum Wärmeübergang beitragen, nämlich dort wo in unmittelbarer Nähe zum wärmeabgebenden Körper die Luft steht. Allgemein kann die übertragene Wärmeleistung  $\dot{Q}_W$  wie folgt bestimmt werden:

$$\dot{Q}_W = (\alpha_K + \alpha_S) O (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4.29)$$

In den meisten Fällen treten die erwähnten Vorgänge in Kombination auf, trotzdem müssen sie getrennt voneinander betrachtet werden, da sie ganz verschiedenen Gesetzen unterliegen [14].

Zusammenfassend sei gesagt, dass in stromdurchflossenen Leitern und Isolierungen, auf Grund erwähnter Ursachen, Verlustleistung in Form von Wärme umgesetzt wird. Diese wird einerseits zu einem bestimmten Teil gespeichert und andererseits durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung abtransportiert. Örtlich veränderliche Verlustleistungen, bedingt durch Kontaktstellen, Anschlussbedingungen von Erzeugern und Verbraucher und der unterschiedlichen Stromaufteilung in Leitern und Teilleitern als auch die variierenden Abkühlverhältnisse führen zu unterschiedlichen Temperaturen entlang einer Stromleiteranordnung [4].

## 4.2 Thermische Beanspruchungsgrenze bei Langzeitbeanspruchung

Nachdem die grundlegenden Ursachen für die Erwärmung von elektrischen Betriebsmitteln und die damit verbundenen Mechanismen der Wärmeübertragung besprochen wurden, wird in weiterer Folge das thermische Verhalten im Dauer- und Langzeitbetrieb betrachtet.

Langzeit-Strombelastungen treten im ungestörten Betrieb auf und sind vom jeweiligen Lastfall (Dauer-, Wechsel-, oder Kurzzeitlast) abhängig. Die Strombahn wird durch die betriebsstrombedingte Erwärmung (Dauer- und Überstrom) sowie durch Betriebsschalthandlungen thermisch beansprucht. Die Anforderungen an elektrische Betriebsmittel hängen von ihrem Einsatzort, ihren Aufgaben, ihrer Wichtigkeit, ihrer Instandhaltung und ihrer Umgebung ab. Unabhängig dessen, ist das Ziel eine gesicherte Funktion über die gesamte Lebensdauer zu gewährleisten, welche von einigen Jahren bis hin zu einigen Jahrzehnten betragen kann.

Einer der wesentlichen Faktoren bei der Alterung von elektrischen Betriebsmitteln ist die Temperatur während des Betriebes. Da die Energietechnik, im Vergleich mit anderen Sparten der Elektrotechnik, sehr langlebig und kostenintensiv ist, werden viele der eingesetzten Anlagenteile über eine sehr lange Zeit betrieben. Gleichzeitig wird von ihnen ein hohes Maß an Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit verlangt, weil viele der eingesetzten Betriebsmittel wichtige Bestandteile der Energieversorgungskette sind und ein Ausfall dieser, zu erheblichen wirtschaftlichen und technischen Problemen führen kann.

### 4.2.1 Erwärmungsberechnung von Stromleitern

Bei der Auslegung und Dimensionierung von Stromleiteranordnungen ist die Berechnung der Erwärmung und die Ermittlung der Dauerübertemperatur ein bedeutender Punkt. Die Erwärmungsberechnung eines linienhaften Leiters mit radialer Wärmeströmung (z.B. Kabel, Stromschiene oder Leiterseil) bei konstanten Umgebungsbedingungen und zeitunabhängigen Wärmeleistungen, lässt sich relativ einfach bewerkstelligen. Der Großteil der eingesetzten Betriebsmittel charakterisiert sich jedoch durch einen komplizierten Aufbau, unterschiedliche Wärmespeicherfähigkeiten und Wärmeübertragungsverhältnisse sowie ungleich über die Strombahn verteilte Wärmequellen (z.B. Kontaktstellen). Diese komplexen Gegebenheiten erschweren die Berechnungen deutlich [2].

#### 4.2.1.1 Erwärmungsberechnung über die Leistungsbilanz

Über die Leistungsbilanz des Volumenelements  $dV$  eines linienhaften Leiters, lässt sich die maximale Temperatur bzw. die sich stationär einstellende Temperatur unter bestimmten Belastungsfällen ermitteln. Ist eine zulässige maximale Leitertemperatur vorgegeben, kann

davon der zulässige Strom  $I_{zul}$  abgeleitet werden. Wichtig ist dabei die Festlegung der Randbedingungen (z.B. stationärer oder instationärer Zustand, homogener oder inhomogener Körper, sprunghafte Stromänderung oder zusätzlich vorhandene Wärmequellen).

Grundsätzlich ergibt sich die Leistungsbilanz aus zugeführter Wärmeleistung (Stromwärmeverluste, Erwärmung durch die Umgebung, usw.) zu der Summe aus gespeicherter und abgeführter Wärmeleistung. Je nachdem welcher Betriebszustand betrachtet wird, ergeben sich unterschiedliche Randeinflüsse [2].

Unter stationärer Belastung stellt sich nach einer gewissen Zeit ein stationärer Zustand der Erwärmung ein. Dies ist der Fall, wenn die gesamte Verlustleistung nach außen geführt wird. Die Leiterübertemperatur  $\theta_{end}$ , eines linienhaften, homogenen Leiters, errechnet sich wie folgt [17]:

$$\theta_{end} = \vartheta_{end} - \vartheta_0 = \frac{k I^2 \varrho(\vartheta)}{\alpha U A} \quad (4.30)$$

$$\alpha = \alpha_S + \alpha_K \quad (4.31)$$

$$I_{zul} = \sqrt{\frac{\alpha U A \theta_{zul}}{k \varrho(\vartheta)}} \quad (4.32)$$

$$\theta_{zul} = \vartheta_{zul} - \vartheta_0 \quad (4.33)$$

- $\theta_{end}$  Leiterübertemperatur bei stationärem Betrieb
- $\vartheta_{end}$  stationäre Endtemperatur
- $\vartheta_0$  Umgebungstemperatur
- $\vartheta_{zul}$  zulässige Dauertemperatur
- $\theta_{zul}$  maximal zulässige Übertemperatur des Leiters
- U Umfang

Um die thermische Festigkeit im Dauerbetrieb nicht zu überschreiten, darf der, nach (4.32) berechnete, zulässige Belastungsstrom  $I_{zul}$  nicht überschritten werden. Die zulässige Dauertemperatur  $\vartheta_{zul}$  wird durch die mechanische Festigkeit bei Freileitungsseilen und Schienen als auch durch die Isolation bei Kabeln begrenzt. Die zulässige Übertemperatur des Leiters  $\theta_{zul}$  wird auch noch durch die klimatischen Umgebungsverhältnisse beeinflusst. In Mitteleuropa wird die Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$  in Luft meist mit 35 °C und in Erde mit 25 °C angesetzt. Bei natürlicher Kühlung kann für den Wärmeübergangskoeffizienten, wenn nicht

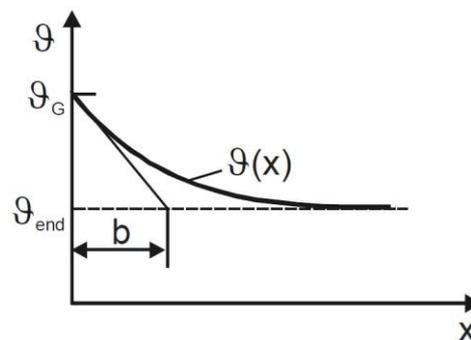
genauere Werte vorliegen, für blanke Leiter in Luft  $\alpha = 20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  und für isolierte Kabel  $\alpha = 5\text{-}15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  angenommen werden [18]. Wird der Leiter künstlich gekühlt, kann  $\alpha = 20\text{-}40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  betragen.

In vielen praktischen Anwendungen entstehen durch Geräte mit elektrischen Verbindungen zusätzliche Wärmequellen. Die Temperaturverteilung längs eines linienhaften Leiter mit einer zusätzlichen Wärmequelle an einem Ende, ergibt sich allgemein zu [17]:

$$\vartheta(x) = a_1 e^{x/b} + a_2 e^{-x/b} + \vartheta_{end} \quad (4.34)$$

$$b = \sqrt{\frac{\lambda A}{\alpha U}} \quad (4.35)$$

Die thermische Ortskonstante  $b$  (4.35), ist ein Maß für die „Reichweite“ einer zusätzlichen Wärmequelle entlang eines Leiters. Sie ist ein wichtiger Einflussfaktor bei der Bestimmung der Erwärmung einer Leiteranordnung. Die Faktoren  $a_1$  und  $a_2$  müssen aus den geltenden Randbedingungen ermittelt werden. Der Einfluss einer zusätzlichen Wärmequelle auf den Leiter beträgt nach  $x = 3b$  nur mehr 5 %. Abbildung 4.4 zeigt die Temperaturverteilung an einem stromdurchflossenen Leiter mit einer zusätzlichen Wärmequelle bei  $x = 0$ .



**Abbildung 4.4:** Temperaturverteilung entlang eines einseitigen unendlich langen, stromdurchflossenen, homogenen Leiters mit zusätzlicher Wärmequelle an der Stelle  $x = 0$  [17]

Wenn sich die Strombelastung über die Zeit ändert (instationärer Betrieb), muss auch das Wärmespeichervermögen des Leiters berücksichtigt werden. Die Temperatur in Abhängigkeit der Zeit wird wie folgt berechnet [17].

Erwärmungsvorgang nach Einschalten des Stroms:

$$\vartheta(t) = \vartheta_{end} (1 - e^{-t/\tau}) + \vartheta_0 \quad (4.36)$$

Abkühlungsvorgang nach Ausschalten des Stroms:

$$\vartheta(t) = \vartheta_{end} e^{-t/\tau} + \vartheta_0 \tag{4.37}$$

$$\tau = \frac{c \rho A}{\alpha U} \tag{4.38}$$

Die thermische Zeitkonstante  $\tau$  ist ein Maß dafür, wie schnell der stationäre Zustand nach einer Belastungsänderung wieder erreicht wird. Die Abweichung zur Endtemperatur beträgt, analog zur thermischen Ortskonstante, nach  $t = 3 \tau$  noch 5 % [1, 17]. Abbildung 4.5 zeigt den Temperaturverlauf, in Abhängigkeit der Zeit, nach einem Einschaltvorgang. Der Temperaturverlauf (Erwärmungs- und Abkühlvorgang) ist von der Betriebsart des Betriebsmittels abhängig und für die Bemessung von Stromleiteranordnungen von Bedeutung. Für intermittierenden Betrieb ist somit eine höhere Belastung zulässig, da die stationäre Endtemperatur nicht vollständig erreicht wird, bevor der Leiter wieder abkühlt [19]. Dies ist aus Abbildung 4.6 gut ersichtlich. Die Leistung  $P$ , welche die Belastung der Leitung repräsentiert, wurde abwechselnd zwischen den Werten  $P_1$  und  $P_2$  erhöht und abgesenkt. Die Leitertemperatur steigt mit höherer Leistung gemäß Gleichung (4.36) an und fällt gemäß Gleichung (4.37) bei niedrigerer Leistung wieder ab.

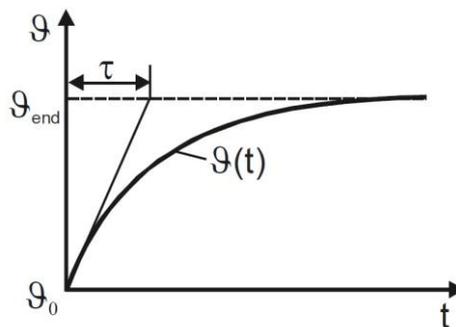


Abbildung 4.5: Temperaturverlauf bei einem Erwärmungsvorgang [17]

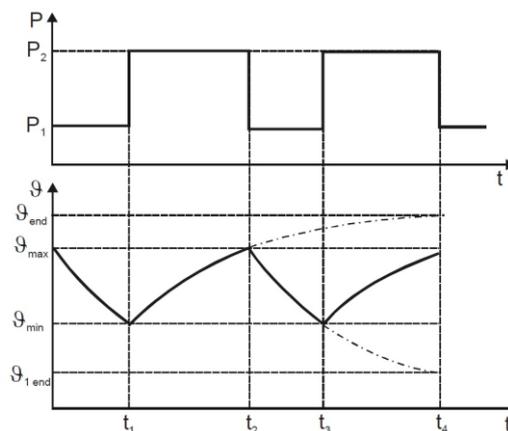


Abbildung 4.6: Leistungs- und Temperaturverlauf für intermittierenden Betrieb [17]

#### 4.2.1.2 Erwärmungsberechnung in Wärmenetzwerken

Temperaturverteilungen in elektrotechnischen Anlagen oder Betriebsmitteln können heutzutage computerunterstützt über sogenannte Wärmenetze ermittelt werden. Basierend auf der Analogie des elektrischen und thermischen Feldes, wird die Wärmenetzmethode schon seit vielen Jahren eingesetzt, um Temperaturentwicklungen in elektrischen Betriebsmitteln vorherzusagen [20]. Ein solches Netzwerk besteht aus Wärmequellen, -kapazitäten und -widerständen, über welche Wärmeübertragungsvorgänge beschrieben werden können. Um solche Netze aufstellen und berechnen zu können, wird das betrachtete Objekt in  $n$  Abschnitte unterteilt und Knotenpunkte, mit entsprechenden Temperaturen, festgelegt. Die Umgebungstemperatur wird als konstante oder veränderliche Temperaturquelle berücksichtigt. Zwischen den definierten Knotenpunkten befinden sich die berechneten Wärmewiderstände, die den Wärmetransport über diese Verbindung beschreiben. Somit lassen sich die Endtemperaturen der Strombahnen, abhängig vom Bemessungsstrom und einer konstanten Umgebungstemperatur, bestimmen. Um die Verläufe der Temperaturen an den Knotenpunkten, bei sich zeitlich ändernden Belastungsströmen und/oder verändernder Umgebungstemperatur zu ermitteln, ist eine Zuordnung von Wärmekapazitäten notwendig. Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung (siehe Abschnitt 4.1.3), zwischen den Knoten und von den Knoten an die Umgebung, werden durch thermische Widerstände  $R_{th}$  beschrieben. Wärmequellen sind aktive Knotenpunkte, sie charakterisieren die Abschnitte im System in denen Verlustleistung erzeugt wird. Wird in einem Abschnitt keine Wärmeleistung umgesetzt, handelt es sich um einen passiven Knoten. Da Wärmewiderstände, -kapazitäten und -quellen von der Temperatur abhängig sind, also nichtlineare Größen darstellen, werden sie iterativ berechnet. Der gesamte Wärmefluss des Netzwerkes muss dabei erfasst werden. Wie viele Abschnitte definiert werden, hängt einerseits von der Größe und dem Aufbau des betrachteten Systems und den relevanten Ergebnissen (z.B. Temperaturen an bestimmten Punkten des Systems) ab, andererseits richtet sich die Anzahl der Abschnitte auch nach den Hilfsmitteln, die für die Berechnung zur Verfügung stehen. Ist ein Wärmenetz aufgestellt kann mit diesem die Temperaturverteilung, bei gegebenen Wärmeströmen und zeitlich konstanter Verlustleistung, die Dauerstrombelastbarkeit unter Einhaltung vorgegebener Grenztemperaturen und der Temperaturverlauf, bei sich ändernden Leistungen, bestimmt werden [1, 2]. Wärmenetze sind heutzutage ein wichtiges Instrument für den Entwurf und die Entwicklung verschiedenster Betriebsmittel auf dem Gebiet der Hochstrom- und Hochspannungstechnik [20].

## 4.2.2 Thermische Beanspruchung von Leiterwerkstoffen

### 4.2.2.1 Leiterwerkstoffe und ihre Eigenschaften

Leitungen in der Energietechnik werden auf den maximalen Betriebsstrom ausgelegt und dementsprechend konstruiert. Dabei hängt die Auswahl des Leiterwerkstoffes, -querschnitts und -profils von einigen Kriterien ab, welche in Summe eine Gesamtoptimierung der Anlage anstreben [4]. Kupfer und Aluminium sind die am häufigsten eingesetzten Leiterwerkstoffe in der Elektroenergietechnik. Eisen und Stahl dienen als Konstruktionswerkstoffe in elektrischen Anlagen. Des Weiteren wird Stahl im Bereich des Blitzschutzes sowie als Band- und Flachstahl für Erdungsschienen eingesetzt [5]. Für Leiterseile kommen Aluminiumlegierungen wie E-AlMgSi (Aldrey) und Aluminium-Zirkon-Legierungen (TAL-Seile) häufig zum Einsatz. Messing und Bronze dienen meist als Konstruktionswerkstoffe [19, 21].

#### ***Kupfer als Leiterwerkstoff***

Der weit verbreitete Einsatz von Kupfer als Leiterwerkstoff basiert auf seinen überzeugenden Eigenschaften, wie der sehr guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, guter Be- und Verarbeitbarkeit, Korrosionsbeständigkeit, welche durch spezielle metallurgische Behandlungen optimal an die Einsatzanforderungen angepasst werden kann sowie die ausreichende mechanische Festigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit ist die wichtigste Eigenschaft von Kupfer. Je reiner das Kupfer, desto höher ist diese. Nach dem *International Annealed Copper Standard* (IACS) muss Kupfer für elektrische Leitungen eine Mindestleitfähigkeit von  $58,0 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$  sowie eine Reinheit von  $> 99,95 \%$  aufweisen. In den deutschen DIN-Normen bekommt Leitungskupfer den Zusatz „E“ (z.B. E-Cu58) um ihn eindeutig als Werkstoff für die Elektrotechnik auszuweisen [21]. Hier wird eine Mindestleitfähigkeit von  $57,0 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$  und eine Reinheit  $> 99,9 \%$  verlangt [22]. Der Bezugswert für die Leitfähigkeit von Kupfer wird im IACS festgelegt [23, 24].

Durch die sehr gute Wärmeleitfähigkeit kann die Wärme an Kontaktstellen oder in Kabeln und Leitungen besser und schneller abtransportiert werden, wodurch die Strombelastbarkeit gesteigert werden kann [25]. Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten technisch reiner Metalle. Daraus ist erkennbar, dass nur Silber eine bessere Leitfähigkeit als Kupfer besitzt. Auf Grund seines hohen Preises wird Silber jedoch nur bei Sonderanwendungen, wie z.B. bei Oberflächenveredelungen, eingesetzt [7].

Die hohe Korrosionsbeständigkeit gegen Witterungseinflüsse in der Atmosphäre beruht darauf, dass sich eine gleichmäßige Schutzschicht aus Korrosionsprodukten auf der Oberfläche, der Patina, ausbildet und einen weiteren Angriff durch chemische Einflüsse stark verzögert. Da Kupfer in der Spannungsreihe edler als Wasserstoff ist, wird es ohne

Vorhandensein von Oxidationsmitteln in Wasser oder wässrigen Lösungen nicht angegriffen. Die Ausbildung der Schutzschicht auf der Oberfläche kann verhindert werden, wenn auf Grund von einwirkenden Stoffen Komplexsalz gebildet wird. Hierbei werden  $\text{Cu}^+$ -Ionen abgetragen und müssen vom Grundwerkstoff ersetzt werden. In reiner, trockener Luft bei Raumtemperatur, wird blankes Kupfer von einer dünnen halbleitenden Kupferoxidschicht ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) überzogen, welche die Beständigkeit des Werkstoffes gegen verunreinigte Luft erhöht [25]. Bei höheren Temperaturen bildet sich eine  $\text{CuO}$ -Schicht auf der Oberfläche aus. Enthält Luft Verbindungen von Ammoniak oder Chlor können diese zu einer Korrosion des Leiterwerkstoffes führen.

**Tabelle 3: relative elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit technisch reiner Metalle [25]**

Metall	Relative elektrische Leitfähigkeit (Kupfer = 100 %)	Relative Wärmeleitfähigkeit (Kupfer = 100 %)
Silber (Ag)	106	108
Kupfer (Cu)	<b>100</b>	<b>100</b>
Gold (Au)	72	76
Aluminium (Al)	62	56
Magnesium (Mg)	39	41
Zink (Zn)	29	29
Nickel (Ni)	25	15
Cadmium (Cd)	23	24
Kobalt (Co)	18	17
Eisen (Fe)	17	17
Stahl	13 - 17	13 - 17
Platin (Pt)	16	18
Zinn (Sn)	15	17
Blei (Pb)	8	9

Für viele elektrische Anwendungen müssen die mechanischen und thermischen Eigenschaften von Kupfer verbessert werden, was allerdings oft zu einer Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften führt. Durch spezielle Herstellungsprozesse und durch Zugabe von Additiven kann der Werkstoff an die geforderten Belastungen angepasst werden. Beispiele für Kupferlegierungen sind Kupfer-Silber (Cu-Ag), Kupfer-Beryllium (Cu-Be), Kupfer-Cadmium (Cu-Cd), Kupfer-Tellur (Cu-Te), Bronze und Messing [23, 24].

Auf die mechanischen Eigenschaften von Leiterwerkstoffen wird in Abschnitt 5.3 näher eingegangen. Eine übersichtliche Auflistung der wichtigsten elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften der gebräuchlichsten Leiterwerkstoffe befindet sich in Tabelle 21 im Anhang.

### **Aluminium als Leiterwerkstoff**

Bei Aluminium steht der sehr geringen Dichte von  $2,7 \text{ kg/dm}^3$  [27], eine niedrige Leitfähigkeit sowie mechanische Festigkeit gegenüber. Die mechanischen Güterwerte lassen sich jedoch durch geeignete Wärmebehandlungen und spezielle Legierungssätze steigern [7]. In deutschen Normen wird für Leitungsaluminium (E-Al) eine Leitfähigkeit von mindestens  $36 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$  vorgeschrieben, was einen Reinheitsgrad von 99,5 % bedeutet [22]. Aluminiumleiter und Leiter mit Aluminiumlegierungen (z.B. E-AlMgSi „Aldrey“) werden auf Grund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit und des geringen Gewichts für Freileitungen in Übertragungs- und Verteilnetzen, in Kombination mit anderen Werkstoffen, wie z.B. Stahl, sehr verbreitet eingesetzt. Im Bereich der Hochspannungstechnik ist heutzutage Aluminium der wirtschaftlichste Werkstoff um Energie zu übertragen [28].

Durch eine 0,001 mm dünne fest haftende Oxidschicht, welche den Werkstoff überzieht, ist in normaler Atmosphäre sowie auch in vielen anderen Medien die Korrosionsbeständigkeit gewährleistet. Allerdings kann diese schützende Oxidschicht von aggressiven Salzsäuren, Laugen und Chloriden angegriffen werden, weswegen bei Leitern in exponierten Umgebungen spezielle Korrosionsschutzmaßnahmen, wie z.B. Korrosionsschutzanstriche, erforderlich sind [4]. Diese Schicht ist allerdings nicht elektrisch leitend und kann deshalb bei Kontaktflächen den Übergangswiderstand erhöhen.

### **Vergleich von Kupfer und Aluminium als Leiterwerkstoff**

Auf Grund der sehr unterschiedlichen Dichten und Leitfähigkeiten beider Materialien besitzt ein Aluminiumleiter das 1,6-fache Volumen (Querschnitt) bzw. die 1,27-fache Oberfläche (Durchmesser) eines Kupferleiters mit demselben elektrischen Widerstandswert [4]. Der Aluminiumquerschnitt ist bei der gleichen Erwärmung durch den Betriebsstrom bezogen auf Kupfer 1,4mal größer [5]. Bezüglich des Gewichts liegt der Vorteil beim Aluminiumleiter, weil er nur etwa halb so schwer ist, wie der vergleichbare Leiter aus Kupfer [7]. Aus ökonomischer Sicht sollte Kupfer nur bei Anwendungen, bei denen Dauertemperaturen von  $> 110^\circ\text{C}$  und hohe mechanische Beanspruchungen auftreten sowie dort wo eine bessere Korrosionsbeständigkeit und eine effizientere Raumausnutzung gefragt ist, eingesetzt werden [4]. Ein wesentlicher Punkt der für das Aluminium spricht ist der Rohstoffpreis. Für eine Tonne Aluminium betrug dieser im Oktober 2011 rund 1.600,- €. Eine Tonne Kupfer kostete zum gleichen Zeitpunkt ca. 3,4-mal so viel (5.445,- €) [29]. Laut dem deutschen Kupfer Institut [26] summieren sich die Kosten für den Leiterwerkstoff bei der Herstellung einer Kupferleitung auf das Dreifache der Kosten einer äquivalenten Aluminiumleitung. Für den Einsatz in elektrischen Maschinen, ausgenommen einiger spezieller Anwendungen, wird

wegen der besseren elektrischen Leitfähigkeit und der damit verbundenen Platzersparnis (geringere Querschnitte) zum größten Teil Kupfer verwenden. Bei Kabel hat dieses Argument nicht viel Gewicht, da die Isolierung den Löwenanteil am Gesamtquerschnitt einnimmt und der Leiterquerschnitts-Aufschlag für Aluminium darin mehr oder weniger unter geht.

Kupfer und Aluminium stehen bezüglich ihrer Verwendung als Leiterwerkstoffe in Konkurrenz, jedoch gibt es keine prinzipiellen Vorschriften welcher Werkstoff für bestimmte Anwendungen verwendet werden soll. Es unterliegt dem Hersteller mit welchem Material er seine Betriebsmittel konstruiert, jedoch sind im Vorfeld die technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte für jeden speziellen Anwendungsfall auszuarbeiten und abzuwiegen [21]. Tabelle 4 enthält einige Vergleichszahlen für E-Cu und E-Al bezüglich des Querschnitts, des Leitwerts und der Erwärmung.

**Tabelle 4: Vergleichszahlen für E-Cu mit E-Al (E-Cu = 1) [21]**

	E-Cu:E-Al
<b>1. querschnittsgleich</b>	
Gewicht	1:0,37
Leitwert	1:0,63
Stromstärke bei gleicher Erwärmung	1:0,8
<b>2. leitwertgleich</b>	
Querschnitt	1:1,6
Durchmesser und Oberfläche	1:1,27
Gewicht	1:0,49
Thermische Grenzstromdichte <sup>1</sup>	1:1,06
Schmelzstrom	1:1
<b>3. erwärmungsgleich</b>	
Querschnitt	1:1,37
Durchmesser und Oberfläche	1:1,17
Gewicht	1:0,42
Thermische Grenzstromdichte <sup>1</sup>	1:0,93
Schmelzstrom	1:0,87
<b>4 Biegefestigkeit [5]</b>	
Querschnitt	1:1,9-2,2

<sup>1)</sup> Thermische Grenzstromdichte, ist die Stromdichte bei der nach 1 s Belastung die Leitertemperatur von 35 °C auf 200 °C ansteigt. Wärmeableitung vernachlässigt.

#### 4.2.2.2 Wärmedehnung

Bei festen Stoffen kommt es allgemein mit steigender Temperatur zu einer Zunahme der Länge, der Fläche und des Volumens. Die Volumenänderung beträgt in einem Temperaturbereich von 0 Kelvin bis zur Schmelztemperatur ca. 7 %. Der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_l$  ist ein Maß für die thermische Ausdehnung von Stoffen. Er ist selbst auch temperaturabhängig und steigt bei vielen Werkstoffen stetig an, weshalb die lineare Beziehung nur für einen bestimmten Temperaturbereich gilt (siehe Abbildung 4.7). Eine allgemeine Regel besagt, je höher die Schmelztemperatur eines Werkstoffes ist, umso kleiner ist  $\alpha_l$  [30].

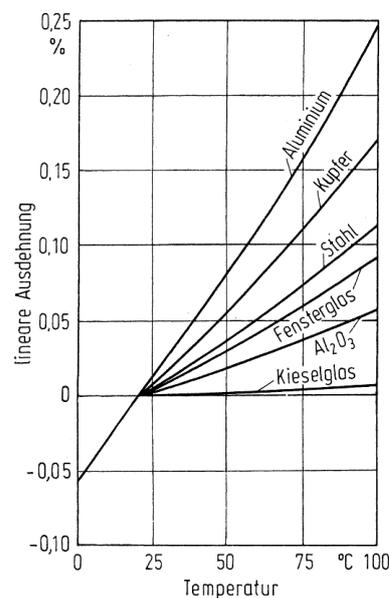


Abbildung 4.7: Thermische Ausdehnung unterschiedlicher Werkstoffe [30]

Die Länge sowie das Volumen eines festen Stoffes, bei einer bestimmten Temperatur, errechnen sich zu [10]:

$$l_{\vartheta} = l_{\vartheta_0} [1 + \alpha_l (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (4.39)$$

$$V_{\vartheta} = V_{\vartheta_0} [1 + 3\alpha_l (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (4.40)$$

Durch die Erwärmung dehnt sich das Leitermaterial aus und es entstehen geometrische Veränderungen. Erhöht sich z.B. die Temperatur einer 10 m langen Stromschiene aus Kupfer um 50 Kelvin, nimmt die Länge um 8,5 mm zu. Bei einer baugleichen Aluminiumschiene beträgt die Längenänderung 11,5 mm.

Werte für den Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha_l$  sind aus Tabelle 21 zu entnehmen.

Diese Längenänderungen können bei Schienen mit geringer Dicke zu Ausknickungen und zu Deformationen führen. Um dies zu vermeiden, werden an langen Strombahnen Dehnungsbänder oder s.g. Ausdehnungsstücke angebracht. In gasisolierten Schaltanlagen (GIS) und in gasisolierten Leitungen (GIL) werden Gleitkontakten eingesetzt, um diese Längenänderungen zu kompensieren. Handelt es sich um Kompaktschienensysteme mit sehr großen Querschnitten, wie es in Gleichspannungs-Hochstromanlagen der Fall ist, muss das gesamte Schienensystem durch spezielle konstruktive Maßnahmen, wie Gleitrollen, -böcke und Dehnungsstellen, gegen diese veränderlichen Längendehnungen geschützt werden [1, 4].

### 4.2.2.3 Thermomechanische Spannungen

Temperaturbedingte Längenänderungen, siehe Abschnitt 4.2.2.2, führen zu thermomechanischen Spannungen in allen Werkstoffen. Im Normalbetrieb sind der Temperaturverlauf  $\vartheta(t)$  und die Temperaturverteilung  $\vartheta(x)$  i.d.R. konstant bzw. homogen. Hier treten in Einstoffsystemen, bei denen nur ein Werkstoff vorhanden ist, keine Spannungen auf. Werden Kombinationen aus verschiedenen Stoffen eingesetzt (Mehrstoffsysteme, Verbundsysteme), besitzen diese meist unterschiedliche Wärmeausdehnungseigenschaften und es entstehen Wärmespannungen zwischen den beteiligten Stoffen.

	1		2	
	Normalbetrieb		Kurzschluss	
Temperaturverlauf $\vartheta(t)$				
Temperaturverteilung $\vartheta(x)$				
	Dauerbelastung Einstoffsystem		Kurzzeitbelastung Ein-/Mehrstoffsystem	
		Mehrstoffsystem	E-Modul „klein“ („Gummi“)	E-Modul „groß“ („Glas“)
Thermomechanische Spannungen $\sigma$	$\sigma = 0$	$\sigma(\vartheta, x)$	$\sigma \approx 0$	$\sigma(\vartheta, tx)$

Abbildung 4.8: Einfluss der Strombelastung auf mechanische Spannungen [2]

Bei Kurzzeitbeanspruchungen ist der Temperaturverlauf  $\vartheta(t)$ , auf Grund der raschen Erwärmung und der folgenden Abkühlung, instationär. Die räumliche Verteilung der Temperatur  $\vartheta(x)$  ist ungleichmäßig, wobei die höchsten Temperaturen im Bereich der Fehlerstelle und an exponierten Stellen zu finden sind. In sind Stoffe mit hohem Elastizitätsmodul kommt es dadurch ebenfalls zu thermomechanischen Spannungen [2]. In Abbildung 4.8 sind der Temperaturverlauf und die Temperaturverteilung im Normalbetrieb sowie bei einem Kurzschluss schematisch dargestellt.

#### 4.2.2.4 Einfluss der Temperatur auf die mechanische Festigkeit

Nimmt die Temperatur über eine längere Zeit hindurch andauernd zu, d.h. sie liegt deutlich über der zulässigen Betriebstemperatur des Leiters, wirkt sich das negativ auf die mechanische Festigkeit des Leiterwerkstoffes aus. Bei Aluminium macht sich dieser Effekt deutlich stärker bemerkbar als bei Kupfer. Tabelle 5 beinhaltet Wert für die Festigkeit von Aluminium bei verschiedenen Temperaturen.

**Tabelle 5: Temperatureinfluss auf die Festigkeit von Aluminium [19]**

Temperatur	°C	20	100	160	250
Zugfestigkeit $\sigma_B$	N/mm <sup>2</sup>	90-130	90-120	80-110	70-30
Streckgrenze $R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	80-120	80-110	70-100	60-30
Bruchdehnung	%	10-5	10-5	11-7	bis 60

Bei Temperaturen über 100 °C beginnt hart gezogenes Aluminium zu rekristallisieren. Dadurch kommt es zu einem Verlust der Festigkeit, wodurch die mechanische Belastbarkeit sinkt. Durch den Einsatz spezieller Werkstoffzusätze oder Werkstoffkombinationen, kann die Belastbarkeit bei höheren Temperaturen jedoch gesteigert werden. Durch die Zugabe geringer Mengen an Zirkon, erhöht sich die Rekristallisationstemperatur von Aluminium auf ca. 200 °C. Die übrigen Eigenschaften des Werkstoffes bleiben dabei nahezu unverändert [71]. Abbildung 4.9 zeigt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit  $\sigma_B$  von der Werkstofftemperatur.  $\sigma_{B1}$  ist hier die Zugfestigkeit vor der Temperaturerhöhung und  $\sigma_{B2}$  die Zugfestigkeit nach der der Erhöhung. Bei Temperaturen über 200 °C, sinkt die Festigkeit von Aluminium auf 50 % ab. Des Weiteren ist zu erkennen, dass Aluminium-Stahl-Seile bei hohen Temperaturen wesentlich weniger an Festigkeit verlieren als Seile aus Aldrey oder Kupfer.

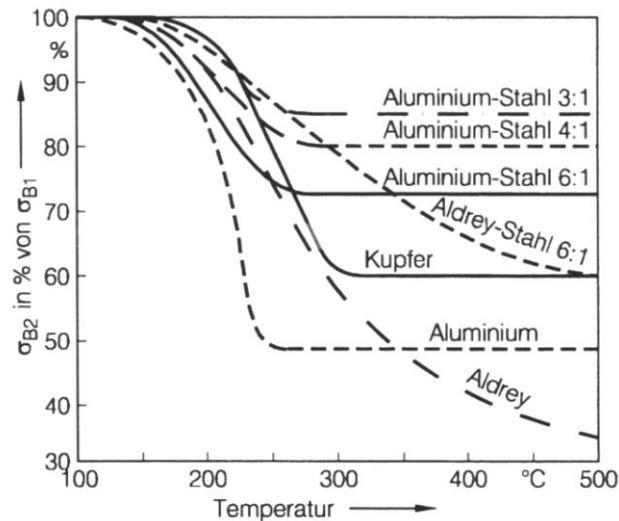


Abbildung 4.9: Festigkeit von Leiterwerkstoffen, abhängig von der Temperatur [71]

Allgemein kann also festgehalten werden, dass die mechanische Festigkeit von Werkstoffen deutlich von deren Temperatur abhängig ist.

#### 4.2.2.5 Das Werkstoffkriechen

Eine zeit- und temperaturabhängige, plastische Verformung unter Lasteinwirkung, wird als Kriechen bezeichnet. Dieser Vorgang tritt an Metallen, Polymeren und Keramikwerkstoffen auf und ist stark von der Mikrostruktur und der Temperatur abhängig. Bei höheren Temperaturen können plastische Verformungen schon bei geringen Spannungen im Material weiter fortschreiten, wobei hingegen bei niedrigen Temperaturen die Verformung durch Verfestigung zum Stillstand kommt. Um grobe Abschätzungen treffen zu können, ab wann ein Werkstoff zu kriechen beginnt, kann man die Schmelztemperatur als Bezugswert nehmen. Die Grenze bei der ein nennenswertes Kriechen beginnt ist bei  $T \geq 0,3 T_s$ . Unterhalb dieser Grenze verlangsamt sich das Kriechen deutlich. Durch technische Versuche werden die Zeitstandsfestigkeit (Spannung bei der nach einer bestimmten Zeit der Bruch der Probe eintritt) sowie die Zeitdehngrenze (Spannung bei der nach einer vorgegebenen Zeit eine gewisse Dehnung bleibt, z.B. 0,2 % nach 1000 h) bestimmt. Das Kriechen ist ein Vorgang, der über längere Zeit betrachtet, das Verhalten des Werkstoffes verändert und ihn dadurch schädigt [30].

Auf Grund der gegen Null gehenden Kriechgeschwindigkeit, hat Kupfer eine hohe Zeitstandsfestigkeit. Abbildung 4.10 zeigt Verläufe der Mindestkriechgeschwindigkeit in Abhängigkeit der mechanischen Belastung, von Kupfer und Aluminium bei unterschiedlichen Temperaturen. Unter einer Belastung von ca.  $25 \text{ N/mm}^2$  beträgt die

Mindestkriechgeschwindigkeit von Aluminium mit 20 °C, 0,01 %/1000 h. Erhöht man die Temperatur des Werkstoffes auf 80 °C verringert sich die zulässige Belastung auf 8 N/mm<sup>2</sup>. E-Cu hat die gleiche Mindestkriechgeschwindigkeit bei der Belastung von ca. 20 N/mm<sup>2</sup> und Temperaturen bis 150 °C. Kupfer hat somit im Vergleich mit Aluminium, bei hohen Temperaturen, eine wesentlich bessere Zeitstandfestigkeit [25].

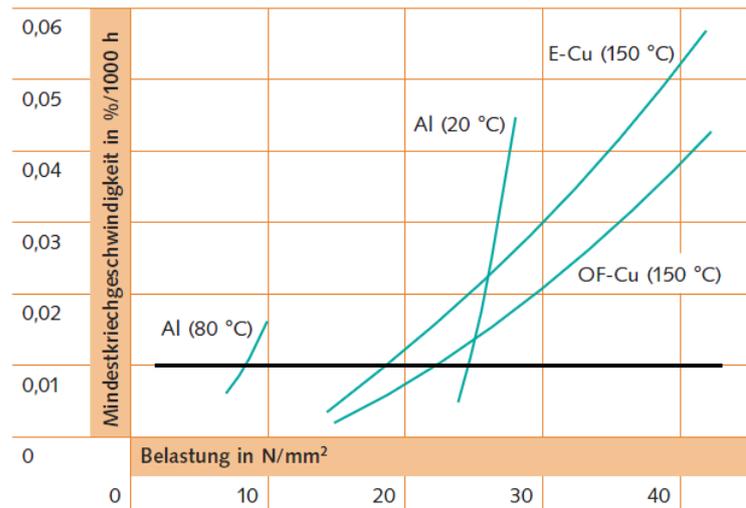


Abbildung 4.10: Typisches Kriechverhalten von Kupfer und Aluminium [25]

Durch das Werkstoffkriechen, verringert sich auch die Kontaktdruckkraft von Schraub und Klemmverbindungen. Dadurch können Verbindungen locker werden, wodurch die Kontaktgabe und die mechanische Verbindung beeinflusst werden.

#### 4.2.2.6 Materialermüdung

Auf Grund wechselnder Temperatur, aber auch durch wechselnde mechanische Belastungen, UV- oder radioaktive Strahlung als auch chemische Einwirkungen aus der Umgebung, wird der Werkstoff geschädigt. Dieser langsam voranschreitende Prozess, wird als Materialermüdung bezeichnet. Dabei können unkritische Belastungen, die noch unterhalb von Materialgrenzwerten liegen, bereits zu Funktionsschädigungen (z.B. Ermüdungsrissbildung) oder auch zum Totalausfall (z.B. Ermüdungsbruch) eines Bauteils führen, wenn es häufig und/oder über eine längere Zeit belastet wird. Mittels spezieller Dauerversuche lässt sich die Lebensdauer eines Werkstoffes bestimmen [30].

## 4.2.3 Thermische Beanspruchung von Isolierwerkstoffen

### 4.2.3.1 Aufgaben und Arten von Isolierstoffen

Hauptaufgabe der Isolierstoffe ist es spannungsführende Leiter gegeneinander und gegen Erde zu isolieren. Zusätzlich müssen sie mechanische Aufgaben erfüllen sowie thermischen und chemischen Beanspruchungen, die meistens gleichzeitig auftreten, standhalten.

Während der bemessenen Lebensdauer dürfen keine Durch- und Überschläge bei allen zu erwartenden Dauer- und Überspannungen entstehen. Die Isolierung ist an die Strombahn anzupassen und muss elektrotechnischen und betrieblichen Anforderungen entsprechen. Die Verlustwärme, welche im Stromleiter erzeugt wird, muss durch die Isolierung an die Umgebung abgegeben werden [2].

In der Energietechnik werden verschiedenste Isolierstoffe und Kombinationen aus diesen eingesetzt. Die Wahl des Isoliermediums hängt dabei vom Einsatzort, der Höhe und Art der Betriebsspannung, den Belastungen während des Betriebs, der Art der Anwendung und vielen weiteren Kriterien ab. Tabelle 6 zeigt eine Auflistung der Isolierstoffe nach Stoffgruppen sortiert und einige Anwendungsbeispiele.

**Tabelle 6: Einteilung der Isolierstoffe und deren Anwendungen [13]**

Stoffgruppe	Isolierstoffe	Anwendungsbeispiele
Gase	Luft, SF <sub>6</sub> , u.v.m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Freiluftisolierungen,</li> <li>- gekapselte, druckgasisolierte Anlagen, Schalter (SF<sub>6</sub> als Isolier- und Löschmedium),</li> <li>- u.v.m.</li> </ul>
Anorganische feste Isolierstoffe	Keramik, Porzellan, Glas, Glimmer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trag-, Stütz- und Gehäuseisolatoren,</li> <li>- Kappenisolatoren,</li> <li>- Verstärkungen aus Glasfasern,</li> <li>- Glimmerpapier in elektrischen Maschinen,</li> <li>- u.v.m.</li> </ul>
Hochpolymere Kunststoffe		
Thermoplaste	Polyethylen, PVC, u.v.m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kabelisolierungen,</li> <li>- Kondensatordielektrika,</li> <li>- Gerätegehäuse,</li> <li>- u.v.m.</li> </ul>
Duroplaste und Elastomere	Epoxidharz, Polyurethan, Silikonelastomere, u.v.m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolierkörper,</li> <li>- Verguss von Bauteilen,</li> <li>- Kabelisolierungen,</li> <li>- u.v.m.</li> </ul>
Isolierflüssigkeiten	Mineralöl, pflanzliche Öle, synthetische Flüssigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformatoren,</li> <li>- Ölkabel,</li> <li>- Kondensatoren,</li> <li>- Wandler</li> <li>- Durchführungen,</li> <li>- u.v.m.</li> </ul>
Faserstoffe	Papier, Pressspan, synthetische Stoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dielektrische Barrieren und Formteile in Kondensatoren, Kabel, Durchführungen, Wandlern und Transformatoren,</li> <li>- u.v.m.</li> </ul>

Die vom Betriebsstrom verursachten Stromwärmeverluste im Leiter führen dazu, dass sich die, ihn umgebende bzw. berührende, Isolierung erwärmt. Zusätzlich tragen auch Einflüsse aus der Umgebung, wie die Sonneneinstrahlung, die Umgebungstemperatur und die dielektrischen Verluste, zur Erwärmung bei.

#### **4.2.3.2 Thermische Wirkung auf gasförmige und flüssige Isolierstoffe**

In gasisolierten gekapselten Anlagen kommt es durch das Temperaturgefälle zwischen dem erwärmten Leiter und der geerdeter Kapselung zu einer Veränderung der lokalen Gasdichte und somit zu einer örtlich verminderten elektrischen Festigkeit [2].

Bei Isolierflüssigkeiten muss deren thermische Ausdehnung berücksichtigt werden. Flüssigkeiten dehnen sich bei Erwärmung wesentlich stärker aus als Festkörper und nehmen somit mehr Volumen in Anspruch [10]. Eine wichtige Größe ist hierbei der Volumenausdehnungskoeffizient  $\gamma$ , der bei Isolierflüssigkeiten ca. 0,0007 bis 0,001  $K^{-1}$  beträgt. Aus diesem Grund müssen bei bestimmten Betriebsmitteln spezielle Kompensationsvorrichtungen vorgesehen werden (z.B. Gaspolster oder Ausdehnungsgefäße bei Transformatoren) [13].

#### **4.2.3.3 Thermische Wirkung auf Feststoffisolierungen**

##### ***Thermomechanische Spannungen***

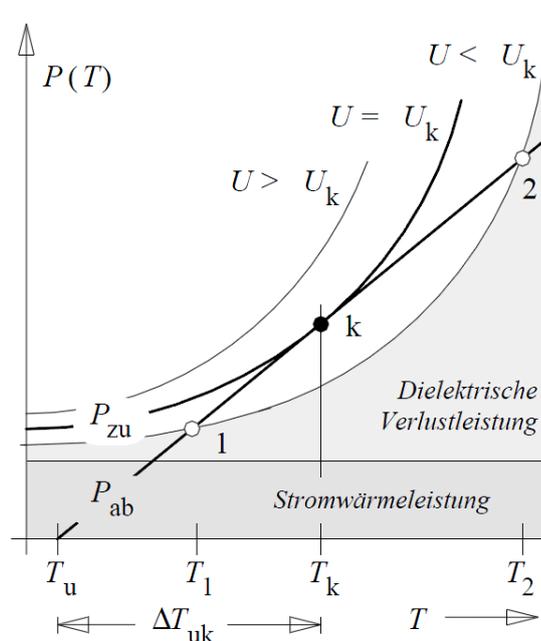
Thermomechanische Spannungen entstehen durch Wärmedehnungen in festen Stoffen (siehe Abschnitt 4.2.2.3). Problematisch wird dies, wenn es zu Verschiebungen zwischen dem Leiter und der Isolierung oder zwischen angrenzenden Isolierschichten kommt. In diesen Bereichen entstehen dann Verformungen und Veränderungen des Aufbaus, wodurch die Spannungsfestigkeit vermindert werden kann und die Durchschlagspannung  $U_d$  herabgesetzt wird.

##### ***Der Wärmedurchschlag***

Die zugeführte Wärmeleistung  $P_{zu}$  in einem Isoliermedien setzt sich grundsätzlich aus den, von außen zugeführten, Stromwärmeverlusten  $P_{St}$  und den dielektrischen Verlusten  $P_D$  zusammen.

$$P_{zu} = P_{St} + P_D \quad (4.41)$$

Ist die Wärmebilanz ausgeglichen ( $P_{zu} = P_{ab}$ ) oder wird die Isolierung ausreichend gekühlt, befindet sich die Isolierstofftemperatur in einem stabilen Zustand. Übersteigt die zugeführte die abgeführte Wärmeleistung, ist die Anordnung nicht mehr thermisch stabil und die Ausbildung von Wärmedurchschlägen wird begünstigt, siehe Abbildung 4.11.



**Abbildung 4.11: Bilanz aus zu- und abgeführter Wärmeleistung beim Wärmedurchschlag mit stabilen (1) und instabilen (2, k) Arbeitspunkten zur Ermittlung der s.g. thermischen Kippspannung [13]**

hier:  $T_k$  = Temperatur im Punkt k,  $T_1$ ,  $T_2$  = Temperatur in Punkt 1 bzw. 2,  $T_u$  = Umgebungstemperatur

Es kann für den Wärmedurchschlag keine materialspezifische Größe für die Durchschlagfeldstärke angegeben werden. Die Durchschlagsspannung (Kippspannung  $U_k$ ) ergibt sich, unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen und der Geometrie, aus der Wärmebilanz von zu- und abgeführter Wärmeleistung.

In Abhängigkeit von den thermischen Bedingungen des Isolierkörpers, findet dieser Prozess innerhalb weniger Sekunden bis zu mehreren Stunden statt. Man unterscheidet zwischen globalen und lokalen Wärmedurchschlägen. In homogenen Dielektrika, kommt es bei homogenen Belastungen zu „globalen“ Erwärmungen. In inhomogenen oder mit Inhomogenitäten (Schwachstellen) belasteten Dielektrika, entstehen lokale Erwärmungen (hot-spots). Abbildung 4.12 zeigt Wärmeströme beim globalen und lokalen Wärmedurchschlag für verschiedene Anordnungen. Wird ein thermisch instabiler Zustand erreicht, führen die örtlich begrenzten hot-spots zur Ausbildung von Durchschlagskanälen. Das Entstehen und die Ausbildung von Wärmedurchschlägen hängen somit von vielen Faktoren, wie den Materialeigenschaften, der Isolierstoffgeometrie, der Erwärmung und der Wärmeabfuhr, ab [13].

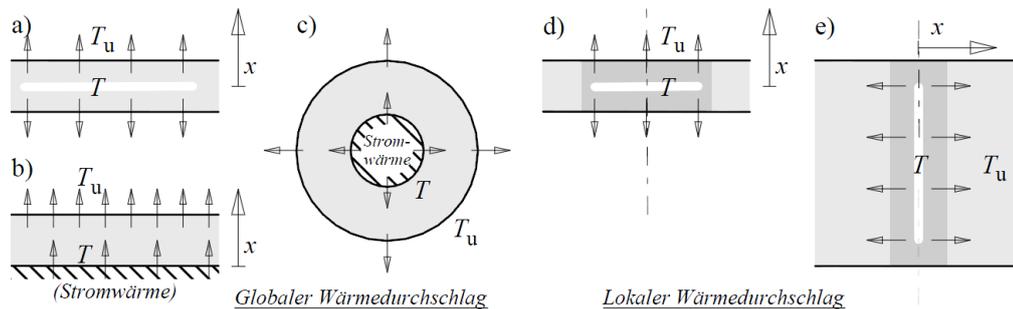


Abbildung 4.12: Wärmeströme beim globalen und lokalen Wärmedurchschlag für beispielhafte Anordnungen [13]

Die Bereiche höchster Temperatur  $T$  (hot-spots) sind durch weiße Balken gekennzeichnet.  $T_u$  ist hier die Umgebungstemperatur.

- a) Ebene Anordnung mit beidseitiger Wärmeabfuhr über die Elektroden.
- b) Ebene Anordnung mit einseitiger Wärmeabfuhr und zusätzlicher thermischer Belastung durch Stromwärme.
- c) Koaxiale Anordnung mit Belastung durch Stromwärme (z.B. Kabel oder Durchführung)
- d) Ebene Anordnung mit lokaler Erwärmung und beidseitiger axialer Wärmeabfuhr über die Elektroden.
- e) Ebene Anordnung mit lokaler Erwärmung und radialer Wärmeabfuhr in das kühlere Dielektrikum

### Die thermische Alterung

Thermische Alterung ist die kontinuierliche, irreversible Veränderung (Abbau) von Isolationseigenschaften bei Einwirkung erhöhter Temperatur. Die strombedingte Erwärmung, führt dabei zu chemischen Veränderungen im Isolierstoff und bildet Schwachstellen. Prinzipiell unterliegen alle Stoffe einer thermischen Alterung, welche zur Minderung der Lebensdauer stark beitragen [2].

### Die thermoelektrische Alterung

An Schwachstellen in der Isolierung (Fehlstellen, Verunreinigungen, etc.) ist die elektrische Feldstärke erhöht. An diesen Stellen entstehen chemische Veränderungen und Zerstörungen des Isoliermediums. Durch diesen Prozess kann die Temperatur örtlich an der Fehlerstelle erhöht werden. Die erhöhte Temperatur beschleunigt wiederum den Entladungs- und Zerstörungsprozess. Durch diese thermisch-elektrischen Wechselwirkungen wird der Alterungsprozess schneller vorangetrieben. Mittels stofflichen Zusätzen (Antioxydanten, Stabilisatoren) wird versucht dem entgegen zu wirken. Die Zusätze sollen unter Einwirkung des elektrischen Feldes zu den Schwachstellen migrieren. Dem entgegen wirken die temperaturbedingte ungerichtete Bewegung und die konzentrationsabhängige Diffusion im Isoliermedium [2].

Neben der thermischen Beanspruchung tragen auch mechanische, chemische sowie Witterungseinflüsse und Strahlung zur Alterung der Isolierung bei. Folgen daraus sind u.a. Rissbildungen und Materialversprödungen [13]. Als Richtwert für die Grenztemperatur bei Langzeitstrombelastung kann 100 °C angenommen werden. Aber nicht nur die elektrische Festigkeit, sondern auch die mechanische Festigkeit der Isolierung und des Leiters kann durch die eben erwähnten Prozesse verschlechtert werden. Dadurch erhöht sich das Risiko von mechanischen Verformungen im Fehlerfall.

Die strombedingte Erwärmung der Isolieroberfläche hat jedoch auch einen positiven Nebeneffekt, weil sie die Bildung von Tauniederschlägen oder feuchten Fremdschichten auf der Isolierung verringert und verhindern kann. Dadurch kann die elektrische Alterung von organischen Oberflächen, als auch die Ausbildung von Kriechüberschlägen stark reduziert werden [2]. Man kann also von einer Trocknung der Isolierung sprechen.

Im Bereich der Hochstromleitungen, die Betriebsströme von > 15 kA tragen müssen, kann eine Leiterisolierung wegen der großen Verlustwärme und der meistens hohen vorherrschenden Umgebungstemperatur nur schwer oder gar nicht realisiert werden. Für derartige Anwendungen werden Isolierstoffe nur in Kapselungen oder an Stützpunkten eingesetzt. Diese Stoffe müssen den thermischen aber auch den mechanischen Beanspruchungen standhalten und spezielle Eigenschaften, wie hohe Druck-, Zug- und Biegefestigkeit, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient, hohe Durchschlagfestigkeit sowie eine hohe Dauer- und Zersetzungstemperatur, aufweisen. Bei Hartgewebe und Hartschichtholz beträgt die zulässige Dauertemperatur 70 °C, bei Kunstharzgewebebändern liegt diese bei 200 °C. Für Anwendungen bei denen sehr hohe Temperaturen entstehen, eignet sich Keramik (Porzellan) sehr gut, da die zulässige Dauertemperatur um 800 °C und die Zersetzungstemperatur bei 1300 °C liegt [4].

## 4.2.4 Thermische Beanspruchung von elektrischen Kontakten

Lösbare sowie unlösbare Kontakte oder Verbindungen findet man nahezu in allen Bereichen der Nieder-, Mittel- und Hochspannungstechnik. Die Bandbreite reicht vom Mikroschaltern in sensiblen nachrichtentechnischen Schaltkreisen, die nur Ströme im mA-Bereich führen, über Niederspannungs-Schaltgeräte in privaten und industriellen Anlagen bis hin zu Leistungs- und Lasttrennschaltern in elektrischen Erzeugungs- und Übertragungsanlagen mit Stromstärken bis weit über 100 kA.

In den folgenden Abschnitten wird grundlegend auf die Definition und Bestimmung des Kontaktwiderstandes sowie dessen Abhängigkeit von bestimmten physikalischen Eigenschaften eingegangen. Der Kontaktwiderstand ist maßgebend für die erzeugte Verlustleistung bzw. für die entstehende Erwärmung verantwortlich. In weiterer Folge werden Ursachen und Folgen der Erwärmung von ruhenden Kontakten bei Langzeitstrombelastung erläutert und deren Einflüsse auf die Lebensdauer von Verbindungen geschildert.

### 4.2.4.1 Grundlagen elektrischer Kontakte

Als elektrischer Kontakt wird ein Zustand bezeichnet, der durch die stromführungsfähige Berührung zweier Bauteile entsteht. Die Kontaktstücke, wie die sich berührenden Bauteile grundsätzlich genannt werden, haben die Aufgabe einen elektrischen Kontakt herbeizuführen oder aufzuheben und die Energie im geschlossenen Zustand möglichst verlustarm zu übertragen. Betrachtet man Festkörperoberflächen näher, so erkennt man, dass diese stets rau sind und eine gegenseitige Berührung der Kontaktstellen nur partiell geschieht. Diese mikroskopisch kleinen Berührungsflächen werden auch „a-spots“ genannt. Beim Zusammendrücken beider Kontaktstücke verformen sich die höchsten Mikrospitzen, wodurch vorhandene Fremdschichten aufreißen oder in benachbarte Täler abgedrängt werden. Grundsätzlich bilden sich bei der Verbindung von Kontaktflächen gut kontaktierte Bereiche, von einer Fremdschicht getrennte Bereiche und Gebiete die nicht in Berührungen getreten sind. Dadurch werden in der Kontakttheorie folgende Begriffe unterschieden [24]:

scheinbare Kontaktfläche $A_s$	(= die zur Kontaktabgabe bestimmte Fläche)
tragende Kontaktfläche $A_t$	(= Summe aller mikroskopischen Berührungsflächen)
wirksame Kontaktfläche $A_w$	(= Summe aller stromführenden Kontaktflächen (a-spots))
Konturfläche $A_n$	(= zusammenhängende Fläche die alle wirksamen Einzelflächen umfasst).

Abbildung 4.13 zeigt schematisch, den stark vergrößerten Ausschnitt einer Kontaktoberfläche.

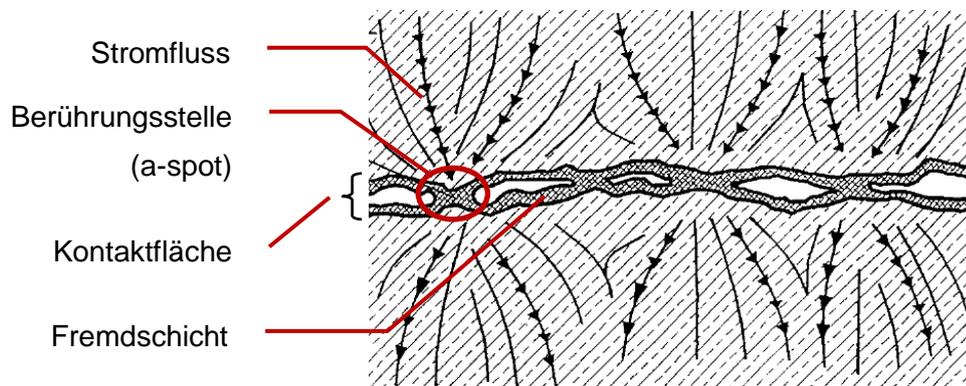


Abbildung 4.13: Kontaktefläche schematisch [31, abgeändert]

Die Anzahl, Größe und Verteilung dieser a-spots hängt von der Kontaktkraft, der Form und Beschaffenheit der Kontaktstücken, dem Kristallgitter, der Temperatur, topografischen Parametern und den Materialeigenschaften ab [24].

### ***Der Kontaktwiderstand***

Durch die Verengung der Strombahnen in den stromführenden Verbindungen, deren Fläche nur wenige  $\mu\text{m}^2$  groß ist [32], entsteht eine Engstelle für den elektrischen Strom. In diesem Bereich kommt es zu einer Einschnürung der Strombahnen, was zu einer unregelmäßigen Stromdichteverteilung entlang des Querschnittes führt. Abbildung 4.14 zeigt den Verlauf der Strombahnen an einer Engstelle [9].

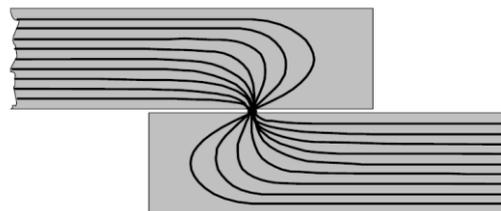


Abbildung 4.14: Elektrisches Strömungsfeld an einer Stromenge [9]

Charakterisiert wird diese Einschnürung durch den Engwiderstand  $R_E$ . Sind zusätzlich Fremdschichten auf den Kontaktflächen vorhanden addiert sich zu dem Engwiderstand noch ein Fremdschichtwiderstand dazu. Da der Widerstand eines Kontaktes für die Höhe der Verlustleistung und somit für die thermische Erwärmung der Verbindungsstelle hauptverantwortlich ist, wird in dieser Arbeit näher auf die Entstehung und die Berechnung von diesem eingegangen.

Nach HOLM [33] setzt sich der Kontaktwiderstand aus zwei Einzelbestandteilen zusammen. Diese sind der Engewiderstand  $R_E$  und der Fremd- oder Dünnschichtwiderstand  $R_F$ .

$$R_K = R_E + R_F \quad (4.42)$$

Typische Werte für den Kontaktwiderstand liegen im Bereich von  $\mu\Omega$  bis einige  $m\Omega$  [32]. Betrachtet man einen fremschichtfreien Kontakt so ist der Engewiderstand die bestimmende Größe für den Widerstand des Kontakts. Für eine kreisförmige Mikrokontakfläche von zwei gleichen Materialien errechnet sich der Engewiderstand auf Basis des sogenannten Ellipsoidmodells wie folgt [33]:

$$R_E = \frac{\rho}{2a} \quad (4.43)$$

a      Radius einer kreisförmigen Kontakfläche

Sind die Abstände zwischen den Mikroflächen groß genug, können die Wechselwirkungen, welche durch die einzelnen Stromflüsse entstehen, vernachlässigt werden und der Engewiderstand wird durch die Summe der a-spots bestimmt.

$$R_E = \frac{\rho}{2 \sum_i a_i} \quad (4.44)$$

Liegen die Mikroflächen eng beieinander, überlagern sich die Potentiale der einzelnen Strombahnen sehr stark und es treten Wechselwirkungen zwischen den fließenden Strömen auf. GREENWOOD geht von ungleichmäßig verteilten Mikroflächen mit unterschiedlichen Radien innerhalb einer Konturfläche aus und formuliert den Engewiderstand aus Summation der Eigen- und Nachbarbeiträge [24].

$$R_E = \frac{\rho}{2 \sum_i a_i} + \frac{3\pi\rho}{32} \left( \sum_{i \neq j} \frac{a_i a_j}{s_{ij}} \right) / \left( \sum_i a_i \right)^2 \quad (4.45)$$

$a_i, a_j$       Radien der kreisförmigen Mikroflächen

$s_{ij}$       Abstand der Mikroflächen

Die wirksame Berührungsfläche  $A_W$ , als auch die Radien der Berührungsflächen und die Anzahl der Berührungspunkte sind von sehr vielen Faktoren abhängig und oft nicht genau zu bestimmen. So ist  $A_W$  eine Funktion der Kontaktkraft, der Temperatur und der Materialeigenschaften. Um genauere Untersuchungen diesbezüglich anzustellen, ist die Unterscheidung zwischen dem elastischen und dem plastischen Bereich einer Engstelle zu treffen [34].

Der Radius der tragenden Fläche  $A_t$  bei einer rein elastischen Verformung für Kugel auf Kugel oder Kugel auf Ebene Anordnung und für senkrecht gekreuzte Zylinder berechnet sich nach:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} F_K \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \left( \frac{1}{r_{z1}} + \frac{1}{r_{z2}} \right)^{-1}} \quad (4.46)$$

$r_{z1}, r_{z2}$  Kugel- bzw. Zylinderradius

Die Poissonsche Zahl  $\mu$  berechnen sich über den Schubmodul  $G$  und den Elastizitätsmodul  $E$  über folgende Beziehung:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 = 0,24 \dots 0,44 \quad (4.47)$$

Die Kontaktkraft  $F_K$  ist dabei die Summe aus mechanischer Kraft, Anziehung- und der entgegen gerichteten Abhebekraft [34]. Letztere wird durch die gegenseitig durchflossenen, eingeschnürten Strombahnen in den a-spots erzeugt und hängt vom Stromquadrat und der Geometrie ab (siehe Abschnitt 5.5) [35].

Der Radius der tragenden Fläche, bei einer plastischen Verformung an der Engstelle, unter der Voraussetzung die Kontakthärte des Werkstoffes  $H_K$  sei eine bekannte Materialgröße, berechnet sich gemäß Gleichung (4.48) [2, 9]. Eisen hat eine Kontakthärte von  $0,6 \text{ kN/mm}^2$ , Kupfer von  $0,4\text{-}0,7 \text{ kN/mm}^2$  und Aluminium von  $0,18\text{-}0,4 \text{ kN/mm}^2$ .

$$a = \sqrt{\frac{F_K}{\pi H_K}} \quad (4.48)$$

Aus oben stehender Gleichung erkennt man, dass die Größen von Kontaktkraft und Kontakthärte wesentlich für die wirksame Kontaktfläche bestimmend sind. Untersuchungen bezüglich der statistischen Verteilung von Mikrospitzenhöhen ebener Kontakte führten zur Erkenntnis, dass es einen Zusammenhang zwischen Engewiderstand und Kontaktkraft gemäß (4.49) gibt.

$$R_E \sim F_K^{-n} \quad (4.49)$$

Nach dem heutigen Wissensstand liegt der Wert für den Exponenten  $n$ , für belastete elektrische Kontakte, zwischen  $0,9$  und  $1$  [24].

Die Beziehungen (4.46) und (4.48) deuten auf einen starken Einfluss der Kontaktkraft auf den Radius der Berührungsfläche hin. Mit größer werdender Kraft  $F_K$ , vergrößert sich die Berührungsfläche  $a$  und auch die Summe der wirksamen Kontaktpunkte, was zu einer

Verkleinerung des Engwiderstands führt. Bei der Dimensionierung von stromführenden Verbindungen sind die Werkstoffeinflüsse (Produkt aus  $C$  und  $\rho$ ), die Kontaktkraft und die Form der Kontaktstücke (Exponent  $m$ ) zu berücksichtigen. Der Kontakt- oder Verbindungswiderstand  $R_V$ , lässt sich über folgende Beziehung ermitteln [2]:

$$R_{V(\Omega)} = \frac{C\rho}{(0,1F(N))^m} \quad (4.50)$$

Die Werte für das Produkt  $C\rho$  (Tabelle 24) und den Exponenten  $m$  (Tabelle 25) sind dem Anhang zu entnehmen. Abbildung 4.15 zeigt den Verlauf des Verbindungswiderstands in Abhängigkeit der Kontaktkraft.

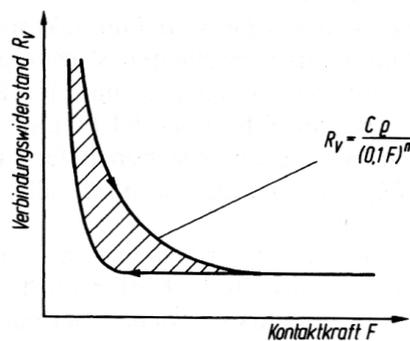


Abbildung 4.15: Verbindungswiderstand bei Be- und Entlastung

Des Weiteren sei zu erwähnen, dass der spezifische Widerstand der Kontaktstücke temperaturabhängig ist und sich gemäß (4.51) berechnen lässt [24].

$$R_E(\vartheta) = R_E(\vartheta_0) \left[ 1 + \frac{2}{3} \alpha_T (\vartheta_K - \vartheta_0) \right] \quad (4.51)$$

$\vartheta_K$  Maximaltemperatur in der Kontaktfläche

Stellt sich kein thermisches Gleichgewicht an der Strommenge ein, d.h. die Stromimpulse kommen in kurzen Abständen, gilt für den temperaturabhängigen Engwiderstand (4.52).

$$R_E(\vartheta) = R_E(\vartheta_0) \left\{ 1 + \frac{1}{5} \ln[1 + \alpha_T (\vartheta_K - \vartheta_0)] \right\} \quad (4.52)$$

Die Beziehungen (4.51) und (4.52) gelten nur für einen Temperaturbereich in dem sich die Härte des Kontaktmaterials nicht verändert.

Die Höhe des Kontaktwiderstands ist des Weiteren von der Geometrie, dem Kontaktmaterial sowie von den mechanischen und elektrodynamischen Kräften abhängig [2, 33, 34].

### ***Einfluss von Fremdschichten auf elektrische Kontakte***

Kontakte in realen Umgebungen sind immer mit einer relativ dünnen Fremdschicht behaftet, welche durch die Fertigung, Lagerung, Montage, äußeren Umwelteinflüsse als auch durch die Betriebsbedingungen entsteht. Angelagerte Stäube, Partikel, anorganisch-chemische Schichten (Oxide, Sulfide, Chloride, usw.), Verkokungsprodukte oder Korrosionsbeläge beeinflussen die Höhe des Fremdschichtwiderstands  $R_F$  und führen somit zu einer Erhöhung des Kontaktwiderstands. Durch diese physikalischen und/oder chemischen Anlagerungen werden die elektrischen Kontakteigenschaften sowie die mechanischen und metallurgischen Eigenschaften der Metalle verändert [24].

Der Fremdschichtwiderstand einer kreisförmigen Berührungsfläche die mit einem dünnen Film ( $\leq 5 \cdot 10^{-9}$  m) überzogen ist, berechnet sich nach HOLM [33] wie folgt.

$$R_F = \frac{\sigma}{\pi a^2} \quad (4.53)$$

$\sigma$  empirische Größe (Hautwiderstand) nach HOLM

Für die Beziehung zwischen Kontaktwiderstand  $R_K$  und der Kontaktkraft  $F_K$  findet sich in einschlägiger Literatur nicht immer eine exakte Formel, jedoch haben einige Autoren Gleichung (4.54) experimentell bestätigen können und verwenden diese am häufigsten.  $K$  und  $m$  sind hier Parameter die von der Form, der Oberflächenbeschaffenheit und dem Materialien der Kontakte abhängig sind. Der Exponent  $m$  kann hier Werte zwischen 0,3 und 3,0 annehmen, jedoch haben Untersuchungen gezeigt, dass ein Exponent zwischen 0,5 und 1,0 am häufigsten auftritt [34].

$$R_K = K \rho F_K^{-m} \quad (4.54)$$

Fremdschichten haben je nach Zusammensetzung, Aufbau und Dicke, Eigenschaften von Halbleitern oder Isolatoren. Wärmedurchschläge und elektrischer Verschleiß, wie Erosion oder Materialwanderung, können zu einer Zerstörung der halbleitenden Schicht führen. Der Fremdschichtwiderstand sollte den Engwiderstand in der Praxis nicht übersteigen. Liegt dieser in der Größenordnung von  $10^{-8} \Omega m^2$ , ist i.d.R. mit keinen Kontaktstörungen zu rechnen. Durch chemische Reaktionen an der Kontaktoberfläche werden durchaus dicke Fremdschichten gebildet, die über längere Zeit hin stetig anwachsen und u.U. eine völlige Isolation bilden [24]. Widerstände die durch dicke Fremdschichten entstehen, liegen im Bereich von einigen  $\Omega$  bis hin zu  $k\Omega$  [34]. Besonders im Bereich der Energietechnik versucht man den Kontaktwiderstand so gering wie möglich zu halten, um starke Erwärmungen zu vermeiden. Dabei spielt die Verwendung von Edelmetallen eine wichtige Rolle. Der große Vorteil ist hier, dass diese Metalle unter Kontakt mit dem Luftsauerstoff keine Oxide bilden und dadurch eine Deckschichtbildung nahezu ausgeschlossen ist [32].

Wenn die geschlossene Deckschicht eines Kontaktes nicht mehr durchtunnelt werden kann, muss diese zerstört werden. Dies kann durch elektrische Zerstörung, dem s.g. Fritten, oder durch eine mechanische Zerstörung (z.B. Kontaktkraft, Reibung) erreicht werden [24]. Noch zu erwähnen sei, dass die Fremdschichtbildung an elektrischen Kontakten durch steigende Temperaturen begünstigt und beschleunigt wird [9]. Aus diesem Grund wird in den meisten Vorschriften eine maximale Kontakttemperatur von 100 °C festgelegt [31].

#### 4.2.4.2 Erwärmung elektrischer Kontakte

Der Kontaktwiderstand ist bestimmend für die entstehende Verlustleistung in der Strommenge. Die Folge ist eine Erwärmung des Kontaktsystems und der angrenzenden Teile. Die Erwärmung, bzw. die sich einstellende Temperatur, hängt von einigen Faktoren, wie der Form der Kontaktstücke, den mit den Kontaktstücken verbundenen Leitermaterial und den Wärmeübertragungseigenschaften, ab. Auf Grund dieser vielen Faktoren kann keine allgemeingültige Beziehung angegeben werden [9].

Wird die Abhängigkeit des Kontaktwiderstands von der Temperatur und der Kontaktkraft berücksichtigt, ergibt sich über die Leistungsbilanz eine lineare inhomogene Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten [34]. Für den stationären Fall berechnet sich die maximale Temperatur in der Strommenge, mit der Fläche  $A_K$ , folglich zu:

$$\vartheta_{E,max} = \frac{U_K^2}{\alpha A_K R_K} \quad (4.55)$$

Für den instationären Fall berechnet sich die Temperatur in der Strommenge zu:

$$\vartheta_E(t) = \vartheta_{E,max}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.56)$$

KOHLRAUSCH hat unter der Voraussetzung, dass die Äquipotentialflächen der Strommenge zugleich Isotherme des Temperaturfeldes sind, die Erwärmung in der Berührungsfläche der Kontakte nach (4.57) berechnet [9].

$$\int_{T_0}^T \varrho \lambda dT = \frac{U_K^2}{8} \xrightarrow{\Delta\vartheta_E = |T - T_0| \leq 150K, \varrho \lambda = const} \Delta\vartheta_E = \frac{U_K^2}{8\varrho\lambda} \quad (4.57)$$

Im Falle von gut leitenden metallischen Kontakten kann mit dem *Wiedemann-Franz-Lorenz-Gesetz* die Temperaturabhängigkeit von  $\varrho$  und  $\lambda$  näherungsweise berücksichtigt werden. Im Bereich zwischen Raum- und Schmelztemperatur gilt folgende Beziehung [9, 35]:

$$\varrho\lambda = LT \quad \text{mit} \quad L = 2,4 \cdot 10^{-8} \left(\frac{V}{K}\right)^2 \quad (4.58)$$

Setzt man nun Gleichung (4.58) in (4.57) ein erhält man folgenden Zusammenhang.

$$L(T^2 - T_0^2) = \frac{U_K^2}{4} \tag{4.59}$$

Das *Wiedemann-Franz-Lorenz-Gesetz* (4.58) ist nicht nur für symmetrische Kontakte anwendbar, sondern gilt auch bei der Betrachtung von Kontakten unterschiedlicher Metalle, ohne die Einflüsse von Interferenzen durch thermoelektrische Kräfte zu berücksichtigen [33]. T ist hier die Temperatur der Kontaktfläche und T<sub>0</sub> ist die Oberflächentemperatur. Die Übertemperatur der Strommenge lässt sich also über den Spannungsabfall der Kontaktpartner U<sub>K</sub> bestimmen.

Über die bekannten Entfestigungs- und Schmelztemperaturen verschiedener Materialien, lässt sich die entsprechenden Kontaktspannung U<sub>K</sub> ermitteln. Tabelle 7 enthält Entfestigungs-, Schmelz- und Siedespannungen gängiger Kontaktwerkstoffe.

**Tabelle 7: Entfestigungs-, Schmelz- und Siedespannungen gängiger Kontaktwerkstoffe [24]**

Kontaktwerkstoff	Kurzzeichen	Entfestigung		Schmelzen		Sieden	
		ϑ <sub>Ent</sub> in °C	U <sub>Ent</sub> in mV	ϑ <sub>S</sub> in °C	U <sub>S</sub> in mV	ϑ <sub>Sd</sub> in °C	U <sub>Sd</sub> in mV
<b>Silber</b>	Ag	180	90	960	370	2193	750
<b>Gold</b>	Au	100	80	1063	430	2817	900
<b>Aluminium</b>	Al	150	100	660	300	2447	-
<b>Kupfer</b>	Cu	190	120	1083	430	2582	800
<b>Nickel</b>	Ni	520	220	1455	650	2837	-
<b>Wolfram</b>	W	1000	600	3380	1100	5527	2100

Die Temperaturverteilung an einer Kontaktstelle (z.B. Kabelschuh, Anschluss- oder Verbindungsstelle) ist von deren Form, den Kühlbedingungen vor Ort und der Zeit abhängig. Sie ist maßgebend für das s.g. Anlaufen (Bildung von Fremdschichten an den Kontakten), die Energieverteilung in der Kontaktfläche sowie für die Wärmeabstrahlung der Kontaktstelle, welche aber bei geringen Temperaturen vernachlässigbar ist [34].

Typische Werte für den Spannungsabfall an Verbindungsstellen im Dauerbetrieb, liegen im Bereich von 10 bis 50 mV. Der Wärmestrom fließt von der Kontaktstelle in die angrenzenden Leiter. Ausgehend von der Wärmequelle nimmt die Temperatur degressiv mit zunehmender Entfernung ab. Typische lokale Erwärmungen liegen im Bereich von 15-25 Kelvin. Abbildung 4.16 zeigt die Temperaturverteilung an einer Verbindungsstelle zweier Schienen [8].

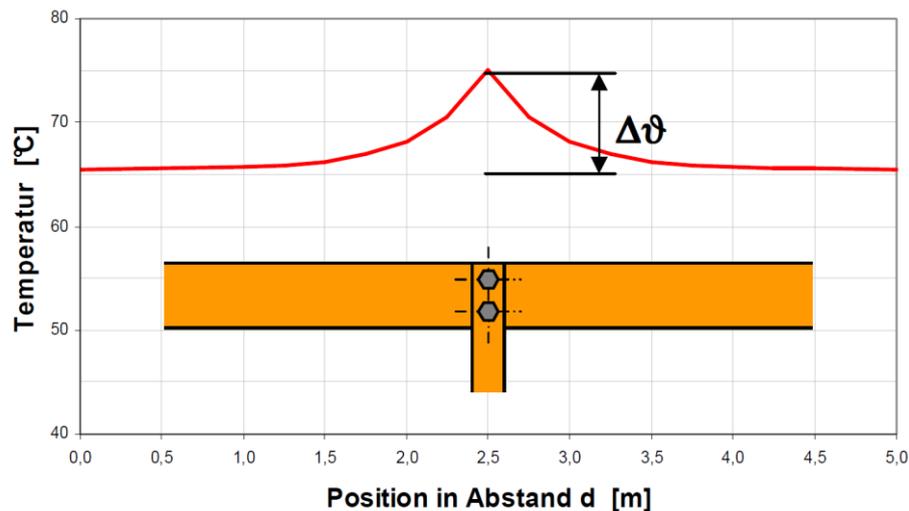


Abbildung 4.16: Temperaturverteilung an einer Verbindungsstelle [8]

Kontaktstellen sind aus elektrotechnischer und thermischer Sicht Schwachstellen in einem Stromleitsystem, da auf Grund von bereits erwähnter Effekte (Feldverzerrung, Stromenge, Kontaktwiderstand, Fremdschichtbildung, u.v.m.) die elektrischen und thermischen Beanspruchungen an diesen Stellen erhöht sind.

#### 4.2.4.3 Schweißverhalten strombelasteter ruhender Kontakte

Im Gebiet der Stromenge, von stationär strombelasteten Kontakten, führt der erhöhte Widerstand zu einer vermehrten Umsetzung von elektrischer Energie in Wärmeenergie. Die wahre Berührungsfläche wird stark erwärmt und es bilden sich Schweißvorgänge aus. Beobachtungen der Gefügeänderungen an Werkstoffen in der Schweißzone haben gezeigt, dass die Stromdichte am Rand der Berührungsfläche am größten ist. An den Kontaktpunkten beginnt der Werkstoff zu schmelzen. Im Bereich zwischen Entfestigungs- und Schmelzspannung treten erste Verschweißungen auf, welche als „Warmweiß“, „Haften“ oder „Kleben“ bezeichnet werden. Der Schweißgrenzstrom liegt in diesem Bereich. Wird die Schmelzspannung überschritten gelangt man in den Bereich des „Schmelzweißens“. Hier bildet sich zwischen den Kontakten eine Brücke aus flüssigem Metall, welche zu tiefgreifenden Oberflächenveränderungen führt. Die Schweißkraft wächst mit der Stromstärke an, der Rand der Schweißfläche hebt ab und die mechanische Schweißfestigkeit erreicht ihr Maximum. Wird die Schmelztemperatur des Werkstoffes erreicht, nimmt die Schweißfläche  $A_{\text{Schweiß}}$  nahezu proportional mit dem Strom zu [24].

$$A_{\text{Schweiß}} = K_1 I^a \quad (4.60)$$

$K_1$  und  $a$  sind Kontaktwerkstoffkonstanten die vom Werkstoff, der Kontaktkraft sowie dem Balligkeitsradius abhängen.

Starke Erwärmungen der Kontakte, die beim Warm- und Schmelzschweißen entstehen, führen zu irreversiblen Gefügeänderungen der Oberflächen und zu neu entstandenen Verbindungszonen. Sehr hohe Stromstärken erzeugen elektrodynamische Abhebekräfte sowie, durch örtliches Sieden bedingte, abstoßende Kräfte die das Zünden von Lichtbögen ermöglichen und zur thermodynamischen Zerstörung einer statischen Verbindung führen können. Hier ist eine Abgrenzung zwischen ruhenden und schaltenden Kontakten zu treffen da sich die Bewertungskriterien für Kontaktwerkstoffe ändern [24].

Bei Temperaturen die über der Betriebstemperatur, aber noch weit unter der Schmelztemperatur liegen, treten s.g. Haftkräfte auf. Diese Kräfte entstehen durch Platzwechselforgänge der Atome im festen Zustand des Materials. In Tabelle 8 sind einige Temperatur- und Spannungswerte angegeben die zu Platzwechselforgängen führen. Die Haftkraft  $F_H$  steigt so lange an bis die Schmelztemperatur erreicht wird. Gleichzeitig vermindert sich die Kontaktkraft  $F_K$  um die immer größer werdende Abhebekraft  $F_a$ . Steigt der Strom weiter an übersteigt  $F_a$  die Kontaktkraft, die Haftkraft fällt auf null oder bleibt konstant und es kommt zum s.g. Spratzen. Bei diesem Vorgang nimmt das flüssige Metall Gase auf und scheidet diese beim Erstarren aus dem noch heißen Kern wieder aus. Dabei können noch teilweise flüssige Metallteile mitgerissen werden. Maßgebend für  $F_H$  ist die Grenzstromstärke, welche der Entfestigungstemperatur bzw. der Entfestigungsspannung entspricht [24, 34].

**Tabelle 8: Temperatur- und Spannungswerte für Platzwechselforgänge im Festkörper [34]**

Temperatur/Spannung	Werte
Temperatur für viskoses Fließen	$\vartheta_V \approx 0,75 \vartheta_S$
praktische Sintertemperatur	$\vartheta_{Sint} \approx 0,66 - 0,75 \vartheta_S$
Rekristallisationstemperatur	$\vartheta_R \approx 0,32 - 0,60 \vartheta_S$
Entfestigungstemperatur	$\vartheta_{Ent} \approx 0,35 \vartheta_S$ $\vartheta_{Ent} \approx 0,85 \vartheta_R$
Entfestigungsspannung	$U_{Ent} \approx 0,35 U_S$

Untersuchungen haben ergeben, dass sich der Kontaktwiderstand nach großen Strombelastungen deutlich ändert und vom eingesetzten Werkstoff abhängig ist. So hält Silber, mit einer Schmelztemperatur von 960°C und einer Schweißgrenzstromstärke von 5,8 kA, starken Strombelastungen sehr gut stand ohne sich dabei zu verschweißen. Kupfer sowie viele Verbundwerkstoffe und Legierungen liegen dabei im mittleren Feld. Wolfram

besitzt zwar eine sehr hohe Schmelztemperatur von 3400°C, liegt jedoch mit einer Schweißgrenzstromstärke von 1,3 kA weit im hinteren Feld. Um jedoch die Schweißneigung eines Werkstoffes zu beurteilen, müssen weitere Einflussgrößen, wie Stromstärke, Schweißkraft, Schmelzstrom, Schweißfestigkeit, Entfestigung- und Schmelzspannung, berücksichtigt und in Experimenten untersucht werden [24].

#### 4.2.4.4 Langzeitverhalten von Kontakten

Der Widerstandswert des Kontaktes erhöht sich im Laufe der Zeit vor allem durch Fremdschichtbildung auf den Kontaktstücken und führt zu einer Übertemperatur. Dadurch wird die thermische Belastung erhöht und die Alterung der Bauelemente beschleunigt. Um das Langzeitverhalten von Kontaktstellen bewerten zu können, ist der Gütefaktor  $k_u$  ein zweckmäßiges Kriterium. Die eindeutige Bestimmung des Kontaktwiderstands ist in der Praxis kaum möglich, da die Eigenschaften der Kontaktstelle (z.B. Kontaktkraft, Zustand der Oberflächen) nicht eindeutig bekannt sind. Des Weiteren unterliegen Kontaktwiderstände von Verbindungen, wie z.B. von verschraubten Stromschienenverbindungen, statistischen Streuungen. Wegen diesen Gründen ist  $R_K$  messtechnisch zu ermitteln. Dieser ist der Widerstand der Verbindung über die Überlappungs- bzw. Verbindungslänge gemessen.  $R_L$  ist der Widerstandswert eines gleich langen massiven Leiterstücks mit den gleichen Abmessungen. Das Verhältnis der beiden Widerstände ergibt den Gütefaktor, siehe (4.61). Eine Verbindung wird mit „sehr gut“ beurteilt, wenn der Wert für  $k_u \leq 1$  vorliegt, das heißt es wird in der Verbindung nicht mehr Verlustleistung erzeugt als in einem gleichlangen Leiter [2].

$$k_u = \frac{R_K}{R_L} \quad (4.61)$$

Werden schon bei der Montage von Verbindungen bestimmte Gütefaktoren eingehalten, können geforderte Lebensdauern garantiert werden. Durch die Bestimmung des Gütefaktors während des Betriebs kann in weiterer Folge die Restlebensdauer bestimmt werden. Um die Lebensdauer sowie die Alterungsgeschwindigkeit von Verbindungen in der Energietechnik abzuschätzen oder zu berechnen, muss man einige Faktoren, wie den Temperaturverlauf, die Stromstärke, die Zeit und messtechnisch und/oder experimentell bestimmte Parameter der verwendeten Materialien und deren Geometrie, berücksichtigen. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sich die Eigenschaften von Verbindungen nicht sprunghaft um große Werte ändern. Um das Ende einer Lebensdauer festzulegen gibt es zwei Möglichkeiten [2, 9]:

1. Gütefaktor  $k_u$  übersteigt einen Grenzwert,
2. Geschwindigkeit  $\dot{k}_u$  ist minimal.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Anfangsgütefaktor  $k_{u0}$  (Wert nach der Montage) den stärksten und die Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$  den geringsten Einfluss auf die Lebensdauer des Betriebsmittels hat.

Studien über das Langzeitverhalten von Kontaktverbindungen in Öl [9] haben gezeigt, dass sich der Kontaktwiderstand  $R_K$  über eine relativ lange Zeit praktisch nicht ändert und ein Ausfall in kurzer Zeit eintritt. Abbildung 4.17 zeigt den Verlauf des Kontaktwiderstands in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Strombelastungen.

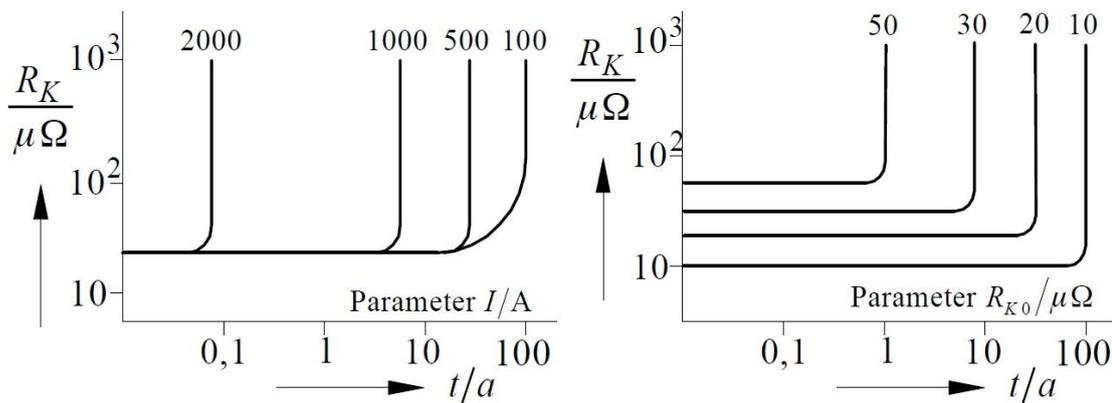


Abbildung 4.17: Langzeitverhalten von Kontaktverbindungen unter Öl [9]

Aus obiger Abbildung ist ersichtlich, dass die Stromhöhe als auch der Anfangswertes des Kontaktwiderstands Einfluss auf die Lebensdauer der Verbindung haben.

Die Leitfähigkeit von elektrischen Kontakten hängt von einigen Faktoren, wie der temperaturabhängigen Widerstands- und Längenänderung, der Veränderung von Materialeigenschaften, der Anlagerung von Fremdschichten als auch vom elektromagnetischen Feld hervorgerufenen Effekten (Skin- und Proximityeffekt), ab. Diese Einflüsse müssen bei der Planung und Konstruktion berücksichtigt werden, da diese einen wesentlichen Einfluss auf das Langzeitverhalten haben.

Werden Kontakte über eine längere Zeit mit erhöhter Temperatur betrieben, kann Sauerstoff aus der Luft in die erwärmten a-spots hinein diffundieren, dort zu Oxidationen von unedlen Bestandteilen des Werkstoffes führen und diese leitenden Verbindungen zerstören [32].

#### 4.2.4.5 Materialien und Anwendungen ruhender elektrischer Kontakte

Statische Dauerverbindungen der Energietechnik werden i.A. nur im Zuge von Reparaturen oder Revisionen geöffnet. Befinden sich Verbindungsstellen im Freien, müssen diese zusätzlich verschiedensten Umwelteinflüssen, großen Temperaturschwankungen und Korrosionseinwirkungen standhalten. Kontakte der Energietechnik lassen sich prinzipiell in drei Belastungsklassen einteilen [23]:

- Light-duty connectors (Schwachstrom-Verbindungen),
- Medium-duty connectors (Verbindungen für mittlere Leistungsklassen),
- Heavy-duty connectors (Starkstrom-Verbindungen).

*Light-duty connectors* führen Ströme bis zu maximal 5 A und 250 V und werden in der Niederspannungsinstallations-, Automobil- sowie der Telekommunikationstechnik eingesetzt. *Medium-duty connectors* müssen höheren elektrischen Belastungen standhalten. Sie tragen Ströme  $> 5$  A und Spannungen bis 1000 V. *Heavy-duty connectors* werden in Bereichen der Energieübertragung und -verteilung, in Schaltgeräten und in Sicherheitssystemen eingesetzt und müssen Strombelastungen von einigen kA und Spannungsbelastungen im Bereich von einigen 100 kV standhalten [23, 24].

Kupfer und Aluminium sind die gängigsten Materialien für Dauerkontakte in der Mittel- und Hochspannungstechnik. Durch spezielle Legierungen können die Kontakteigenschaften der Werkstoffe noch zusätzlich verbessert werden. Nichtlösbare dauerhafte Verbindungen können durch Schweißen, Löten oder Pressen geschaffen werden. Dabei ist die jeweilige Technik an die zu verbindenden Werkstoffe und an deren Anwendung anzupassen. Pressverbindungen haben sich speziell bei Kabel- und Seilanschlüssen durchgesetzt und können verschiedenste Formen annehmen. Lötverbindungen werden in der Hochstromtechnik mit einigen Ausnahmen nur sehr selten eingesetzt. Hingegen bieten Schmelzschweißverbindungen einige Vorteile, wie z.B. die Schaffung von homogenen Verbindungen, gleiche Leitfähigkeit der Naht und des Leitermaterials (keine zusätzliche Verlustleistung), sehr gute thermomechanische Eigenschaften sowie Wartungsfreiheit und Langzeitstabilität. Dem gegenüber stehen ein vergleichsweise hoher Geräte- und Arbeitsaufwand [24].

Um lösbare Verbindungen herzustellen, die nur selten getrennt werden müssen, wie z.B. für Wartungsarbeiten, verwendet man üblicherweise Schrauben. Dabei ist aber zu beachten, dass hiermit große Druckkräfte erreicht werden können, jedoch keine Druckreserve, auf Grund des sehr geringen Federwegs, zur Verfügung steht. Da die Ausdehnungskoeffizienten des Leiter- und des Kontaktmaterials oft unterschiedlich sind, kommt es bei Erwärmungsvorgängen zu einer Änderung der Kontaktkraft. Bei einer unzulässigen

Überschreitung der Kontaktkraft wird eine Überprüfung oder, wenn notwendig, eine Erneuerung der Verbindungsstelle empfohlen. Je nach Anwendung und Einsatzdauer werden auch Klemm-, Spann- oder Auflagekontakte eingesetzt.

Unabhängig davon welche Verbindungsart gewählt wird, ist eine anwendungsspezifische chemische und/oder mechanische Vorbehandlung der Verbindungsteile erforderlich [4, 24].

Steckverbindungen oder Steckkontakte werden in der Energietechnik dort eingesetzt, wo eine rein galvanische Trennung oder eine Trennung von Bauteilen bzw. Anlagenteilen, für Bau- oder Reparaturzwecke erforderlich ist. Mehrfachkontakte, wie z.B. Tulpenkontakte, werden bei Anwendungen mit hohen Strömen verwendet, weil hier eine erhöhte Gefahr des elektrodynamischen Abhebens und mögliches Verschweißen der Kontaktstücke besteht. Das Hauptkriterium bei Steck- als auch bei Dauerverbindungen ist eine zuverlässige Kontaktgabe über die gesamte Lebensdauer. Dabei soll der geringe Kontaktwiderstand konstant bleiben [24].

### 4.3 Thermische Beanspruchungsgrenze bei Kurzzeitbeanspruchung

Die größten thermischen Beanspruchungen in der Energietechnik entstehen durch die Wirkung von Kurzschlüssen. Dabei kommt es zu raschen, starken Erwärmungen an elektrischen Betriebsmitteln, welche Menschen und Anlagenteile gefährden können. Die bisher betrachteten Ströme lagen in Größenordnungen, die während des Dauerbetriebs auftreten können. Im Falle von Erd- und Kurzschlüssen, bei Schalthandlungen oder bei atmosphärischen Entladungen, übersteigen die zu führenden Ströme, die Höhe der Betriebsströme um ein Vielfaches.

#### 4.3.1 Kurzschluss Erwärmung von Stromleitern

Im vorliegenden Abschnitt, wird auf die Berechnung der Wärmebeanspruchung sowie auf die Festlegung des zulässigen Kurzzeitstroms näher eingegangen.

Da Kurzschlüsse i.d.R. nur für kurze Zeit an elektrischen Betriebsmitteln anliegen und die Wärmeabgabe während der Kurzschlussdauer sehr gering ist, kann der Erwärmungsvorgang als adiabatisch angesehen werden. Das bedeutet, dass eine Wärmeabgabe an die Umgebung nicht erfolgt. In den Berechnungen der Norm EN 60865-1 [72], welche in den folgenden Ausführungen als Grundlage dienen, werden weitere Voraussetzungen angenommen. So kann der Skin- und der Proximityeffekt bis zu einem Leiterquerschnitt von  $600 \text{ mm}^2$  vernachlässigt werden, die spezifische Wärme des Leiters als konstant und das Widerstands-Temperatur-Verhalten als linear angenommen werden.

Die Größe und der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstroms sind u.a. vom Ort, von der Art und von dem Aufbau des Netzes abhängig. Um Betriebsmittel für den Kurzschlussfall ausreichend thermisch bemessen zu können, wurde der Begriff *thermisch gleichwertiger Kurzzeitstrom*  $I_{th}$  eingeführt [36].

*„Der thermisch gleichwertige Kurzzeitstrom ist aus dem Effektivwert des Kurzschlusswechselstroms und den Faktoren  $m$  und  $n$  der zeitabhängigen Wärmewirkung von Gleich- und Wechselstromkomponente des Kurzschlussstroms zu berechnen.“* [72].

$I_{th}$  ist also der Effektivwert des Betriebsstroms, welcher in der Kurzschlussdauer  $T_k$  dieselbe thermische Wirkung (Wärme) erzeugt, wie der in Gleich- und Wechselstromanteil aufgeteilte tatsächliche Kurzschlussstrom [36]. Zur Berechnung von  $I_{th}$  in Drehstromanlagen ist der ungünstigste Fall, der dreipolige Kurzschluss, maßgebend [72].

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (4.62)$$

Die Faktoren  $m$  und  $n$  geben die zeitabhängige Wärmeentwicklung von Gleich- bzw. Wechselstromkomponente des Kurzschlussstroms an, siehe Abbildung 12.1 und Abbildung 12.2 im Anhang. Wenn mehrere Kurzschlüsse in kurzen Abständen aufeinander auftreten, errechnet sich der thermisch gleichwertige Kurzzeitstrom zu:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 T_{ki}} \quad (4.63)$$

mit

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (4.64)$$

„Der Temperaturanstieg in einem Leiter, hervorgerufen durch den Kurzschluss, ist eine Funktion der Dauer des Kurzschlussstroms, des thermisch gleichwertigen Kurzzeitstroms und des Leitermaterials.“ [72].

Die, während der Kurzschlussdauer, entstehende Wärmemenge  $\Delta Q$  berechnet sich über das Joule-Integral nach folgender Beziehung [37]:

$$\Delta Q = R_B I_{th}^2 T_k = R_B \int_0^{T_k} i_k^2(t) dt \quad (4.65)$$

$R_B$  Widerstand der Strombahn bzw. des Betriebsmittels

Die erzeugte Wärmemenge, darf die zulässigen Werte der jeweiligen Betriebsmittel, innerhalb der Kurzschlussdauer nicht übersteigen.

$$\Delta Q \leq \Delta Q_{zul} \quad (4.66)$$

Wird die Beziehung (4.66) verletzt, liegt keine Kurzschlussfestigkeit mehr vor und es können Schäden an Anlagen und Betriebsmitteln entstehen.

Die Temperatur, welche während der Kurzschlussstrombelastung entsteht, errechnet sich über folgende Beziehung [2]:

$$\vartheta_k = \frac{1}{\alpha_T} \left\{ [1 + \alpha_T (\vartheta_b - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \cdot \exp\left(\frac{k I^2 Q_{20} \alpha_T}{c \rho A^2} T_k\right) - 1 \right\} + \vartheta_b \quad (4.67)$$

$\vartheta_b$  Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlussbeginn

Wie bei der thermischen Dauerstrombeanspruchung, sind auch bei der Kurzschlussstrombeanspruchung thermische Grenzwerte einzuhalten. Der zulässige Strom bei Kurzzeitbelastung  $I_{k,zul}$ , unter Einhaltung der zulässigen Grenztemperatur  $\vartheta_{k,zul}$  errechnet sich zu [2]:

$$I_{k,zul} = \sqrt{\frac{c \rho A^2}{k \varrho_{20} \alpha_T T_k} \ln \frac{1 + \alpha_T (\vartheta_{k,zul} - 20 \text{ }^\circ\text{C})}{1 + \alpha_T (\vartheta_b - 20 \text{ }^\circ\text{C})}} \quad (4.68)$$

In Vorschriften wird die zulässige Kurzschlussstemperatur für Leiterwerkstoffe so festgelegt, dass wichtige Materialeigenschaften, wie z.B. die mechanische Festigkeit, durch die Kurzschlussenergie nicht beeinträchtigt werden. Die empfohlene maximale Leitertemperatur liegt bei Al/St-Verbundseilen bei 160 °C, bei blanken massiven oder verseilten Leitern aus Cu, Al oder AlMgSi bei 200 °C und bei Leitern aus Stahl um die 300 °C. Die zulässige Endtemperatur bei Kabel ist vom eingesetzten Isolationsmaterial abhängig und liegen im Bereich von 140-250 °C. Hier gilt die Obergrenze für VPE-Kabel [9, 36, 37].

### 4.3.2 Ermittlung der thermischen Kurzschlussfestigkeit

Für elektrische Betriebsmittel gilt hinsichtlich der thermischen Kurzschlussfestigkeit:

*„Elektrische Betriebsmittel haben eine ausreichenden thermische Kurzschlussfestigkeit, solange eine der folgenden Bedingungen für den thermisch gleichwertigen Kurzzeitstrom  $I_{th}$  erfüllt ist.“ [72]*

$$I_{th} \leq I_{thr} \text{ für } T_k \leq T_{kr} \quad (4.69)$$

oder

$$I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \text{ für } T_k \geq T_{kr} \quad (4.70)$$

$I_{thr}$  Bemessungs-Kurzzeitstrom

$T_{kr}$  Bemessungs-Kurzzeit

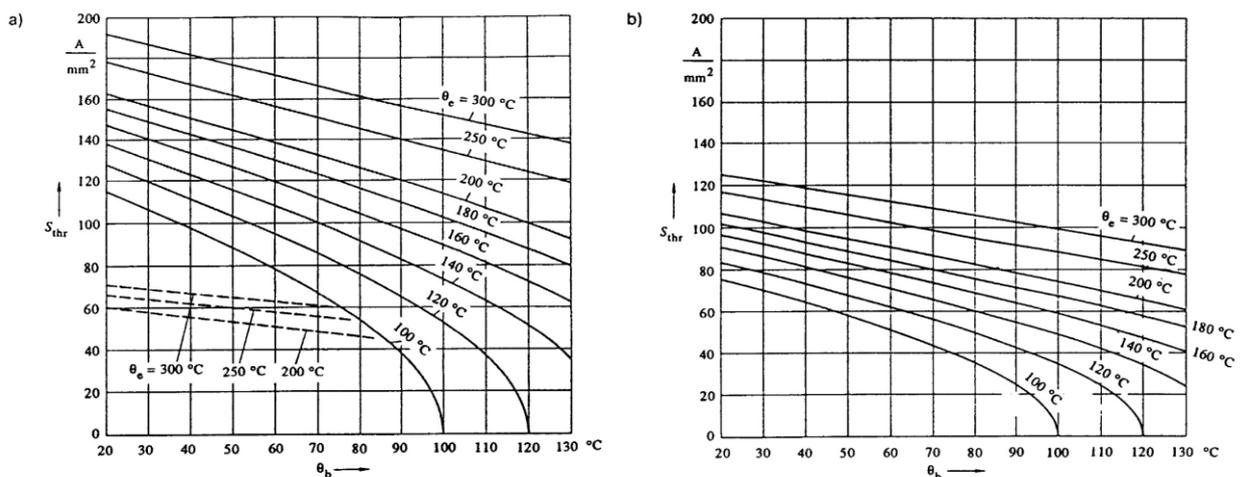
Bei der Dimensionierung von Kabeln, Leiterseilen und Leiterschienen ist es zweckmäßig, den Kurzzeitstrom auf den Leiterquerschnitt zu beziehen, d.h. hier ist die Kurzzeitstromdichte  $S_{th}$  ausschlaggebend.

Für blanke Leiter gilt nach [72]:

„Blanke Stromleiter haben eine ausreichende thermische Kurzschlussfestigkeit, solange die folgende Bedingung für die thermisch gleichwertige Kurzzeitstromdichte  $S_{th}$  erfüllt ist:“

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (4.71)$$

Die Bemessungs-Kurzzeitstromdichte  $S_{thr}$  in Abhängigkeit der Leitertemperatur für  $T_{kr} = 1$  s, ist in Abbildung 4.18 angegeben.



**Abbildung 4.18: Abhängigkeit der Bemessungs-Kurzzeitstromdichte  $S_{thr}$  ( $T_{kr} = 1$  s) von der Leitertemperatur [72]**

- a) ausgezogene Kurven: Kupfer, gestrichelte Kurven: unlegierter Stahl und Stahlseile;
- b) Aluminium, Aluminiumlegierung (AlMgSi), bei Seilen mit und ohne Stahlanteil.

Man erkennt, dass mit steigender Temperatur  $\theta_b$  ( $\theta_b$ ), die Bemessungs-Kurzzeitstromdichte  $S_{thr}$  deutlich abnimmt. Die Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlussenden wird hier als  $\theta_e$  bezeichnet. Eine höhere Auslastung im Normalbetrieb verringert somit die thermische Kurzschlussstromfestigkeit elektrischer Betriebsmittel. Typische Werte für die Bemessungs-Kurzzeitstromdichte, liegen für Kupfer bei 100-200 A/mm<sup>2</sup> sowie für Aluminium und AlMgSi bei 70-140 A/mm<sup>2</sup>.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die thermische Beanspruchung eines Betriebsmittels im Kurzschlussfall durch die Höhe des Kurzschlussstroms und die Kurzschlussdauer bestimmt wird. Um Netzelemente wirtschaftlich auszulegen, ist deshalb ein schnell reagierender Netzschutz unumgänglich. Kann die Höhe des Kurzschlussstroms verringert werden, besteht u.U. die Möglichkeit Betriebsmittel schwächer zu bemessen und dadurch Kosten zu sparen [37].

### 4.3.3 Thermische Kurzzeitbeanspruchung von Leiterwerkstoffen

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2.4 erwähnt wurde, nimmt die mechanische Festigkeit von Leitermaterialien mit steigender Temperatur ab. Auf Grund der kombinierten Belastung durch hohe Temperatur und der damit verbundenen Festigkeitsminderung sowie der enormen Kurzschlusskraft, wird der Leiterwerkstoff im Fehlerfall enorm beansprucht. Dabei können irreversible Materialverschlechterungen und Schäden entstehen.

Des Weiteren werden durch die hohen Temperaturen thermomechanische Spannungen im Werkstoff hervorgerufen (siehe Abschnitt 4.2.2.3).

Beim Auftreten eines Lichtbogenkurzschlusses werden, durch die hohe thermische Einwirkung, staubförmige metallische Bestandteile des Leitermaterials freigesetzt. Diese Stäube lagern sich an die Umgebung an und beeinflussen die Leitfähigkeit der Oberfläche. Im Gegensatz zu Kupferleitern, bilden sich bei Leitern aus Aluminium überwiegend staubförmige, nichtleitende Rückstände aus Aluminiumoxid. Benachbarte Isolatoren und Anlagenteile werden dadurch nicht metallisiert. Eine Ausweitung des Schadens wird dadurch vermieden und ein Wiedereinschalten der Leitung kann schneller erfolgen [4, 19].

### 4.3.4 Thermische Kurzzeitbeanspruchung von Isolierwerkstoffen

Auch in festen Isolierstoffen werden durch die starke Erwärmung thermomechanische Spannungen erzeugt (siehe Abschnitt 4.2.2.3). Besonders anfällig dafür sind Stoffe mit hohem Elektrizitätsmodul, wie Glimmer, Quarzglas oder Porzellan.

Die thermische Wirkung hoher Kurzzeitströme, kann auch ein Aufschmelzen und ein Zerstören der Leiterisolierung bewirken. Im Bereich der Kabeltechnik ist das ein häufiges Problem. An Schwachstellen in der Leiterisolierung oder an Stellen an denen diese durch Biegung oder Quetschung (z.B. Befestigungsschellen) verformt wird, entstehen inhomogenen Bereiche. Dadurch kommt es zu lokalen Felderhöhungen und einer Herabsetzung der Spannungsfestigkeit. Dies ist oft der Fall, wenn Kabel zu eng an einander gepresst werden, maximale Biegeradien überschritten werden, oder die Isolierung durch äußere mechanische Einwirkungen beschädigt wurde. Kommt es dann zu einem Kurzschluss, kann an diesen Stellen die Isolierung teilweise bis ganz zerstört werden. Das Isoliervermögen wird dadurch stark beeinträchtigt und das Auftreten von Fehlerlichtbögen und Kurzschlüssen begünstigt. Aber auch die Kurzschlusskräfte können die Isolierung mechanisch beeinflussen. Dadurch, dass Kabel und Leitungen vermehrt an deren thermische Grenzen betrieben werden, bleibt für den Fehlerfall nur mehr eine sehr geringe

Reserve um die zulässige Temperatur einzuhalten und mögliche Schäden und Ausfälle zu vermeiden.

#### 4.3.5 Thermische Kurzzeitbeanspruchung von Kontakten

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den kurzzeitigen thermischen Beanspruchungen an elektrischen Kontakten. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die schaltenden Kontakte gelegt, weil an diesen eine Vielzahl von unterschiedlichen thermischen Beanspruchungen auftreten. Diese Einwirkungen führen zu Veränderungen an der Kontaktfläche und deren Kontakteigenschaften. Dadurch werden die Zuverlässigkeit der Kontaktgabe sowie die Lebensdauer beeinflusst.

Schaltgeräte sind Kernelemente in der Energietechnik. Einerseits haben sie die Aufgabe, durch kontrollierte Schalthandlungen, den Strom in elektrischen Netzen zu steuern und zu verteilen, andererseits müssen diese Geräte wichtige Schutzaufgaben erfüllen, um den Menschen sowie elektrische Anlagen und Betriebsmittel vor gefährlichen Strömen zu schützen. Je nach Schaltanforderung lassen sich Schaltgeräte in drei Gruppen einteilen [35]:

- Schalten von Fehlerströmen,
- Schalten von Nenn- bzw. Lastströmen,
- Schalten von induktiven und kapazitiven Strömen.

Außerdem ist zwischen dem Schalten von Gleich- und Wechselstrom zu unterscheiden, da hier unterschiedliche Schaltprinzipien und Anforderungen an die Geräte gestellt werden. Bei Wechselstromkreisen ist der natürliche Stromnulldurchgang für Unterbrechungen sehr gut geeignet, hingegen muss bei Gleichstromanwendungen ein solcher Nulldurchgang erzwungen werden. Prinzipiell ist eine Stromunterbrechung nur im natürlichen Nullpunkt und in einem erzwungenen Nullpunkt möglich. Letzteres erreicht man, wenn eine überlagerte Stromschwingung oder eine Gegenspannung erzeugt wird oder wenn die Bogenspannung über der treibenden Spannung liegt. Da ein synchrones Ausschalten (Schalten im Nulldurchgang) technisch sehr aufwendig ist, wird die Bogenspannung durch Verlängerung der Strecke oder durch starke Kühlung beträchtlich gesteigert. Öffnen die Kontakte zu einem beliebigen Zeitpunkt, unabhängig vom Momentanwert des Stroms, zündet der Lichtbogen. Damit dieser möglichst im nächsten Stromnulldurchgang wieder erlischt, muss die Kontakttrennung und die Strömungsführung (Kühlung) des umgebenen Mediums dementsprechend angepasst werden. Denn durch ein vorzeitiges Abreisen des Stroms entsteht eine unerwünschte und schädliche Überspannung gemäß:

$$u \sim L \frac{di}{dt} \tag{4.72}$$

Diese Spannungen gefährden die Isolation sowie deren Funktion und beeinflussen den Schaltvorgang selber [38]. Liegt eine größere Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung vor (ungünstigster Fall ist  $90^\circ$  Phasenverschiebung), ist die Spannung zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs am größten. Schaltet dann einer der Pole etwas früher als der andere, kann nach einer Halbperiode sogar die doppelte Betriebsspannung an den Kontaktstücken anstehen. Wenn deren Abstand dann noch nicht groß genug ist, kommt es zu einem erneuten Spannungsüberschlag der den Ausschaltvorgang stört. Dieser Überschlag wird als Rückzünden bezeichnet. Zusätzlich tritt nach dem endgültigen Abschalten des Fehlers eine wiederkehrende Spannung auf, dessen Steilheit von der Eigenfrequenz des Netzes abhängt. Auch dieser Effekt beeinträchtigt die Wiederfestigung der Schaltstrecke und führt zu einer zusätzlichen Beanspruchung des Schalters [5]. Die Hauptprobleme an Schaltern, die beim Auftreten einer Bogenentladung entstehen, sind die Löschung des Lichtbogens, die Entionisierung der Gasstrecke und die Isolierung gegenüber der schnell wiederkehrenden Spannung. Der gesamte Löschvorgang wird durch die Schalterkonstruktion, das Löschgas, den Lichtbogenverlauf und den vorherrschenden Netzbedingungen beeinflusst. Um einen brennenden Lichtbogen zu löschen, müssen die Existenzbedingungen (Mindeststrom oder Mindestspannung) gestört werden, damit kein stabiler Arbeitspunkt mehr möglich ist (d.h. zugeführt Leistung  $\neq$  abgeführter Leistung). Dies kann durch eine forcierte Kühlung, die Verlängerung der Bogenlänge, Erhöhung des Drucks oder durch die Aufteilung in Teillichtbögen erreicht werden. Ist der Stromfluss unterbrochen, rekombinieren die Ladungsträger automatisch, da das ionisierte Gas abkühlt. Durch eine zusätzliche Kühlung des Gases, kann die Spannungsfestigkeit der Trennstrecke schneller erreicht werden und somit ausreichende Isolierfestigkeit gegen wiederkehrende Spannungen bieten [13, 35].

#### **4.3.5.1 Beanspruchung durch den Lichtbogen**

Lichtbögen die bei Schalthandlungen entstehen werden als Schaltlichtbögen bezeichnet. Sie entstehen, mit wenigen Ausnahmen (Halbleiterschalter, Supraleitungsschalter), in allen Schaltern, wenn es zur Kontakttrennung kommt [35]. Ist die Spannung ( $U > 12 \text{ V}$ ) und die Stromstärke ( $I > 1 \text{ A}$ ) ausreichend, entsteht zwischen den Kontakten, bei jedem Schaltvorgang, ein Lichtbogen, der die Lebensdauer beeinflusst [24]. Störlichtbögen sind unerwünschte Lichtbögen, die durch Fehler und Störungen im Netz hervorgerufen werden. Sie sind sicherlich das am meisten gefürchtete Ereignis an elektrischen Betriebsmitteln, weil diese nicht nur schwere Schäden an betroffenen Anlagen verursachen, sondern auch Personen die sich in unmittelbarer Nähe befinden gefährden.

Die Eigenschaften des Lichtbogens werden stark von den Umgebungsbedingungen (z.B. Druck und Kühlung) beeinflusst. Maßgebend für die Auswirkung eines Lichtbogens ist die Lichtbogenarbeit, die das Produkt aus Lichtbogenstrom, -spannung und der Zeit ist. Durch die Energie die dabei frei gesetzt wird, entstehen hoher Druck und starke örtliche Erwärmungen.

Beobachtet man die Öffnung von zwei Kontakten im Mikrosekundenbereich, erkennt man, dass sich nicht alle a-spots gleichzeitig trennen. Der gesamte Strom, der über alle Mikrokontakte geflossen ist, muss dann nur noch über wenige bzw. einen letzten a-spot fließen. Dies führt dazu, dass sich diese Bereiche erheblich aufheizen. Dabei zersetzen sich die Kontaktwerkstoffe und geben gas- und dampfförmige Spaltprodukte an die Umgebung ab. In weiterer Folge kommt es zu einem elektrischen Durchschlag, der den Metaldampf ionisiert und ein leitfähiges, stromdurchflossenes Plasma erzeugt (Lichtbogen). Die Temperatur im Zentrum des Lichtbogens liegt im Bereich von 10.000 bis 20.000 Kelvin (9.726 bis 19.726 °C). An den Fußpunkten stellt sich diese i.d.R. auf die Siedetemperatur des Kontaktwerkstoffes ein. Die Stromdichten an der Kathode eines Lichtbogens können zwischen  $10^2$  und  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> betragen. Die Feldstärke im mittleren Teil, der Bogensäule, ist gering. Sie nimmt an den Übergangszonen zwischen Bogensäule und Kathode bzw. Anode erheblich höhere Werte an. Der Lichtbogen ist, wie jeder stromdurchflossene Leiter, von einem schlauchförmigen Magnetfeld umgeben. Kräfte von äußeren Magnetfeldern sowie Beblasungen durch Gasströme führen zu einer Bewegung des Lichtbogens. Diese Bewegung bewirkt im ersten Moment eine Ausbauchung der Bogensäule. Dem folgt, durch die Bewegung oder Neubildung von Lichtbogenfußpunkten, die s.g. Lichtbogenwanderung. Dieser Vorgang wird in vielen Schaltgeräten genutzt, um den Lichtbogen von den Kontaktflächen in Richtung spezieller Löschkammern zu bewegen [32].

Physikalische Grundlagen des Lichtbogens werden in dieser Arbeit nicht näher ausgeführt. Zum vertiefenden Studium auf diesem Gebiet sei u.a. auf [39] verwiesen.

Neben Schaltern werden auch Kabelendverschlüsse, Schraubverbindungen von Leitern, Messeinrichtungen sowie Feststoffisolierungen durch Lichtbögen stark gefährdet [36].

Folgende Beanspruchungen sind auf verschiedene thermoelektrische Effekte zurückzuführen, welche wiederum deutlich von den Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe abhängen. Die Wahl des Kontaktmaterials oder der Kombination aus verschiedenen Materialien richtet sich nach den Anforderungen an den Kontakt.

#### 4.3.5.2 Lichtbogenabbrand

Als Lichtbogenabbrand wird der Materialverlust der Kontaktstücke bezeichnet, der durch die Lichtbogeneinwirkung entsteht. Der Niederschlag lagert sich zum Großteil an die umliegenden Bereiche an. Dieser Effekt erlangt vor allem bei Geräten, die viele Schaltspiele durchführen müssen, und bei teuren Kontaktwerkstoffen, wie z.B. Silber, eine große Bedeutung. Neben den elektrischen Beanspruchungen, haben die Schaltgerätekonstruktion (Form der Schaltstücke, Prellverhalten, Stromunterbrechung, Kontaktkraft, u.v.m.), das Schaltmedium (Öl, Luft, Vakuum, SF<sub>6</sub>, u.v.m.) und das Kontaktmaterial (thermische, elektrische sowie mechanische Eigenschaften) deutlichen Einfluss auf das Abbrandverhalten. Die Abbrandmechanismen, welche durch die Wirkung eines Lichtbogens entstehen, sind Verspritzen, Verdampfen und Versprätzen von Kontaktmaterial, durch elektrodynamische Kräfte bedingtes Wegschleudern von Schmelztröpfchen sowie Plasmastrahlen, die bei stromstarken Lichtbögen entstehen und den Gegenkontakt stark beschädigen können [24].

Eine Ermittlung der Menge an Materialverlust, die beim Abbrand entsteht, ist auf Grund der zahlreichen Einflüsse und deren Wechselwirkungen rechnerisch kaum möglich, weshalb diese vorwiegend in experimentellen Untersuchungen bestimmt wird [24]. Tatsache ist, dass an heterogenen Verbundwerkstoffen, die aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialien mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften bestehen, i.A. weniger Abbrand entsteht als bei homogenen Kontaktmaterialien. Grund dafür sind die unterschiedlichen Siedetemperaturen der eingesetzten Materialien. Werden z.B. Kombinationen aus Wolfram-Kupfer oder Wolfram-Silber eingesetzt, verdampft zuerst die niedrigsiedende Komponente, während der hochtemperaturbeständige Wolfram noch fest ist. Dadurch wird ein schneller Materialabbau verhindert und die mechanische Festigkeit aufrecht erhalten. Der Materialverlust  $\Delta V$  lässt sich allgemein gültig über das Strom-Zeit-Integral bestimmen, wie in (4.73) ersichtlich ist.  $C$  als auch  $n$  sind dabei Materialkonstanten [35].

$$\Delta V = C \left( \int i dt \right)^n \quad (4.73)$$

Durch die hohen Lichtbogenbeanspruchungen von Schaltern in der Mittel- und Hochspannungstechnik, werden die Kontaktstellen in Abbrenn- und Hauptkontaktstücke aufgeteilt. Dabei übernehmen abbrandfeste Abbrennkontakte die Schaltaufgabe und die Hauptkontakte, welche aus sehr gut leitfähigen Werkstoffen aufgebaut sind, führen den Dauerstrom im geschlossenen Zustand.

Ein Problem, welches beim Einsatz von Verbundwerkstoffen an den Kontaktoberflächen entsteht, ist die thermisch bedingte Rissbildung. Gründe dafür sind einerseits die

ungleichmäßige Erwärmung der Oberfläche und die dabei entstehenden thermomechanischen Spannungen (siehe 4.2.2.3), andererseits das Verarmen eines Werkstoffes (z.B. Kupfer), wodurch ein anderer Werkstoff (z.B. Wolfram) zu schrumpfen beginnt [24].

#### 4.3.5.3 Verschweißen von einschaltenden Kontaktstücken

Schließt ein Kontakt einen Stromkreis, so ist dieser Vorgang i.d.R. nicht nach dem ersten Berühren der Kontaktstücke beendet. Beim Auftreffen des beweglichen Kontaktes auf den feststehenden Teil, wird die dabei entstehende kinetische Energie z.T. in Wärme umgesetzt, als auch bei der entstehenden plastischen und elastischen Verformung verbraucht. Wenn die Energie, welche bei der Rückbildung der elastischen Verformung entsteht, groß genug ist, hebt der Kontakt ab. Der bewegte Kontakt wird wieder in Richtung des Gegenkontaktes beschleunigt, sobald seine kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt ist. Dieser Vorgang wird als Kontaktprellen bezeichnet. Er wiederholt sich so lange, bis die gesamte Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt ist. Die Anzahl der Prellungen, die Höhe der Abhebung und die Prelldauer (Zeit zwischen dem ersten und dem letzten Schließen des Kontaktes) sind vom Schaltgerätetyp und dessen Schalteigenschaften abhängig. Die Abhebungen liegen typischerweise im Bereich von einigen Zehntel Millimetern, bei einer Prelldauer von 0,1 bis 15 ms. Durch das Prellen wird die Anzahl der Schalterbeanspruchungen stark erhöht, was zu einem rascheren Altern des Kontaktes führt. Der Prellverlauf wird stark durch die Strombelastung und den Werkstoff beeinflusst. Er lässt sich in zwei Vorgänge unterteilen [24]:

- Prellen mit Brückenbildung (flüssige Metallbrücke im Kontaktspace),
- Prellen mit Lichtbogenbildung.

Bei Prellvorgängen mit Lichtbogenbildung wird die erzeugte Wärmeenergie, auf Grund der kurzen Bogenlänge, größtenteils an die Kontaktstücke übertragen und bildet dort Schmelzzonen. Aus Untersuchungen von ERK und FINKE [40] ging hervor, dass die Spannungshöhe der Prelllichtbögen maßgebend für das Schweißverhalten verantwortlich ist. Je niedriger die Spannungshöhe, desto weniger Lichtbogenarbeit wird verrichtet, was wiederum zu einer geringeren thermischen Beanspruchung der Kontakte führt.

In Abhängigkeit der Lichtbogenenergie, kann die Temperatur im Fußpunkt des Lichtbogens die Entfestigungs- und die Siedetemperatur des Werkstoffes übersteigen. Nach dem Schließen des Kontaktes berühren sich die flüssigen Schmelzbereiche beider Kontaktstücke und erstarren. Dieser Vorgang wird als Kontaktverschweißen oder Kontaktverkleben

bezeichnet [24]. Dadurch kann es zu schweren Problemen bei der Kontakttrennung und bei neuerlichen Schalthandlungen kommen.

Liegt beim Einschalten schon eine ausreichend hohe Spannung an, kommt es bei Annäherung der Kontaktstücke zu einem Überschlag, dem s.g. Vorzündelichtbogen. Dieser bewirkt, wie auch der Prelllichtbogen, ein Aufschmelzen und Verschweißen der Kontakte. In der Mittel- und Hochspannungstechnik spielt dieser eine wichtige Rolle [32].

#### **4.3.5.4 Verschweißen von geschlossenen Kontaktstücken**

##### ***Verschweißen durch elektrodynamische Abhebung***

Durch die Art der Stromführung und die damit verbundenen magnetischen Verhältnisse im Schaltgerät sowie durch die Holmschen Engekräfte (siehe Abschnitt 5.5) in den Bereichen der Stromengen (a-spots), wirkt auf das bewegliche Kontaktstück eine Kraft, welche der Kontaktkraft entgegenwirkt. Ist der Strom ausreichend groß (mittlere Kurzschlussströme im kA-Bereich), werden die geschlossenen Kontakte, durch die Wirkung der Magnetfelder, auseinander gedrückt. Dabei entsteht ein Lichtbogen der, ähnlich wie beim Prellvorgang, die Kontaktoberflächen aufschmilzt. Schließen die Kontakte erneut, können Verschweißungen auftreten [32].

##### ***Statisches Verschweißen***

Bleiben die Kontakte im Kurzschlussfall geschlossen, d.h. es kommt zu keiner elektrodynamischen Abhebung, kann die Erwärmung der a-spots die Schmelztemperatur des Kontaktwerkstoffs übersteigen und so zu Verschweißungen führen [32]. An dieser Stelle sei auf Abschnitt 4.2.4.3 verwiesen.

#### 4.3.5.5 Veränderung des Kontaktwiderstands

Wie schon in Abschnitt 4.2.4.4 besprochen wurde, verändert sich der Kontaktwiderstand im Laufe der Zeit. Der Zustand der Kontaktflächen ist hier von großer Bedeutung, da er Einfluss auf den Widerstand hat. Viele Kontakte haben eine s.g. selbstheilende Wirkung, weil angelagerte Fremdschichten mechanisch, durch hohe Kontaktkräfte, zerstört oder durch den Lichtbogen weggebrannt werden können. Der Aufbau und die Zusammensetzung des Werkstoffs spielt auch eine wesentliche Rolle. So oxidieren unedle Metalle unter der hohen thermischen Einwirkung und bilden störende Fremdschichten aus. Des Weiteren können sich auch anorganische und organische Zerfalls- oder Polymerisationsprodukte an die Kontaktflächen und an die Umgebung anlagern. Aber auch atmosphärische Einflüsse, wie z.B. Inhibitoren, Feuchte oder Temperatur, führen zu chemischen, elektro- oder plasmachemischen Reaktionen, welche die Art, die Dicke und das Wachstum von Fremdschichten bestimmen. Auf Kupfer und Silber entstehen v.a. Sulfide, Wolframate auf Wolfram, organische Ablagerungen auf Metallen der Platingruppe und Oxide auf nahezu allen Metallen. Die Veränderung der Oberfläche (matt, verzundert, verfärbt) hängt vom Transport der Reaktionspartner in der Fremdschicht, dem s.g. Zeitgesetz des Schichtwachstums, und der Materialstruktur ab. Eine spezielle Form der Korrosion ist die Whiskerbildung, die bei Temperaturen bis 800 °C auf bestimmten Metallen auftritt. Dabei handelt es sich um einige  $\mu\text{m}$  lange, senkrecht nach oben gerichtete Nadeln, bei denen die Dicke mit steigender Temperatur zunimmt (ca. 1  $\mu\text{m}$ ) [24, 34]

Alle hier erwähnten Einflüsse, wirken sich auf die Höhe des Fremdschichtwiderstands und damit auch auf den Kontaktwiderstand aus. Jedoch beeinflussen die enormen thermischen Beanspruchungen nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch die mechanischen Eigenschaften des Kontakts. Durch vermehrten Abbau von Kontaktmaterial verändern sich die Oberflächen der Kontaktstücke und somit auch deren Kontakteigenschaften. An Schaltkontakte werden somit hohe Anforderungen bezüglich thermischer und mechanischer Festigkeit gestellt.

#### 4.3.5.6 Beanspruchungen und Anforderungen an Kontaktwerkstoffe für schaltende Kontakte

Einige gebräuchliche Kontaktwerkstoffe, die in Nieder- und Hochspannungsschaltern eingesetzt werden, sind in Tabelle 9 aufgelistet. Zu den am häufigsten eingesetzten Werkstoffen zählen v.a. Silber, Kupfer und Wolfram.

**Tabelle 9: Gebräuchliche Kontaktwerkstoffe für Nieder- und Hochspannungsschalter [35]**

Werkstoffbezeichnung	Werkstoffart
Cu Ag 1000, AgCu (3...10% Cu)	Reine Metalle oder Legierungen
AgNi (10...40% Ni) AgMeO (8...15% CdO, SnO <sub>2</sub> , ZnO) AgC (2...5% C)	Verbundwerkstoffe auf Silberbasis
WAg, WCAg, MoAg (20...60 % Ag) WCu (10...40% Cu)	Verbundwerkstoffe auf Basis hochschmelzender Metalle oder Verbindungen

In Tabelle 10 sind, nach Schaltfunktion gegliedert, die verschiedenen auftretenden Beanspruchungen und Anforderungen an Kontaktwerkstoffe aufgelistet.

**Tabelle 10: Beanspruchungen und Anforderungen an Kontaktwerkstoffe [35]**

Schaltfunktion	Beanspruchungen	Anforderungen
<b>Einschalten</b>	Abbrand bei Vordurchschlaglichtbögen Verschweißgefahr beim Einschaltprellen und Vordurchschlaglichtbögen	Geringer Einschaltabbrand Geringe Schweißneigung, kleine Scheißkräfte
<b>Stromführung im geschlossenen Zustand</b>	Erwärmung unter Betriebsbedingungen Erwärmung und Verschweißgefahr bei Kurzschlussstrombelastung Dynamisches Abheben bei Kurzschlussstrombelastung, Verschweißgefahr durch Abhebelichtbögen	Geringer Kontaktwiderstand Geringer Kontaktwiderstand und kleine Schweißkräfte Geringe Schweißneigung
<b>Ausschalten</b>	Verharrneigung der Bogenfußpunkte Bogenlöschung Abbrand durch Ausschaltlichtbögen Stromabriss bei kleinen induktiven Strömen (v.a. bei Vakuumschalter) Reaktion mit dem Umgebungsmedium bei der Lichtbogenbeanspruchung, Erhöhung des Kontaktwiderstands	Kurze Verweilzeit Rasche Wiederverfestigung Geringer Ausschaltabbrand Niedriger Abreißstrom (chopping current) Geringe Neigung zur Fremdschichtbildung, Fremdschichten leicht zerstörbar
<b>Geöffneter Zustand</b>	Fremdschichtbildung durch Reaktion mit Umgebungsmedium	Geringe Neigung zur Fremdschichtbildung, Fremdschichten leicht zerstörbar

## 5 Elektrodynamische Beanspruchungsgrenze

Neben den thermischen Beanspruchungen, welche in Abschnitt 4 ausführlich erläutert wurden, werden elektrische Betriebsmittel auch mechanisch beansprucht. Zum einen wirken träge Kräfte, welche durch das Eigengewicht als auch durch die Eis- und Windlast entstehen, auf diese ein. Zum anderen werden stromdurchflossene Leiter mit elektrodynamischen Kräften belastet. Diese Stromkräfte sind im normalen Betrieb für gewöhnlich gering. Im Kurzschlussfall bewirken die hohen Kurzschlussströme, dass die Stromkräfte sehr große Werte annehmen können. Der Kurzschlussfall stellt somit die größte Beanspruchung an die mechanische Festigkeit dar und ist daher Grundlage für die Dimensionierung von elektrotechnischen Anlagen [37, 41]. Häufig wird diesbezüglich eine Unterscheidung in Normal-Lastfall (dauernd oder nur vorübergehend auftretende Belastungen) und in Ausnahme-Lastfall (größtmögliche Belastungen durch Schalt- und Kurzschlusskräfte und durch Umwelteinflüsse) vorgenommen [42].

Auf diese mechanischen und elektrodynamischen Kräfte reagiert das System mit Druck-, Zug-, Biege-, Schub- und Torsionsspannungen sowie Dehnungen und Auslenkungen an Hilfskonstruktionen und Isolatoren. Um unzulässige Deformationen oder Zerstörungen zu vermeiden, dürfen bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden.

Bevor in Abschnitt 5.2 die verschiedenen auftretenden mechanischen als auch elektrodynamischen Beanspruchungen an elektrischen Leitern und Anlagenteilen behandelt werden, beschäftigt sich Abschnitt 5.1 mit der Entstehung und der Berechnung von Kurzschlusskräften.

### 5.1 Kräfte im elektromagnetischen Feld

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld, wirken auf ihn Kräfte, die den Stromkreis derart zu deformieren versuchen, sodass der umfasste magnetische Kraftfluss zunimmt. Sind diese Ströme sehr groß, entstehen dadurch hohe mechanische Beanspruchungen an Betriebsmitteln und deren Befestigungen. Die Vorausberechnung der mechanischen Kurzschlusswirkung ist daher sehr wichtig und besteht aus zwei Teilaufgaben [43]:

- Bestimmung der elektromagnetischen Kräfte, welche stromdurchflossene Leiter auf ihre ebenfalls stromdurchflossenen benachbarten Leiter ausüben und
- die Berechnung der mechanischen Beanspruchung aus dem Verhalten des Leiters, bei zeitlich veränderlichen Kraftbelegen von kurzer Dauer.

Die elektromagnetischen Kräfte, die zwischen stromdurchflossenen Leitern entstehen, können auf zwei Arten berechnet werden [43]:

1. Aus der Änderung der magnetischen Energie bei virtueller Verschiebung des Leiters, für den die auf ihn wirkende Kraft berechnet wird und
2. aus der magnetischen Flussdichte  $B$  am Ort des Leiters, für den die auf ihn wirkende Kraft berechnet wird, und dem diesen Leiter an der gleichen Stelle durchfließende Strom.

In dieser Arbeit wird die zweite Berechnungsmethode herangezogen. Die elektromagnetische Kraft  $d\vec{F}_l$  lässt sich aus der Beziehung

$$d\vec{F}_l = (d\vec{l}_l \times \vec{B}_l) i_l \quad (5.1)$$

ermitteln [37]. Dabei ist  $d\vec{l}_l$  ein Wegelement des Leiters in Richtung des Stroms  $i_l$ .  $\vec{B}_l$  beschreibt dabei die magnetische Flussdichte, auch magnetische Induktion genannt, welche auf den Strom  $i_l$  wirkt. Die zeitabhängigen Ströme führen zu zeitabhängigen Kräften, welche als Streckenlast, gleichmäßig verteilt über die Leiterlänge wirken. Für eine Leiteranordnung, wie sie in Abbildung 5.1 dargestellt ist, lassen sich diese Kräfte, für den Leiter 1, nach (5.2) berechnen.

$$\frac{dF_1}{dl_1} = B_2(t) \cdot i_1(t) \quad (5.2)$$

mit

$$B_2(t) = i_2(t) \cdot \frac{\mu_0}{2 \pi a} \quad (5.3)$$

Über die ganze Leiterlänge  $l$ , addieren sich die Teilkräfte  $dF$  zu:

$$F_1(t) = l \cdot \frac{\mu_0}{2 \pi a} \cdot i_1(t) \cdot i_2(t) \quad (5.4)$$

$\mu_0$  magnetische Feldkonstante (Permeabilität im Vakuum)

$a$  Leitermittenabstand

Handelt es sich um ein einphasiges System, für das  $i_1(t) = -i_2(t)$  gilt, berechnet sich im Falle eines sinusförmigen Leiterstroms die Amplitude der Kraft zu:

$$\hat{F}_1 = l \cdot \frac{\mu_0}{2 \pi a} \cdot \hat{I}^2 \quad (5.5)$$

Für diesen Fall ist in Abbildung 5.2 der gesamte Verlauf der Leiterkräfte dargestellt. Sind die beiden Stromleiter gleichsinnig durchflossen wirken die Kräfte anziehend, bei entgegengesetzter Stromrichtung stoßen sie sich einander ab.

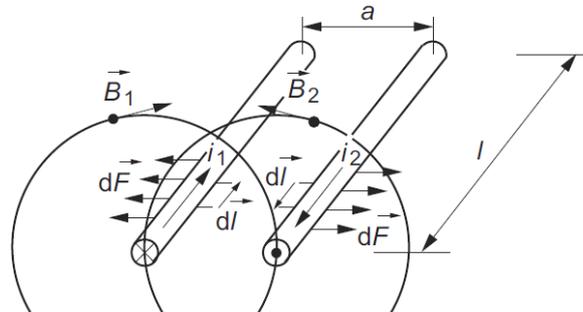


Abbildung 5.1: Kraftwirkung auf zwei stromdurchflossene linienförmige, parallele Leiter [37]

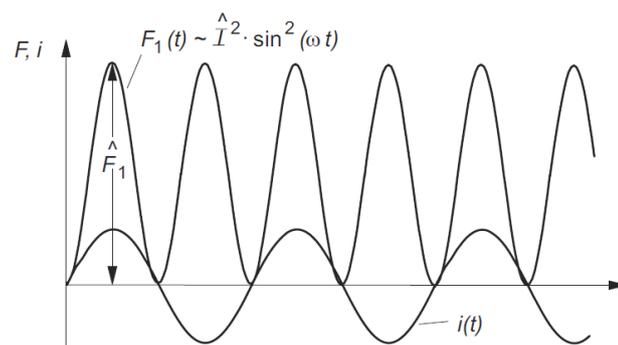


Abbildung 5.2: Kräfteverlauf bei zwei parallelen Leitern für einen sinusförmigen, gleich großen Hin- und Rückstrom [37]

In Drehstromsystemen treten bei einem dreipoligen Kurzschluss komplexere Verhältnisse auf als bei einem zweiphasigen System. Die Ursache dafür sind, die zueinander phasenverschobenen Leiterströme, welche zusätzlich eine abklingende Gleichstromkomponente enthalten. Um nun eine Anordnung kurzschlussfest zu gestalten, ist es notwendig von der ungünstigsten Beanspruchung, dem dreipoligen Kurzschluss, auszugehen. Die Kraft auf den mittleren biegesteifen Leiter während eines dreipoligen symmetrischen Kurzschlusses berechnet sich nach [72] zu:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{i_{p3}^2}{2} \frac{l}{a_m} \quad (5.6)$$

Die Hauptleiter, die jeweils den gesamten Strom eines Stranges führen, befinden sich in einer Ebene und haben den gleichen mittlere Abstand zueinander. Die größte Kraft wirkt in diesem Fall auf den mittleren Leiter. In obiger Gleichung ist  $i_{p3}$  der Stoßkurzschlussstrom des

symmetrischen dreipoligen Kurzschlusses nach DIN EN 60909-0 [73],  $l$  der größte Stützabstand und  $a_m$  der wirksame Hauptleiterabstand.

Sind nun die Hauptleiter in einzelne Teilleiter aufgeteilt, führt jeder von diesen nur einen bestimmten Teil des gesamten Stroms eines Stranges. Die größte Kraft wirkt auf die äußeren Teilleiter. Die maximale Stoßkraft zwischen den benachbarten Teilleitern beträgt für den dreipoligen Kurzschlussfall nach [72]:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{i_{p3}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (5.7)$$

- $n$  Anzahl der Teilleiter
- $l_s$  größter Mittenabstand zweier benachbarter Zwischenstücke
- $a_s$  wirksamer Abstand zwischen den Teilleitern

Die elektromagnetische Kraft wird also vom Produkt der Ströme  $i_1$  und  $i_2$  bestimmt. Wie schon erwähnt, richtet sich der zeitliche Verlauf der Kräfte (Streckenlast) nach dem zeitlichen Verlauf der Ströme und ist an allen Punkten synchron. Die Höhe der Streckenlasten wird durch die Geometrie bestimmt und kann deshalb in verschiedenen Punkten unterschiedlich groß sein.

## 5.2 Mechanische Beanspruchungen elektrischer Anlagen

### 5.2.1 Auftretende Belastungen im Betrieb

Eigengewicht, ständige Lasten, Eis, Wind und Kräfte durch Kurzschlussströme belasten elektrische Betriebsmittel mechanisch. Dabei entstehen mechanischen Spannungen in biegesteifen Leitern und Kräfte auf angrenzende Tragkonstruktionen und Isolatoren. An biegsamen Leitern kommt es zu Auslenkungen, wodurch Seilzugkräfte und Kräfte auf Anschluss- und Aufhängepunkte entstehen. Um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb gewährleisten zu können, müssen Lastannahmen getroffen werden, denen unterschiedliche Lastfälle zugeordnet werden. In Tabelle 11 und Tabelle 12 wurden Lastannahmen für biegesteife Leiter erstellt. Ziel der Projektierung ist es die Beanspruchungen so zu ermitteln, dass diese  $\leq$  der maximalen Belastbarkeit bleiben.

**Tabelle 11: Lastannahme für den Normal-Lastfall [44]**

Aufstellungsort		Innenraum	Freiluft
Lastannahme für	Leiterspannungen, Stützpunktkräfte	Eigengewicht + ständige Last	Eigengewicht + Eislast + Windlast + ständige Last
	Durchbiegung	Eigengewicht + ständige Last	Eigengewicht + ständige Last

**Tabelle 12: Lastannahme für den Ausnahme-Lastfall [44]**

Aufstellungsort		Innenraum und Freiluft
Lastannahme für	Leiterspannungen, Stützpunktkräfte	Kurzschlusskräfte + Eigengewicht + ständige Last

Wirken dynamische Kräfte auf biegesteife Körper, können irreversible plastische Verformungen beibehalten werden. Sind diese zu stark, kann der Weiterbetrieb gestört oder nicht mehr zulässig sein. Abbildung 5.3 zeigt die Verformung von zwei parallelen Stromschiene aus Kupfer, nach einer Kurzschlussbeanspruchung. Der Kurzschlussstrom von 25 kA und einer Kurzschlussdauer von 300 ms führte dazu, dass sich die beiden Leiter abgestoßen haben und nicht mehr in ihre Ausgangslage zurückkehrten. Da die Elastizitätsgrenze deutlich überschritten wurde, entstand diese irreversible Verformung.



**Abbildung 5.3: Verformte Stromschiene nach einem 25 kA-Kurzschluss [45]**

## 5.2.2 Mechanische Spannungen in biegesteifen Leitern

Die Streckenlast führt zu einer Dehnung  $\varepsilon$  (relative Längenänderung) im Leiter, welche proportional zur mechanischen Spannung  $\sigma$  ist. Dieser Zusammenhang wird über das *hookesche Gesetz* (5.8) ausgedrückt und kann für viele mechanische Berechnungen als gute Näherung herangezogen werden [30].

$$\sigma = \frac{F}{A} = \varepsilon E \quad (5.8)$$

Werte für den Elastizitätsmodul wichtiger Leiterwerkstoffe sind aus Tabelle 21 zu entnehmen.

Als Beispiel für die Bestimmung von mechanischen Spannungen, wird wieder ein biegesteifer Leiter betrachtet. Die Biegespannung  $\sigma_m$ , welche durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern entsteht, berechnet sich nach (5.9). Die Kräfte zwischen den Teilleitern erzeugen die Biegespannung  $\sigma_s$  (5.10) [72].

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8M_m} \quad (5.9)$$

$$\sigma_s = V_{\sigma s} V_{r s} \frac{F_s l_s}{16M_s} \quad (5.10)$$

Die Berechnung der dynamischen Beanspruchung, auf jegliche Leiteranordnung, lässt sich über die Lösung partieller Differentialgleichungen nur mit einem sehr hohen Aufwand bewerkstelligen. Durch die Einführung von Frequenzfaktoren verringert sich der Rechenaufwand deutlich. Die Faktoren  $V_\sigma$ ,  $V_r$ ,  $V_{\sigma s}$  und  $V_{r s}$  berücksichtigen die Dynamik des Systems. Der Faktor  $\beta$  hängt von der Art und der Anzahl der Stützpunkte ab. Diese Faktoren sind entsprechenden Normen zu entnehmen.  $M_m$  und  $M_s$  sind die Widerstandsmomente eines Haupt- bzw. Teilleiters, welche aus den vorherrschenden Kräften berechnet werden können. Die Biegebeanspruchung und somit auch die mechanische Festigkeit eines Leiters, sind stark vom Widerstandsmoment abhängig [4].

Biegesteife Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn die auftretenden Kurzschlusskräfte keine merkbaren bleibenden Verformungen am Leiter nach sich ziehen. Die Bedingung (5.11) nach [72] muss dabei erfüllt sein.

$$\sigma_m + \sigma_s = \sigma_{tot} \leq \sigma_{zul} = q R_{p0,2} \quad (5.11)$$

Der Plastizitätsfaktor  $q$  und die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  sind von dem Leiterprofil bzw. von dem eingesetzten Material abhängig. Mindestwerte der Streckgrenze von Kupfer und Aluminium finden sich z.B. in den DIN-Normen 40500 und 40501 [74, 75] und in Tabelle 26.

Als Streck- oder Dehngrenze  $R_{p0,2}$  wird in der Werkstoffprüftechnik jene Spannung bezeichnet, bei der eine bleibende Dehnung von 0,2 % bestehen bleibt [30]. Bis zu dieser Grenze sind keine sichtbaren plastischen Verformungen erkennbar. Wird diese Grenze überschritten, kehrt das Material nach Entlastung nicht mehr in die ursprüngliche Form zurück. Nähere Informationen bezüglich des Zusammenhangs zwischen mechanischen Spannungen und Dehnungen in metallischen Werkstoffen sind Abschnitt 5.3.1 zu entnehmen. Bei Rechteckleitern beträgt der Faktor für die Plastizität  $q = 1,5$ . Weißt der Leiter ein spezielles Profil auf (U- oder Doppel-T-Profil), liegen die Werte für  $q$ , je nach Biegeachse, zwischen 1,19 und 1,83. Für einen runden Vollleiter beträgt  $q = 1,8$ . Handelt es sich um runde oder rechteckige Rohrleiter, wie sie vermehrt in Schaltanlagen eingesetzt werden, hängt der Plastizitätsfaktor von den Rohrabmessungen ab. Er liegt zwischen 1,1 und 1,7. Eine höhere Auslastung der Stromschienen ist möglich, wenn man Übergänge von vollständiger zu teilweiser Einspannung sowie eine geringe, nicht merkbare Verformung zulässt und in die Berechnung einbezieht [42].

Bei der Ermittlung der zulässigen Spannung ist neben der dynamischen Leiterbelastung (5.11) auch noch die statische Leiterbelastung, durch die Eigengewichtskraft  $\sigma_G$ , zu berücksichtigen [44].

$$\sigma_{tot} = \sigma_G + \sigma_m + \sigma_s \leq \sigma_{zul} \quad (5.12)$$

Bei der Ermittlung der mechanischen Spannungen an Rohren und Rundleitern ist die Wirkung des Eis- und Windbelags in die Berechnung mit einzubeziehen. Für alle anderen Profilen gilt (5.12), da diese i.d.R. nicht für Freiluftanwendungen eingesetzt werden.

Die höchsten auftretenden mechanischen Spannungen  $\sigma_{max}$  dürfen bestimmte material- und geometrieabhängige Grenzwerte nicht übersteigen, da es sonst zu einer Überbeanspruchung des Werkstoffes und der Konstruktion kommt [42]. Werte für Dauerbeanspruchungen liegen i.d.R. weit unter diesen Grenzwerten [4].

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{zul} = \frac{qR_{p0,2}}{\gamma_F \gamma_M} \quad (5.13)$$

$\gamma_F$  ist der Sicherheitsfaktor für die Einwirkung (Belastungsbeiwert) und  $\gamma_M$  ist der Sicherheitsfaktor für das Material (Materialbeiwert). Für den Normal-Lastfall gilt nach EUROCODE 3 [76]:

$$\gamma_F = 1,35 \quad \gamma_M = 1,1 \quad (5.14)$$

Für den Ausnahme-Lastfall ist für beide Faktoren 1,0 einzusetzen.

Wenn die zulässige Spannung  $\sigma_{zul}$  überschritten wird, führt dies zu plastischen Verformungen bis hin zum Bruch des Materials. Dabei sind insbesondere die Randbereiche des Leiters stark beansprucht. Liegen die mechanischen Spannungen unter dem zulässigen Grenzwert, können beliebige Durchbiegungen bis zu 1 % des Stützabstandes entstehen. Solange die Mindestabstände zwischen den Hauptleitern oder zwischen Hauptleiter und geerdeten Teilen nicht unterschritten werden, beeinträchtigen diese Verformungen die Funktionsfähigkeit der Anlage nicht und können daher als zulässig angesehen werden [37].

Durch die Forderung eine Anlage kurzschlussfest zu dimensionieren und nur elastische Verformungen der Leiter zuzulassen, ergeben sich dadurch größere Leiterquerschnitte, kleinere Stützabstände und ggf. stärkere Stützeinrichtungen. Diese Gegebenheiten führen in weiterer Folge zu einer Erhöhung der Errichtungskosten. Werden jedoch geringe plastische Verformungen toleriert, die nach einem Ausnahme-Belastungsfall verbleiben können, ist eine wesentlich günstigere Ausführung realisierbar [42].

### 5.2.3 Kraftwirkung auf biegesteife Leiter und deren Stützpunkte

Die Kurzschlusskräfte an biegesteifen Leitern verursachen hauptsächlich Beanspruchungen quer zum Leiter. Das bedeutet, dass die direkte Hauptleiterbeanspruchung durch die erzeugten Querkräfte geschieht. Diese Kräfte werden vom Leiter aufgenommen und an die Stützpunkte übertragen. Indirekt wirken Längskräfte auf den Hauptleiter, sofern mehrfache Einspannungen vorhanden sind. Um dies zu veranschaulichen, sind in Abbildung 5.4 a die Richtungen der auftretenden Kräfte auf einen Hauptleiter eingezeichnet. Der Leiter ist dabei auf zwei Stützen gelenkig gelagert.  $F_H$  ist hier die maximale Kraft auf den Hauptleiter, sie entspricht dem Spitzenwert der Kraft zwischen den Hauptleitern im Falle eines dreipoligen Kurzschlusses  $F_{m3}$ .  $F_A$  und  $F_B$  sind die Auflagekräfte in den Stützpunkten. Das maximale Biegemoment  $M_{max}$  und die maximale Durchbiegung  $y_{max}$  werden jeweils beim halben Stützpunktabstand  $l/2$  erreicht.

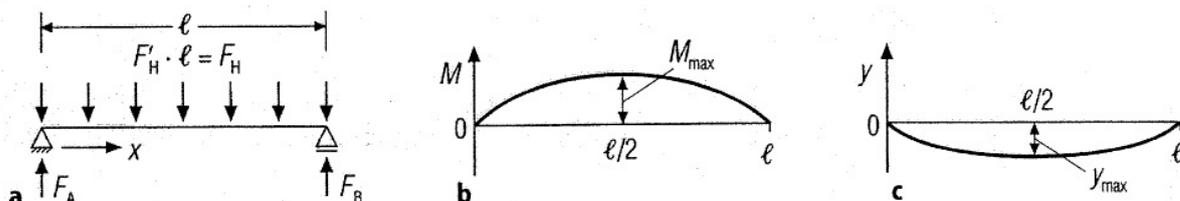


Abbildung 5.4: Hauptleiter auf zwei Stützen, gelenkig gelagert. a Kräfte auf Leiteranordnung; b Biegemomentenverlauf; c Biegelinie [41]

Des Weiteren wird in Abbildung 5.4 b der Verlauf des Biegemoments und in Abbildung 5.4 c die Durchbiegung entlang des Balkens gezeigt. An Freitragern, bei denen der Leiter in einem Punkt fest eingespannt ist, tritt an der Einspannstelle das größte Biegemoment auf.

Die dynamische Kraft  $F_d$ , welche auf die Stützpunkte eines biegesteifen Leiters in Drehstromanlagen wirkt, berechnet sich nach [72] zu:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (5.15)$$

Werte für  $V_F$ ,  $V_r$  und  $\alpha$  sind der Norm EN 60865-1 zu entnehmen. Tabelle 13 zeigt, aus welchen Kraftkomponenten sich die Kraft auf die Stützpunkte zusammensetzt, in Abhängigkeit des Leiterprofils und dem Lastfall.

**Tabelle 13: Kräfte auf Stützpunkte in Abhängigkeit des Lastfalls [44]**

Kräfte auf Stützpunkte				
Im Normal-Lastfall	Rohre und Rundleiter	horizontal vertikal	$F = F_W$ $F = F_G + F_E + F_{SL}$	
	alle anderen Profile	horizontal vertikal	$F = 0$ $F = F_G + F_{SL}$	
Im Ausnahme-Lastfall	Rohre und Rundleiter (Hauptleiteranordnung horizontal)	horizontal	$F = F_W + F_d$	
		vertikal	$F = F_G + F_E + F_{SL}$	
	(Hauptleiteranordnung vertikal)	horizontal	$F = F_W$	
		vertikal	$F = F_G + F_E + F_{SL} + F_d$	
	alle anderen Profile	(Hauptleiteranordnung horizontal)	horizontal	$F = F_d$
			vertikal	$F = F_G + F_{SL}$
(Hauptleiteranordnung vertikal)		horizontal	$F = 0$	
		vertikal	$F = F_G + F_{SL} + F_d$	

Indizes: G Gewichtskraft, E Eislast, SL ständige Last, W Windlast, d dynamische Kraft

Problematisch für jeden fest eingespannten oder starr auf Stützern montierten Leiter sind auch thermomechanische Kräfte. Durch die feste Einspannung wird die Wärmedehnung (siehe Abschnitt 4.2.2.2) verhindert und es baut sich in ihm eine thermisch bedingte Druckspannung  $\sigma_{th}$  auf [1].

$$\sigma_{th} = -E \alpha_l \Delta\vartheta \quad (5.16)$$

Durch diese Spannung wird eine Kraft  $F_{th}$  auf die Einspannung ausgeübt.

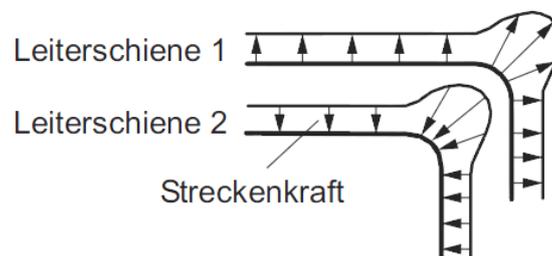
$$F_{th} = E A \alpha_l \Delta\vartheta \quad (5.17)$$

**Tabelle 14: Werkstoffkennwerte gängiger Leiterwerkstoffe [10]**

Werkstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_l$ (0 ... 100 °C) in $10^{-6}/K$	Elastizitätsmodul E in $kN/mm^2$
Kupfer	16,8	128
Aluminium	23,8	70
Stahl	12	210

### 5.2.4 Kraftverteilung an Krümmungen

An gekrümmten, biegesteifen Leitern ist zu beachten, dass hier nicht nur das Fremdfeld von benachbarten Leitern, sondern auch das Eigenmagnetfeld auf den Leiter wirken. Die maßgeblichen Feldanteile lassen sich über das *Biot-Savartsche* Gesetz ermitteln. Das Eigenmagnetfeld führt zu einer zusätzlichen Kraftwirkung, welche jedoch bei geraden Anordnungen nicht zum Tragen kommt. An Ecken und Krümmungen stellt sich auf Grund des ungleichmäßig verteilten Magnetfelds, auch eine ungleichmäßig über die Länge verteilte Streckenlast ein. Je enger der Krümmungsradius, desto größer ist der Kraftanstieg in diesem Bereich, wie in Abbildung 5.5 gut erkennbar ist.


**Abbildung 5.5: Streckenkraftverteilung an zwei parallelen, rechtwinklig gebogenen Leitern bei entgegengesetzt fließenden Strömen [37]**

### 5.2.5 Bestimmung der maßgeblichen Kennfrequenz von Leitern

Ein weiterer Punkt, der nicht außer Acht gelassen werden darf, ist die Leiterschwingung. Sie kann die mechanischen Beanspruchungen entlang eines Leiters erheblich beeinflussen und muss daher auch berücksichtigt werden. Die maßgebliche Kennfrequenz (Eigenschwingzahl)  $f_c$  des Leiters, sollte nicht im gefährlichen Resonanzbereich der Betriebsfrequenz (50 Hz oder ein Vielfaches davon) liegen. Diese Kennfrequenz ist von den Materialeigenschaften (Elastizitätsmodul und Trägheitsmodul), der Anzahl und Art der Stützpunkte und Zwischenstücke (durch  $\gamma$  gekennzeichnet), dem Aufbau als auch dem Profil des Leiters und dem Massebelag  $m'$  abhängig. Besteht der Hauptleiter aus einem Einzelleiter ist

Gleichung (5.18) anzuwenden. Handelt es sich um einen Hauptleiter, der aus Teilleitern mit Rechteckprofil besteht, ist die maßgebliche Kennfrequenz des Hauptleiters nach (5.19) zu berechnen. Der Faktor  $c$  ist von der Anzahl der Versteifungselemente und von der Anzahl der Abstandhalter abhängig [41].  $J$  bzw.  $J_s$  stellen das Flächenträgheitsmomente auf den jeweiligen Leiter dar. Weisen die Teilleiter ein U- oder I-Profil auf, wird  $f_c$  ebenfalls über (5.18) bestimmt. Die Faktoren  $c$  und  $\gamma$  sind aus [72] zu entnehmen.

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (5.18)$$

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (5.19)$$

Für eine technische-wirtschaftliche Auslegung von Betriebsmitteln, ist die gesamte Anordnung als ein schwingendes System zu betrachten. Dadurch können, in Abhängigkeit der Betriebsspannung, die auftretenden Beanspruchungen vermindert und Erhöhungen vermieden werden [42].

## 5.2.6 Auslegung von Leiterseilen und Kabeln

Prinzipiell werden Leiterseile wie Schienen berechnet und dimensioniert. Dabei ist aber zu beachten, dass biegsame Leiter, im Gegensatz zu biegesteifen Leitern, keine Kräfte in Querrichtung aufnehmen können. Indirekt werden diese jedoch durch die Längskräfte beansprucht. Durch die Kraftwirkung im Kurzschlussfall, wird das Leiterseil in Bewegung versetzt und es kommt zu einer Seilauslenkung. Das Eigengewicht und die Auslenkung des Seiles sind für die auftretenden Seilzugkräfte maßgebend. Im Kurzschlussfall entstehen, durch das Herabfallen des Leiterseils, Fallseilzugkräfte und, durch die Kontraktion von Bündelleitern, s.g. Bündelleiterseilzugkräfte. Um die Seilauslenkung in die Berechnungen einzubinden, sind modifizierte Beziehungen zu verwenden (siehe [46, 72]). Die Kurzschlussseilzugkraft ist wegen der Seilträgheit nicht mehr vom Stoßstrom  $i_p$ , sondern vom Anfangs-Kurzschlusswechselstrom  $I_k''$  abhängig.

Bei der Bemessung der mechanischen Beanspruchung von Kabeln und Kabelgarnituren, sind wiederum die im Kurzschlussfall auftretenden Kräfte maßgebend. Diese Kräfte sind besonders bei mehradrigen Kabeln, durch ihren geringen Abstand zueinander, sehr hoch. Da diese aber grundsätzlich radial wirken, werden sie auch gut abgefangen. Besonders hohe Kurzschlussbeanspruchungen treten bei parallel geführten Einleiterkabeln auf. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass ein Kabel, welches für den

Kurzschlussfall thermisch ausreichend dimensioniert ist, auch den dabei auftretenden mechanischen Beanspruchungen stand hält [19].

Zusammengefasst sei festgehalten, dass Stromkräfte biegesteife Leiter, wie Stromschienen und Rohrleiter, auf Biegung, biegsame Leiter, wie Leiterseile, Kabel und Bänder, auf Zug und feste Bauteile, wie Isolatoren und Stützer, auf Umbruch, Zug oder Druck beanspruchen [47]. Die Kurzschlussfestigkeit von Drehstrom- und Zweileiter-Wechselstrom-Anlagen kann, wie bereits gezeigt, mit der gültigen Norm DIN EN 60865-1/VDE 0103 nachgewiesen werden. Sie beinhaltet Erläuterungen, Berechnungsverfahren sowie Tabellen und Abbildungen mit benötigten Kennzahlen für biegesteife Leiter und Leiterseile.

## 5.3 Elektromechanische Beanspruchung von Leiterwerkstoffen

### 5.3.1 Plastische Verformungen

Wird der Leiterwerkstoff, etwa durch die enormen Kurzschlusskräfte, mechanisch überbeansprucht, können dadurch bleibende plastische Verformungen entstehen. Das plastische Verhalten von Werkstoffen wird in Druck- und Zugversuchen ermittelt und in der Spannungs-Dehnungs-Kurve grafisch dargestellt. Diese Kurven sind vom eingesetzten Material abhängig und können sich voneinander sehr deutlich unterscheiden. Um eine Messkurve zu erhalten, die nur von der Struktur und der Art des Materials jedoch nicht von der Geometrie abhängig ist, werden in der Praxis reduzierte Einheiten verwendet. Die entstehende Längenänderung  $\Delta l$  wird auf die Anfangslänge  $l_0$  und die Kraft  $F$  wird auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  der Probe bezogen. Die wahre Spannung ist immer auf den jeweiligen Querschnitt  $A$ , bei entsprechender Verformung, bezogen und liegt über der nominalen Spannung  $\sigma$  [30].

Abbildung 5.6 zeigt den typischen Verlauf einer Spannungs-Dehnungs-Kurve. Auf der Abszisse wird die Dehnung  $\varepsilon$  und auf der Ordinate die Spannung  $\sigma$  aufgetragen. Vom Nullpunkt bis zur Elastizitätsgrenze  $\sigma_E$  verläuft die Spannungs-Dehnungs-Beziehung linear, es gilt das bereits in Abschnitt 5.2.2 erwähnte hookesche Gesetz. Wird die Spannung bis zur Streckgrenze  $\sigma_S (= R_p)$  erhöht, gelangt man in einen unstetigen Bereich, der sich durch plastische Verformungen ergibt. Baustahl verfügt über eine ausgeprägte Streckgrenze, hingegen haben Nichteisenmetalle, wie Kupfer und Aluminium, keinen Unstetigkeitsbereich. Deshalb wird hier die Spannung, bei der die Dehnung 0,2 % von der verwendeten Messlänge beträgt, anstelle der Streckgrenze bestimmt und als 0,2 %-Dehngrenze bezeichnet. Der Punkt mit der höchsten Kraft wird als Zugfestigkeitsgrenze oder Bruchfestigkeit  $\sigma_B$  bezeichnet. Wird dieser Punkt überschritten, kommt es bei verformbaren

Metallen zu Einschnürungen des Querschnitts und in weiterer Folge zum Bruch an dieser Stelle [31]. In Tabelle 26 finden sich diesbezüglich einige Richtwerte.

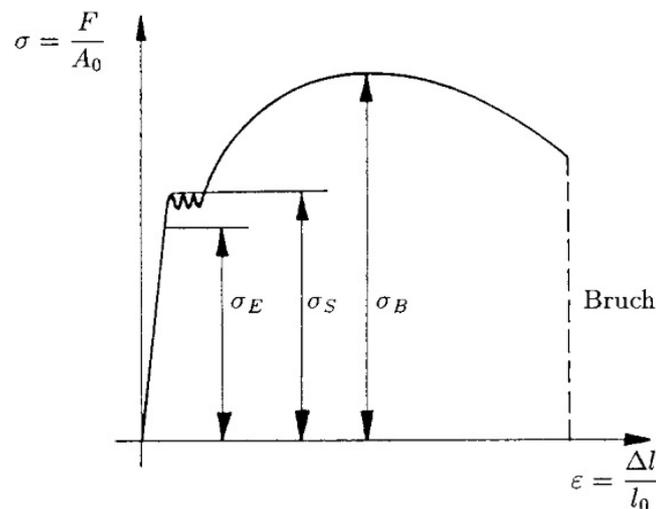


Abbildung 5.6: Typische Spannungs-Dehnungs-Kurve [31]

### 5.3.2 Materialermüdung

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2.6 erwähnt wurde, bewirken u.a. wechselnde mechanische Belastungen, wie periodische Schwingungen, Vibrationen oder Wärmedehnungen, dass sich das Leitermaterial ermüdet und seine Eigenschaften verändern.

## 5.4 Elektromechanische Beanspruchung von Isolierwerkstoffen

Der Stromfluss hat neben der thermischen Wirkung (Erwärmung der Strombahn und angrenzender Teile) und der ionisierenden Wirkung durch Lichtbögen, auch noch eine mechanische Wirkung (Stromkräfte) auf die Isolierung von Betriebsmitteln.

Feste Isolierstoffe, wie Keramik, Glas, Kunststoffe, Papier oder Pressspan, werden durch hohe elektromagnetische Kräfte, ebenso wie die Stromleiter auf Biegung, Dehnung, Torsion, Druck und Schub beansprucht. Diese Belastungen erzeugen bleibende Verformungen, Riss- und Spaltenbildungen, Ablösungen zwischen Elektroden und Dielektrikum, Versprödungen und Materialbrüche. Dadurch wird der Homogenitätsgrad der Isolierung herabgesetzt, die elektrische Spannungsfestigkeit vermindert und die Ausbildung von Durch- als auch Überschlägen und Teilentladungen begünstigt. Alle diese Faktoren beschleunigen den

Alterungsprozess wesentlich. Besonders spröde Materialien, wie z.B. Porzellan und Steatit, sind sehr empfindlich gegen lokale mechanische Überbeanspruchungen [13].

Feste Isolierstoffe haben neben ihren Isolieraufgaben, oft noch mechanische Aufgaben zu erfüllen. Durch ihre gute Formstabilität werden Feststoffisolierungen u.a. für Abstütungen, Barrieren, Unterkonstruktionen, Einbettungen oder Gehäuse verwendet und dabei in verschiedenste Formen gebracht. Wird jedoch die Isolierung mechanisch, durch die Kraftwirkung des Stroms, beschädigt oder zerstört, ist deren einwandfreie Funktion im Betrieb nicht mehr gegeben. In vielen praktischen Anwendungen werden Kombinationen aus verschiedenen Isolierwerkstoffen, s.g. Verbundwerkstoffe, eingesetzt, um deren Vorzüge miteinander zu verbinden und somit die Widerstandfestigkeit und das Isoliervermögen zu erhöhen.

## 5.5 Elektromechanische Beanspruchung von Kontakten

Elektrische Kontakte werden nicht nur thermisch, elektrisch und elektrochemisch beansprucht, sondern müssen auch mechanischen Belastungen standhalten. Von Dauerkontakten wird eine sichere und feste Verbindung über die gesamte Lebensdauer erwartet. Meist haben diese Kontakte neben den elektrischen, auch mechanische und konstruktive Aufgaben zu erfüllen. An schaltende Kontakte werden auch sehr hohe Anforderungen bezüglich des mechanischen Langzeitverhaltens gestellt, da diese während ihrer Lebensdauer oft zahlreiche Schaltspiele durchführen müssen.

Durch den Stromfluss entsteht in der Stromenge, die eine Stromschleife darstellt, eine axiale Abhebekraft (*Holmsche Engekraft*), die der Anziehungskraft und der mechanischen Kontaktkraft entgegenwirkt. Ist die abstoßende Kraft größer als die schließende Kraft, kommt es zu einer Kontaktabhebung. Für die in Abbildung 5.7 dargestellte Kontaktstelle, lässt sich die Abhebekraft  $F_a$  nach (5.20) bestimmen [2].

$$F_a \approx \frac{i^2 \mu}{4\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5.20)$$

Durch die Wirkung der Abhebekraft ist eine sichere und gute Kontaktgabe oft nicht gegeben. Um dieses Problem handzuhaben, werden bei beweglichen oder steckbaren Verbindungen Mehrfachkontakte eingesetzt. Dadurch, dass die Verbindung an mehreren Punkten gleichzeitig stattfindet, wird eine ausreichende Kontaktgabe sichergestellt.

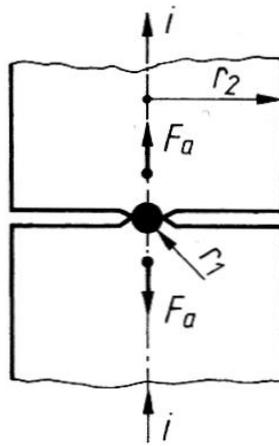


Abbildung 5.7: Abstoßende Kräfte an einer Stromenge [2]

## 6 Technische Gesichtspunkte

Die wichtigsten Gesichtspunkte bei der Bemessung von Stromleitern, sind das Isoliervermögen und die Stromtragfähigkeit über die gesamte Lebensdauer.

Kriterien für die Stromtragfähigkeit sind [2]:

- der Betriebszustand (ungestört/gestört),
- der Stromverlauf (Wechselstrom, Gleichstrom, Kurzschlussstrom, Stromflussdauer, Periodizität),
- das technische Ziel (keine qualitative Änderung wesentlicher Eigenschaften innerhalb der Lebensdauer trotz Alterung, keine Gefährdung von Personen),
- die technischen Kriterien (Istwert von Erwärmung, thermische Zeitkonstante, Isoliervermögen, mechanische Festigkeit  $\leq$  zulässiger Wert unter Prüfbedingungen),
- die physikalische Beanspruchung (thermisch oder mechanisch-dynamisch).

### 6.1 Genormte Spannungen und Ströme

#### 6.1.1 IEC-Normspannungen

Elektrische Netze und deren Betriebsmittel werden nach der *Nennspannung*  $U_n$  bzw. nach der *höchsten Betriebsspannung*  $U_m$  benannt. Vermehrt wird bei einzelnen Betriebsmitteln anstatt der Bezeichnung Nennspannung der Begriff *Bemessungsspannung*  $U_r$  (engl.: rated voltage) verwendet. Dies ist der Effektivwert der Leiterspannung und spezifiziert den maximalen Spannungswert im Normalbetrieb.  $U_r$  wird üblicherweise vom Hersteller für festgelegte Betriebsbedingungen bestimmt [77]. Die höchste Betriebsspannung berücksichtigt mögliche, dauernde Plus-Toleranzen, die im Normalbetrieb, zusätzlich zur Nennspannung zulässig sind. Diese Toleranzen haben wirtschaftliche und betriebliche Gründe [48].

Die Norm DIN IEC 60038 [77] enthält die genormten Nennspannungen für Gleich-, Wechsel- (50 Hz und 60 Hz) und Einphasenwechselstrom 16 2/3 Hz mit den jeweiligen zulässigen höchsten und niedrigsten Spannungen [49]. Nachstehende Angaben sind ein Auszug aus dieser Norm.

#### **Wechselstromnetz mit einer Nennspannung zwischen 100 V und 1000 V**

- Einphasen-Dreileiternetze: 240/120 V.
- Drehstrom-Vierleiter- oder Dreileiternetze: 400/230 480/277 690/400 1000 V.

## Gleichstrom- und Wechselstrom-Bahnnetze

- Gleichstromnetze: (600) 750 1500 3000 V.
- Wechselstrom-Einphasennetze: (6250) 15000 (für 16 2/3 Hz) 25000 V.

## Drehstromnetze mit einer Nennspannung über 1 kV

- 3 6 10 (15) 20 35 (45) 66 110 132 (150) 220 (300) (363) 420 525 765 1200 kV.

Die in Klammer stehenden Werte sollen nicht für neue Netze verwendet werden.

### 6.1.2 IEC-Normwerte für Bemessungsströme

In der Norm DIN EN 60059 [78] werden Normwerte für Bemessungsströme elektrischer Betriebsmittel festgelegt. Diese Werte sind für die Auslegung von Betriebsmitteln oder Versorgungsnetzen dienlich [49].

#### Genormte Bemessungsströme

- 1 1,25 1,6 2 2,5 3,15 4 5 6,3 8 A und das 10-, 100-, 1000-, 10000-fache dieser Werte,
- 100 125 160 200 kA.

Die Werte 1,6 - 3,15 - 6,3 und 8 dürfen auch durch 1,5 - 3 - 6 - 7,5 ersetzt werden. Des Weiteren gilt dies für deren Vielfaches durch Multiplikation mit  $10^n$  ( $n$  ist eine positive ganze Zahl). Die Werte der Bemessungsströme basieren auf einer dezimal-geometrisch gestuften Reihen, der s.g. Normzahlreihen R10 (NZR R10). Jeder Wert lässt sich innerhalb einer Dekade (hier 10), durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor  $\varphi_{10}$  (Stufensprung) aus dem vorherigen Wert bestimmen. Der Stufensprung für die NZR R10 berechnet sich nach (6.1) [50].

$$\varphi_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1,25 \quad (6.1)$$

Die Werte haben also immer einen gleich großen prozentualen Zuwachs.

Im Allgemeinen werden Betriebsmittel in der Energietechnik auf den elektrischen Strom bemessen. Kabel und Leitungen hingegen werden auf den Querschnitt und auf deren Verbindungselemente bemessen.

## 6.2 Netzebenen in Österreich

Eine Netzebene ist ein bestimmter Teilbereich eines Stromnetzes, der im Wesentlichen durch das Spannungsniveau bestimmt wird [51]. In Österreich gibt es sieben Netzebenen. Die 380-kV und 220-kV-Höchstspannungsnetze der drei Regelzonen (APG, TIWAG-Netz AG und VKW-Netz) bilden die Netzebene 1. Diese Netze dienen dem überregionalen Transport elektrischer Energie über weite Strecken. Die 110-kV-Hochspannungsnetze, oder auch Übertragungsnetze genannt, bilden die Netzebene 3. Die Verteilung des Stroms geschieht in der Mittelspannungsebene, über die 10 bis 30-kV-Netze (Netzebene 5). Die niedrigste Ebene (Netzebene 7) bilden die Niederspannungsnetze mit 0,4 kV Nennspannung. In den Netzebenen 2, 4 und 6 erfolgen die jeweiligen Umspannungen, um die Spannungsebenen einander anzupassen.

Die Netzebenen gliedern sich nach der Nennspannung wie folgt:

- Netzebene 1 (380 kV und 220 kV),
- Netzebene 2 (Umspannung von 380 kV und 220 kV auf 110 kV),
- Netzebene 3 (110 kV),
- Netzebene 4 (Umspannung von 110 kV auf 10 kV bis 30 kV),
- Netzebene 5 (10 kV bis 30 kV),
- Netzebene 6 (Umspannung von 10 kV bis 30 kV auf 0,4 kV),
- Netzebene 7 (0,4 kV).

Durch die physikalisch bedingten Verluste, die beim Transport von elektrischer Energie über ein Stromnetz entstehen, muss der Netzbetreiber für einen Ausgleich sorgen. Diese Netzverluste betragen je nach Netzebene zwischen 1 % und 7 % der transportierten Energie. In Österreich sind das jährlich rund 3,5 TWh [52]. Die meisten Verluste, rund 33 %, entstehen dabei in der Niederspannungsebene [53].

## 6.3 Betriebsströme

Ist ein Netz richtig ausgelegt, liegt der Betriebsstrom (Laststrom)  $I_B$  stets unter dem thermisch zulässigen Betriebs- oder Belastungsstrom  $I_{zul}$  des jeweiligen Betriebsmittels [37]:

$$I_B \leq I_{zul} \quad (6.2)$$

Der Nennbetriebsstrom  $I_N$ , der im ungestörten Betrieb fließt, wird durch die Netzspannung  $U$ , der Summe der Netzimpedanzen  $Z$  und der Last  $Z_L$  bestimmt [54]. Er berechnet sich zu:

$$I_N = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_L + Z)} \quad (6.3)$$

## 6.4 Kurzschlussströme

Kurzschlüsse sind spezielle Fehler, die dann entstehen, wenn eine niederohmige Verbindung zwischen einem spannungsführenden Leiter und mindestens einem weiteren Leiter, mit oder ohne Erdberührung, zu Stande kommt. Kurzschlüsse die zwischen einem Leiter und der Erde oder geerdeten Anlagenteilen auftreten werden als Erdkurzschlüsse bezeichnet. In Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation, wird ein einpoliger Fehler mit Erdberührung als Erdschluss bezeichnet [41]. Ein s.g. satter Kurzschluss liegt dann vor, wenn es zu einem direkten metallischen Kontakt zwischen den kurzgeschlossenen Leitern kommt. Der Übergangswiderstand ist sehr gering und praktisch nicht vorhanden. Werden die Leiter über einen Lichtbogen miteinander verbunden, spricht man von einem Lichtbogenkurzschluss. Der Widerstand ist hier nichtlinear und beträgt nur wenige Ohm. Bei großen Leiterabständen, wie es bei Freileitungen der Fall ist, bilden sich diese Kurzschlüsse sehr auffällig aus. Der Kurzschlussstrom beträgt ein Vielfaches des Betriebsstroms und führt zu, bereits erwähnten, thermischen und mechanischen Überbeanspruchungen an elektrischen Betriebsmitteln und Anlagenteilen. Durch die sehr hohen Ströme an der Fehlerstelle, wird die Spannung in diesem Bereich verringert. Fällt diese unter eine bestimmte Grenze, müssen u.U. Lasten abgeworfen werden um größere Schäden zu vermeiden [37].

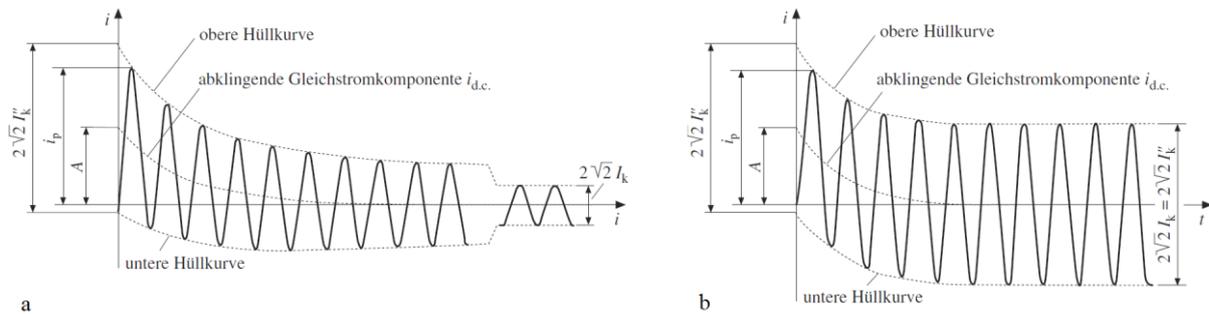
Bei der Bemessung von Betriebsmitteln ist die Berechnung der Kurzschlussströme im Netz von großer Bedeutung. Dabei ist der Verlauf, die Dauer und die Höhe der Fehlerströme von vielen Faktoren, wie der Kurzschlussart, der Sternpunktbehandlung (starr geerdet, isoliert oder mit Erdschlusskompensation), des Verhaltens von Lasten und Netzelementen, dem Netzaufbau und der Spannungsebene, abhängig. Es wird grundsätzlich zwischen den größten und den kleinsten Kurzschlussströmen unterschieden. Für die kurzschlussfeste Auslegung von Anlagen und Betriebsmitteln, die Berechnung der induktiven Beeinflussung, die Dimensionierung der Schutzmaßnahmen und die Auslegung der Erdungsanlage, werden die größten Kurzschlussströme herangezogen. Ausschlaggebend für die Wahl und Einstellungen von Schutzeinrichtungen, wie Sicherungen und Schutzrelais, sind die kleinsten Kurzschlussströme [41].

Maßgebend für die Kurzschlusskraft und die dynamische Beanspruchung von Betriebsmitteln, ist der Stoßkurzschlussstrom  $i_p$ . Er stellt den höchsten Augenblickswert des Kurzschlussstroms dar und tritt ca. eine halben Periode nach Kurzschlusseintritt auf [41, 54]. Der größte Strom kommt zu Stande, wenn der Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang auftritt. Dieser Fall ist maßgebend für die Bemessung der Anlage hinsichtlich ihrer mechanischen Beanspruchung. Für die thermische Auswirkung ist der thermisch gleichwertige Kurzzeitstrom (Joule-Integral)  $I_{th}$ , siehe Abschnitt 4.3.1, maßgebend. Bei der Auswahl und Auslegung von Leistungsschaltern sind u.a. der Ausschaltwechselstrom  $I_b$  und die Einschwingspannung von Bedeutung [41]. Der Dauerkurzschlussstrom  $I_k$  ist jener Überstrom, der im Fehlerfall nach dem Abklingen aller Ausgleichvorgänge bestehen bleibt [73].

#### 6.4.1 Kurzschlussstromberechnung

Die Berechnung der Kurzschlussströme, welche in einem Netz durch bestimmte Ereignisse auftreten können, kann durch die Vielzahl der Einflussfaktoren sehr komplex werden. Als Grundlage für die Berechnung von Kurzschlussströmen wird in dieser Arbeit die Norm IEC 60909-0:2001 [73] (Kurzschlussströme in Drehstromnetzen) herangezogen. Über diese Berechnungsverfahren, bei denen eine Ersatzspannungsquelle an der Fehlerstelle eingeführt wird, sollen sich die größten Kurzschlussströme ermitteln lassen, bei denen ein technisch sicherer Betrieb gegeben ist, ohne die wirtschaftliche Auslegung der Anlagen aus Acht zu lassen [41]. Die Norm ist für Nieder- und Hochspannungs-Drehstromnetze, für Frequenzen von 50 bis 60 Hz, anzuwenden und beschäftigt sich mit der Berechnung von Überströmen bei symmetrischen und unsymmetrischen Kurzschlüssen. Ein weiteres Verfahren zur Berechnung von Kurzschlussströmen ist das Überlagerungsverfahren, auf das hier aber nicht weiter eingegangen wird.

Tritt ein Kurzschluss in einem Netz auf, geht es vom Betriebs- in den Kurzschlusszustand über und es kommt zu einem Ausgleichsvorgang. Im Einschaltmoment bildet sich eine Gleichstromglied  $i_{d.c.}$  aus, dessen Amplitude gleich dem Augenblickswert des Wechselstroms in entgegengesetzter Richtung ist. Das Gleichstromglied klingt nach einer Exponentialfunktion mit  $\tau$  ab (siehe Abbildung 6.1) [54].



**Abbildung 6.1: Schematischer Verlauf des Kurzschlusswechselstroms bei a generatornahe und b generatorfernem Kurzschluss [73]**

$I_k''$	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	$I_k$	Dauerkurzschlussstrom
$i_p$	Stoßkurzschlussstrom	$A$	Anfangswert der Gleichstromkomponente $i_{d.c.}$

Bei einem *generatorfernen* Kurzschluss bleibt der Wechselstromanteil im Kurzschlussstrom, während der gesamten Kurzschlussdauer, nahezu konstant ( $I_k'' \approx I_b \approx I_k$ ) [41]. Ein solches Verhalten tritt dann ein, wenn die Reaktanz zwischen Generator und Fehlerstelle groß genug ist. In der Praxis ist das der Fall, wenn ein Kurzschluss in einem untergelagerten Netz auftritt [37]. Von einem *generatornahen* Kurzschluss spricht man, wenn der Anteil des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms des Generators, bei einem dreipoligen Kurzschluss, den zweifachen Bemessungsstrom  $I_r$  übersteigt oder wenn Asynchronmotoren mehr als 5 % des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms ohne Motoren beitragen ( $I_k'' > I_b > I_k$ ) [41, 73]. Der extremste Fall liegt vor, wenn ein Kurzschluss an den Klemmen des Generators auftritt.

Maßgebend für die elektrodynamische Beanspruchungen von Betriebsmitteln sind u.a. der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom  $I_k''$  und der Stoßkurzschlussstrom  $i_p$ .

#### 6.4.1.1 Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $I_k''$

„Effektivwert des Wechselstromanteils eines zu erwartenden Kurzschlussstroms im Augenblick des Kurzschlusseintritts, wenn die Impedanz ihre Größe zum Zeitpunkt Null beibehält.“ [73]. Der Maximalwert beträgt zum Zeitpunkt des Kurzschlusses ( $t = 0$ )  $2\sqrt{2}I_k''$ . Er wird auch subtransienter Kurzschlusswechselstrom genannt, fällt mit der Zeit ab und geht in den Dauerkurzschlussstrom  $I_k$  über. Im Allgemeinen liefert der dreipolige Kurzschluss, durch seine Symmetrie, die höchsten praxisrelevanten Kurzschlussströme. Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom errechnet sich für diesen Fall zu:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (6.4)$$

Die Ersatzspannungsquelle, welche durch  $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$  dargestellt wird, ist an der Fehlerstelle einzusetzen.

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_k \quad (6.5)$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (6.6)$$

Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom berechnet sich für den zweipoligen Kurzschluss nach (6.5) und für den einpoligen Erdkurzschluss nach (6.6). Bei  $\underline{Z}_{(1)}$ ,  $\underline{Z}_{(2)}$ ,  $\underline{Z}_{(0)}$  handelt es sich um die Kurzschlussmit-, Kurzschlussgegen- und Kurzschlussnullimpedanz. Berechnungen von unsymmetrischen Fehlern, verlangen eine Zerlegung des unsymmetrischen Drehstromsystems in die s.g. Mit-, Gegen- und Nullkomponenten [48].

#### 6.4.1.2 Stoßkurzschlussstrom $i_p$

Er ist der maximal mögliche Augenblickswert des zu erwartenden Kurzschlussstroms und berechnet sich, für dreipolige Kurzschlüsse, wie folgt [73]:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (6.7)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (6.8)$$

Der Stoßfaktor  $\kappa$  ist das Verhältnis von Stoßkurzschlussstrom zum Scheitelwert des stationären Dauerkurzschlussstroms  $\sqrt{2} I_k$ . Er ist der Norm EN 60909-0:2001 [73] zu entnehmen oder numerisch nach (6.8) über das Verhältnis von Wirk- zu Blindwiderstand, des Kurzschlusskreises, zu berechnen.

$$i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I''_{k2} \quad (6.9)$$

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I''_{k1} \quad (6.10)$$

Für den zweipoligen Kurzschluss wird der Stoßkurzschlussstrom nach (6.9) bzw. für den einpoligen Erdkurzschluss nach (6.10) berechnet.

#### 6.4.1.3 Abklingender aperiodischer Anteil des Gleichstroms $i_{d.c.}$

Mit ausreichender Genauigkeit berechnet sich der Gleichstromanteil des Kurzschlussstroms gemäß Gleichung (6.11) [73].

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2 \pi f t R/X} \quad (6.11)$$

#### 6.4.1.4 Ausschaltwechselstrom $I_b$

„Effektivwert als Mittelwert einer Periode der Wechselstromkomponente des zu erwartenden Kurzschlussstroms im Augenblick der Kontakttrennung des erstlöschenden Pols einer Schalteinrichtung.“ [73]. Im Falle eines generatorfernen Kurzschlusses ist er gleich dem Anfangs-Kurzschlusswechselstroms. Handelt es sich um einen generatornahen Kurzschluss, berechnet sich  $I_b$  zu:

$$I_b = \mu I_k'' \quad (6.12)$$

Der Abklingfaktor  $\mu$  ist abhängig vom Verhältnis  $I_{kG}''/I_{rG}$  ( $I_{rG}$  ist der Generatorbemessungsstrom bzw. -nennstrom) und dem Mindestschaltverzug  $t_{min}$ .

#### 6.4.1.5 Dauerkurzschlussstrom $I_k$

„Effektivwert des Kurzschlussstroms, der nach Abklingen aller Ausgleichsvorgänge bestehen bleibt.“ [73].

Die Abschätzung der oberen und unteren Grenze erfolgt nach:

$$I_k = \lambda_{max/min} I_{rG} \quad (6.13)$$

Die Minimal- und Maximalwerte des Dauerfaktors  $\lambda$  werden über die, in [73], angegebenen Diagramme bestimmt. Die Berechnung von  $I_k$  ist hier auch nur bei einem generatornahem Kurzschluss erforderlich, da ansonsten  $I_k = I_k''$  gilt.

### 6.4.2 Klassifizierung der Fehlerarten

Abhängig von der Lage des Fehlerortes unterscheidet man zwischen dem:

- generatornahen Kurzschluss und dem
- generatorfernen Kurzschluss.

Des Weiteren wird eine Unterteilung nach Anzahl der betroffenen Leiter vorgenommen:

- einpoliger Kurzschluss und einpoliger Erdschluss,
- zweipoliger Kurzschluss mit/ohne Erdberührung,
- dreipoliger Kurzschluss mit/ohne Erdberührung.

## 7 Wirtschaftliche Gesichtspunkte

Mit zunehmendem Energiebedarf und immer komplexer werdenden Stromnetzen, wachsen die Anforderungen an elektrische Anlagen und Betriebsmittel fortlaufend. Zugleich hat sich, mit der Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes in Europa, der Wettbewerb unter den Marktteilnehmer sehr stark verschärft. Der Handel und Verkauf von Strom ist ein sehr lukratives Geschäft mit steigender Konkurrenz. Alle diese Umstände tragen dazu bei, dass elektrische Betriebsmittel immer öfter bis an ihre Grenzen betrieben werden. Unter dem Begriff „Grenze“ versteht man in diesem Zusammenhang, die Strombelastbarkeit elektrischer Komponenten und deren Werkstoffe. Ein nachhaltiger und zukunftsorientierter Betrieb setzt voraus, dass die Belastung unter der maximalen Belastbarkeit liegt. Es ist also noch eine Reserve vorhanden. Wird ein Betriebsmittel bis an seine Belastbarkeitsgrenze betrieben, werden dadurch die vorgehaltenen Reserven im Betriebsfall und im Fehler-/Störfall abgebaut und das Risiko für einen Ausfall erhöht sich. Dabei werden die Langzeit- und die Kurzzeitstromtragfähigkeit, das Ein- und Ausschaltvermögen und u.U. auch die Schutzfähigkeit in Mitleidenschaft gezogen.

Die besseren Kenntnisse der physikalischen Zusammenhänge zwischen der Beanspruchung und des Betriebsverhaltens von elektrischen Komponenten, führen dazu, dass sich Investitionen in Werkstoffe und Platzbedarf reduzieren. Geräte werden immer kompakter gebaut und hochbelastbare Werkstoffe kommen zum Einsatz. Gleichzeitig werden andere Werkstoffe substituiert und Einsparungen an der Konstruktion vorgenommen. Das bedeutet, dass durch den steigenden Aufwand an das Engineering, Abschlüsse im konstruktiven Bereich getätigt werden müssen. Es ist also ein Trend zu beobachten, dass immer häufiger stille Reserven für jene Einflüsse abgebaut werden, die in der Entwicklung nicht (ausreichend) berücksichtigt oder beachtet wurden, oder deren Auswirkungen noch nicht ausreichend bekannt sind. Ein typisches Beispiel für den Betrieb an der Grenze sind die „versteckten“ Änderungen der Betriebs- und Umgebungsbedingungen, welche durch folgende Gegebenheiten hervorgerufen werden:

- Erweiterungen oder Änderungen einer bestehenden Netzstruktur,
- Steigende Anzahl an Verbrauchern → höhere Auslastung,
- Änderungen des Gleichzeitigkeitsfaktors durch zusätzliche Verbraucher,
- Änderung der elektrischen und thermischen Verhältnisse, z.B. durch Häufung von Leitungen oder durch Zunahme der Verlustwärme → abnehmende Kühlung,
- Austausch von elektrischen Betriebsmitteln,
- Unvollständige Nachfrage von Anlagenbetreibern bei einer Leistungssteigerung.

Auf Grund dieser Umstände, kommt es zu einem Anstieg des Last- und Kurzschlussstroms und die Reserve zur maximalen Strombelastbarkeit verringert sich. Besonders kritisch wird diese Situation im Hinblick auf Schutzeinrichtungen, Anlagenschutz und Personenschutz. Deshalb ist eine Überprüfung der Kurzschlussstromtragfähigkeit auf dynamische und thermische Beanspruchung sowie des Kurzschlussstromschaltvermögens von Schaltern, bei Änderungen der Umgebungsbedingungen, relevant.

Um elektrische Energie an den Endverbraucher zu bringen, ist ein starkes und gut ausgebautes Netz notwendig. Durch die Zunahme an Verbrauchern und den Mehrbedarf an Strom, gelangen viele bestehende Netzbereiche an ihre Grenzen. Doch ein Ausbau der Stromnetze erweist sich auf Grund von politischen und ökologischen Voraussetzungen als äußerst langwierig und hindernisreich. Um dennoch eine zuverlässige Versorgung zu gewährleisten, müssen Leitungen immer öfter bis an deren thermische Grenzen betrieben werden.

Vermeehrt wird auch versucht die thermischen Reserven im Kurzzeitbetrieb auszunutzen. Dies ist möglich, weil bestimmte elektrische Betriebsmittel, wie Transformatoren und Motoren, lange thermische Zeitkonstanten (bis zu einigen Stunden) besitzen. Andere Betriebsmittel, wie Kabel und Leitungen einschließlich deren Verbindungsstellen und Anschlusssteile, haben, bedingt durch ihren Aufbau und deren Materialeigenschaften, wesentlich kürzere Zeitkonstanten (wenige Minuten). Orientiert sich der Betrieb mit Überlast nur an jene Betriebsmittel, welche lange thermische Zeitkonstanten aufweisen, führt dies zu thermischen Überlastungen der Zuleitungen und Anschlussstellen.

Problematisch ist auch die thermische Überlastung von Schaltgeräten. In Schaltschränken werden oft sehr viele Schaltgeräte in geringen Abständen zueinander eingebaut. Dadurch werden die Kühlbedingungen wesentlich verschlechtert und die erzeugte Verlustwärme kann nicht mehr wirkungsvoll abtransportiert werden. Die Wärme überträgt sich auch auf die angeschlossenen Leiter und erwärmt diese zusätzlich. Durch Optimierung der Anschlussbedingungen und der Kühleigenschaften, kann diesem Problem gegengesteuert werden.

Aus technisch-wirtschaftlicher Sicht ist eine Berechnung der Leitertemperatur an jedem Leiter sowie an jedem Leitungsabschnitt, unter den gegebenen Wärmeübertragungs- und Kühlverhältnissen, nicht vertretbar. Um den Querschnitt des Stromleiters an den zu übertragenden Strom sinnvoll anzupassen, müssen besonders exponierte (d.h. aus wärmetechnischer Sicht ungünstige) Stellen näher betrachtet werden. Diese ungünstigen Stellen sind u.a. Kontaktstellen, Verbindungen zu Erzeugern als auch Verbrauchern, Bündelungen, Kreuzungen und Engstellen von mehreren Leitungen sowie Ecken und Bögen von Strombahnen. Dabei ist entscheidend, dass die zulässigen Grenztemperaturen bei Dauer- und Kurzzeitbelastungen nicht überschritten werden [4].

## 8 Grenztemperaturen elektrischer Leitungssysteme

Im Allgemeinen versteht man unter dem Begriff Stromtragfähigkeit, die Fähigkeit von Leiterbahnen und Kontakten den elektrischen Strom verlustarm und sicher zu führen [1]. Die Stromtragfähigkeit hängt jedoch von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Bei der Auslegung von Kabeln, Stromschienen und Leiterseilen, ist der wichtigste Faktor die Temperatur. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Grenztemperaturen, die im Dauerbetrieb und im Falle eines Kurzschlusses einzuhalten sind, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

### 8.1 Kabel

Bei der Auslegung von natürlich gekühlten Kabeln entscheidet, in erster Linie, die zulässige Leitertemperatur über die Kabelbelastbarkeit. Die höchstzulässige Temperatur der elektrischen Isolierung darf dabei nicht überschritten werden, da sonst mit einer Verschlechterung der Isolationseigenschaften und einer beschleunigten Alterung zu rechnen ist. In weiterer Folge wird die Belastbarkeit durch die Verlegeanordnung, den Verlegeort, die Kabelhäufung, die Umgebungstemperatur, den Kabelaufbau und durch etwaige Randbedingungen durch die Umgebung, wie z.B. Grenztemperaturen für Bodenaustrocknung, limitiert [12]. Tabelle 15 beinhaltet einige Richtwerte für Grenztemperaturen gängiger Isolierwerkstoffe.

**Tabelle 15: Zulässige Betriebs- und Kurzschlusstemperaturen gängiger Kabelisolierungen [69, 78]**

Isolierwerkstoff	Zulässige Betriebstemperatur am Leiter in °C	Zulässige Kurzschlussstemperatur in °C
PE	70-90	150
PVC bis 300 mm <sup>2</sup>	70	160
PVC über 300 mm <sup>2</sup>	70	140
PVC wärmebeständig	90	150
VPE, EPR (engl.: ethylene propylene rubber)	90	200-250
SIR (engl.: silicone rubber)	180	200-350
Weichlotverbindungen	-	160

Richtwerte für die Strombelastbarkeit, wie z.B. der zulässige Betriebsstrom oder die Kurzzeitstromdichte, sind gültigen Kabelnormen, wie der DIN VDE 0298-4 [79], oder den Herstellerangaben zu entnehmen.

## 8.2 Stromschienen

Die zulässige Dauertemperatur bei Stromschienen wird i.d.R. durch die Eigenschaften des Leiterwerkstoffes (z.B. mechanische Festigkeit) begrenzt [18]. Wert für die Dauerstrombelastbarkeit von Stromschienen aus Aluminium und Kupfer finden sich in den gültigen Normen (z.B. [80, 81]). Bei Stromschienen, liegt die untere Grenze für die Stromschientemperatur, falls nicht anders gefordert, bei 85 °C. Einige thermische Grenzwerte für Stromschienen, Verbindungen und Geräteanschlüsse, sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Dauertemperatur-Grenzwerte [19]

	Grenztemperaturen im Dauerbetrieb
<b>Dauertemperatur-Grenzwerte nach DIN 43670 und DIN 43671</b>	siehe Norm
<b>Stromschienenverschraubungen nach DIN 43673</b>	
oxidfrei und gefettet	ca. 120 °C
versilbert oder gleichwertig behandelt	ca. 160 °C
<b>Für Stützer und Durchführungen nach DIN EN 60168</b>	ca. 85 °C
<b>Für Geräteanschlüsse DIN EN 60694</b>	
blank	ca. 90 °C
versilbert	ca. 105 °C

## 8.3 Leiterseile

Bei Freileitungsseilen hat die Seiltemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Dehnung des Leiterseils und damit auch auf den Durchhang und die Seilzugkraft. Aber auch die Umgebungstemperatur, die Windgeschwindigkeit und die Eislast beeinflussen diese Größen. Richtwerte für die Dauerstrom- und die Kurzschlussstromerwärmung von blanken Leitern, sind in Tabelle 17 angegeben.

Tabelle 17: Technische Richtwerte für blanke Leiter [18, 19]

Leiterwerkstoff	Dauerstromerwärmung	Kurzschlussstromerwärmung
<b>Kupfer</b>	70-100 °C	200 °C
<b>Aluminium</b>	80-100 °C	180 °C
<b>Aldrey</b>	80 °C	180 °C
<b>TAL-Seil</b>	150 °C	250 °C
<b>Stahl</b>	80 °C	200 °C

## 8.4 Dauer- und Kurzschluss Temperaturen von Schaltgeräten und Kabeln

Hinsichtlich der Stromtragfähigkeit elektrische Anlagen und Betriebsmittel ist es wichtig, das thermische Verhalten von Stromleitern, Isolierungen und Kontaktstellen zu betrachten und auf einander abzustimmen. Liegt z.B. die Leitertemperatur über der Grenztemperatur des beteiligten Isolierstoffes, wird dieser unzulässig hoch beansprucht. Die Alterung, die durch die Einwirkdauer und der Höhe der Beanspruchung beeinflusst wird, erfolgt dadurch schneller. Folgen von Überbeanspruchungen sind Veränderungen der Materialeigenschaften und damit verbunden eine Minderung der Lebensdauer. In Tabelle 18 und Tabelle 19 sind typische Dauer- und Kurzschluss Temperaturen von Schaltgeräten und Kabeln aufgelistet.

**Tabelle 18: Thermische Belastung im Normalbetrieb**

	Schaltgeräte	Kabel
Leiter	~ 100 °C	> 70-90 °C
Isolierung	~ 100 °C	~ 70-90 °C
Kontakte	~ 100 (160 °C versilbert)	~ 100 °C

**Tabelle 19: Thermische Belastung im Kurzschlussfall**

	Schaltgeräte	Kabel
Leiter	~ 200 °C	> 150-200 °C
Isolierung	~ 200 °C	~ 150-250 °C
Kontakte	~ 200 °C	~ 200 °C

## 8.5 Thermische Isolierstoffklassen gemäß IEC 60085

Wie schon mehrfach erwähnt wurde, ist die Temperatur sehr oft der entscheidende Faktor für die Alterung von elektrotechnischen Betriebsmitteln, weil dadurch elektrische Isoliermaterialien (EIM) und elektrische Isoliersysteme (EIS) in Mitleidenschaft gezogen werden.

Ein elektrisches Isoliermaterial (EIM) ist laut [82] ein:

*„festes oder flüssiges Material mit unbedeutender elektrischer Leitfähigkeit oder eine einfache Kombination aus derartigen Materialien, die verwendet werden, um leitende Teile mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen in elektrischen Geräten zu trennen.“*

Ein elektrisches Isoliersystem (EIS) ist laut [82] eine:

*„isolierende Anordnung, die ein oder mehrere elektrische Isoliermaterialien (EIM) zusammen mit leitenden Teilen in einem elektrischen Gerät enthält.“*

Diesbezüglich lassen sich Temperaturen in international anerkannte thermische Grundklassen einteilen. Diese Klassen müssen einem elektrischen Isoliersystem auf Grundlage von Betriebserfahrungen oder Funktionsprüfungen zugeordnet sein. Die Bestimmung der Klassen basiert auf dem EIS ATE (EIS festgelegter thermischer Beständigkeitsindex) oder auf dem EIS RTE (EIS relativer thermischer Beständigkeitsindex) [82]. Tabelle 20 beinhaltet die Zuordnung der thermischen Klassen und deren Buchstabenbezeichnung.

**Tabelle 20: Thermische Klassenzuordnung [82]**

ATE oder RTE in °C		Thermische Klasse in °C	Buchstabenbezeichnung <sup>a</sup>
≥ 90	< 105	90	Y
≥ 105	< 120	105	A
≥ 120	< 130	120	E
≥ 130	< 155	130	B
≥ 155	< 180	155	F
≥ 180	< 200	180	H
≥ 200	< 220	200	N
≥ 220	< 250	220	R
≥ 250 <sup>b</sup>	< 275	250	-

<sup>a</sup>) Wenn es gewünscht wird, kann die Buchstabendarstellung in Klammern hinzugefügt werden, z.B. Klasse 180 (H). Wo nicht ausreichend Platz zur Verfügung steht, wie z.B. auf einem Schild, kann das Produktkomitee bestimmen, nur die Buchstabenbezeichnung zu verwenden.

<sup>b</sup>) Bezeichnungen für thermische Klassen über 250 müssen in Schritten von 25 ansteigen und entsprechend bezeichnet werden.

Die in Tabelle 20 angeführten thermischen Klassen entsprechen zahlenmäßig der empfohlenen maximalen Temperatur für das elektrische Isoliersystem unter Betriebsbedingungen, welche durch die Produktkomitees festgelegt werden [82].

## 9 Technische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen

Generell wird Energie in Windkraftanlagen (WKA) auf der Niederspannungsebene erzeugt, übertragen und geregelt. Dies bedeutet, dass die zu führenden Ströme hoch sind und dementsprechende Verluste generieren. Bei mittleren Leistungsklassen liegen die Betriebsströme im Bereich von 1 bis 3 kA. Die Höhe der Ströme richtet sich besonders nach der Auslastung der Anlage, welche wiederum stark von den volatilen Windverhältnissen abhängig ist. Vom Generator, der sich i.d.R. im Turm der Anlage befindet, bis zum Netzanschlusstransformator am Boden, liegt eine Übertragungsstrecke die über 100 m betragen kann. Zur Übertragung und Verteilung von Strom in WKA werden hauptsächlich Kupferkabel eingesetzt. Als Alternative dafür würden sich Stromschienen aus Aluminium anbieten. In Zusammenarbeit mit der Firma AMSC Windtec GmbH wurde die technische Anwendbarkeit von Schienenverteilssystemen in modernen Windkraftanlagen betrachtet. Des Weiteren wurden, im Vergleich zur herkömmlichen Verkabelung von verschiedensten Bereichen einer WKA, allgemeine Vor- und Nachteile einer Stromschienenvariante untersucht und aufgezeigt. Einleitend wird im folgenden Abschnitt ein Überblick über die aktuelle, weltweite Situation am Windenergiemarkt gegeben, bevor die technischen Aspekte dieser Thematik behandelt werden.

### 9.1 Aktuelle Situation am weltweiten Windenergiemarkt

Die Stromerzeugung aus Windkraft ist in den vergangenen 15 Jahren kontinuierlich angestiegen. Im Jahr 2010 betrug die weltweite installierte Leistung an Windkraft rund 197 GW. Regional betrachtet führt Europa mit 86 GW (44 %) installierter Leistung vor Asien mit 61 GW (31 %) und Nordamerika mit rund 44 GW (22 %) (siehe Abbildung 9.1). Besonders sticht hier der asiatische Markt hervor, der in den letzten 3 Jahren einen enormen Zuwachs auf diesem Sektor zu verzeichnen hatte. Mit 44,7 GW an installierter Windkraft, das sind 22,7 % der globalen installierten Leistung, führt die Volksrepublik China die Top 10 der Länderwertung an. Es ist ein regelrechter Boom zu erkennen, denn im Zeitraum von Jänner bis Dezember 2010 wurden dort knapp 50 % an neuer Leistung installiert. Prognosen für die nächsten 10 bis 20 Jahre gehen weltweit von einem stetigen Anstieg des Ausbaus der Windenergie aus. [55] Auf Grund dieser Aussichten werden zukünftig noch höhere Ansprüche an die Wirtschaft und an die technische Weiterentwicklung auf diesem Sektor gestellt.

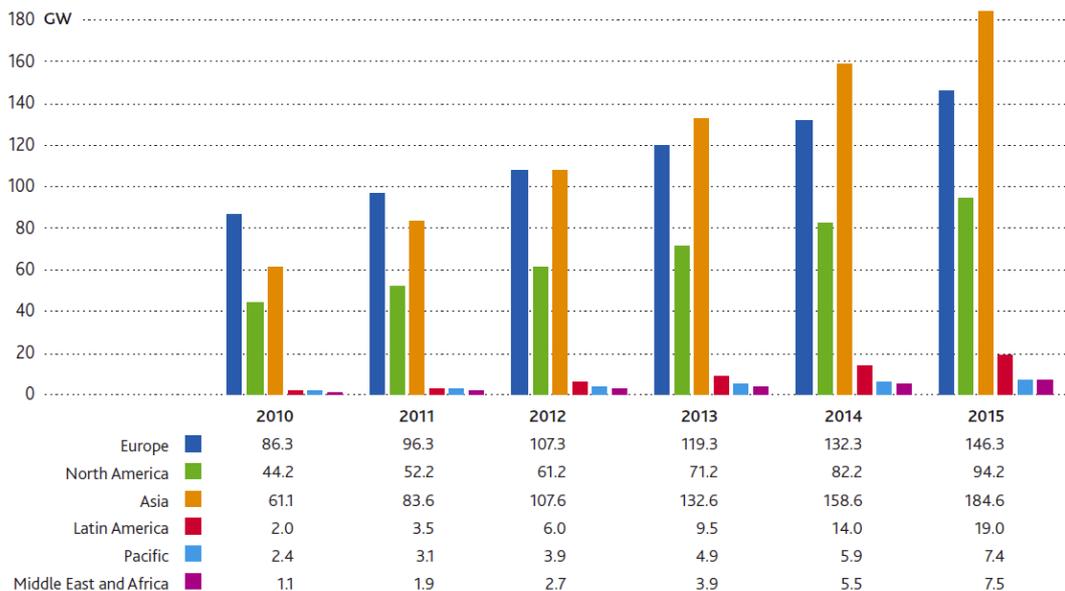


Abbildung 9.1: Kumulierte Marktprognose nach Regionen 2010 – 2015 [55]

## 9.2 Aufbau und Betriebseigenschaften von Stromschienensystemen

Schienenverteilsysteme werden für den Transport und für die Verteilung von Strömen im industriellen und gewerblichen Bereich und in der Gebäudetechnik eingesetzt. Erhältlich sind diese Systeme für kleine, mittlere und große Leistungsbereiche. Als Leiterwerkstoff wird in Stromschienensystemen Kupfer oder Aluminium verwendet. Meist werden die Leiter verzinkt und/oder vernickelt um eine Oberflächenveredelung zu erreichen. Durch die Versilberung von Kontaktstellen, können die Kontakteigenschaften an Abgangspunkten zusätzlich verbessert werden. Gängige Schienensysteme werden in einzelnen, typgeprüften Segmenten angeboten und entsprechen geltenden Normen, wie z.B. DIN EN 60439-1 (*Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 1: Typgeprüfte und partiell typgeprüfte Kombinationen*) und DIN EN 60439-2 (*Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 2: Besondere Anforderungen an Schienenverteiler*). Die Produktpalette umfasst neben geraden Schienenkästen, dessen Länge je nach Hersteller und Leistungsklasse variiert, noch über Richtungsänderungselemente, Anschlussstücke, Kabelanschlussboxen, Brandabschottungen, Abgangs- und Kuppelkästen, bis hin zu diversen Zusatzausrüstungen. Die Wahl der Schutzklasse ist generell von den Anforderungen und den Umgebungsbedingungen am Einsatzort abhängig. Die Anzahl und Ausführung der Schienen (Phasen-, Neutral- und Schutzleiter) richten sich nach den Betriebsbedingungen die u.a. von der Netzform, der Schutzart, dem Betriebsstrom, dem Kurzschlussstrom und vorherrschenden Oberschwingungsströmen abhängig sind [56, 57, 58, 61].

Die blanken Leiter werden häufig mit einem wärmebeständigen Isoliermedium aus PVC, Fieberglass [59], Epoxid oder speziellen Kunststoffen umgeben, aneinander gereiht und in ein Gehäuse eingebaut. Bei manchen Systemen werden die einzelnen Schienen mit Epoxidharz vergossen und ausgehärtet [60]. Die vorgefertigten Schienensegmente werden mit speziellen Bolzen verbunden und anschließend verschraubt. Durch diese kompakte Bauweise haben Stromschienen eine hohe Kurzschlussfestigkeit, da es hier nur wenige Angriffspunkte für mechanische Verformungen, durch die elektromagnetischen Kräfte, gibt. Des Weiteren wird, durch die sandwichartige Bauweise, der Wärmetransport (Querleitung) vom Inneren der Leiteranordnung zur Oberfläche begünstigt, da es keine wärmeisolierenden Lufträume zwischen den Leitern gibt [61].

Das Gehäuse der Stromschienen besteht meist aus verzinktem, gestrichenem Stahlblech oder aus Aluminiumprofilen. Es dient der konstruktiven Leiterführung, dem Schutz gegen atmosphärischen Einwirkungen von außen (Feuchtigkeit, Staub, chemische Substanzen, Verschmutzungen) und trägt zur mechanischen Festigkeit der Leiter bei. Durch die enge Bauweise und die große Fläche, wirkt das Gehäuse wie ein großer Kühlkörper über den die Leiterwärme wirksam an die Umgebung abgeführt werden kann. Dadurch werden die Kühleigenschaften der Stromschienen unterstützt. Wird das Gehäuse aus Aluminium gefertigt, kann es auch als PE-Leiter verwendet werden, was wiederum Gewicht und Kosten einspart [57, 58, 62].

Zum Punkt elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist zu sagen, dass die meisten Anbieter ihre Produkte auch mit hochwirksamer magnetischer Abschirmung anbieten, welche die NISV (Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung) einhalten bzw. erfüllen. Die möglichst klein gehaltenen Abstände zwischen den Leitern, als auch der kompakte Schienenaufbau aller kombinierbaren Module, minimiert die Magnetfeldabstrahlung und verhindert örtlich erhöhte Strahlungswerte [64].

Ausdehnungen der Stromschienen, die durch die Verlustwärme entstehen, werden durch s.g. Dehnungsausgleichselemente, die in definierten Abständen in den Schienenkästen eingebaut sind, kompensiert.

Ein wesentlicher Aspekt, der für den Einsatz von Schienenverteilsystemen spricht, ist die Betriebskontinuität. Es besteht die Möglichkeit Verbraucher jederzeit, sicher unter Spannung an das bestehende System anzuschließen oder abzutrennen. Somit entstehen bei Umbauten nur wenige bis keine Versorgungsunterbrechungen und Wartungszeiten werden dadurch stark reduziert. Durch die modulare, ortsungebundene Bauweise, lassen sich Erweiterungen der Schienenführung einfach realisieren und Elemente an anderen Stellen wieder einbauen [63].

Ein weiterer bedeutender Vorteil von Schienenverteilsystemen sind die geringen Installationskosten. Laut eigenen Angaben von verschiedenen Herstellern verringert sich die Montagezeit bei Stromschienen, gegenüber traditionellen Kabelinstallationen, um mehr als 50 % [63] und die Gesamtinstallationskosten um 20 bis 30 % [58]. Diese Werte sind aber mit Vorsicht zu genießen, weil sich der Installationsaufwand immer nach den vorherrschenden Gegebenheiten, dem eingesetzten Material und den praktischen Fähigkeiten des Montagepersonals richtet.

### **9.3 Praktische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen**

In den folgenden Abschnitten wird auf die technischen Anforderungen, die auftretenden Betriebseigenschaften und die praktische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen, im Vergleich zu Kabelsystemen, in Windkraftanlagen näher eingegangen.

#### **9.3.1 Verlustleistung bei Kabel und Stromschienen**

Für Anlagenbetreiber wird die, im Betrieb entstehende, Verlustleistung und der dadurch verringerte Energieertrag zu einem immer wichtigeren Thema. In Windkraftanlagen ist eine Vielzahl von Kabeln mit teils großen Längen installiert, in denen Leitungsverluste entstehen. In einigen Bereichen einer WKA, speziell in der Gondel, gibt es meist nur geringen Platz, weshalb viele Kabelstränge gebündelt werden müssen. Durch diese Art der Leitungsführung beeinflussen sich die Kabel gegenseitig, elektrisch und thermisch. Wirbelströme und harmonische Oberwellen generieren zusätzliche Leitungsverluste und die Wärmeabfuhr der einzelnen Kabel wird durch die Anhäufung verringert. Die zulässige Strombelastbarkeit bei tatsächlichen Betriebsbedingungen, unter Einhaltung der maximalen erlaubten Leitererwärmung, bei vereinbarten Betriebsbedingungen, wird durch die Verlegebedingung und die Umgebungsbedingungen am Einsatzort teilweise deutlich reduziert. Dies hat zur Folge, dass Leitungen in der Praxis oft überdimensioniert werden, um die, in gültigen Normen festgelegten, Belastbarkeiten einzuhalten. Der Einsatz von größeren Querschnitten würde die Anzahl der notwendigen Kabel verringern, jedoch sind diese nicht mehr so flexibel, haben größere Biegeradien und lassen sich schwerer verlegen. Aus diesem Grund werden Leiterquerschnitte über  $185 \text{ mm}^2$  kaum für die Verkabelung von WKA eingesetzt. Durch den Einsatz von Stromschienen könnte hier viel Platz und Gewicht eingespart werden. Das Temperaturverhalten, die Reduktionsfaktoren oder die

Kurzschlussströme richten sich nach dem jeweiligen Datenblatt und sind nicht von der Verlegeanordnung bzw. der Häufung abhängig [64].

Anhand des folgenden Beispiels soll gezeigt werden, wie sich die Stromtragfähigkeit von gebündelten Leitern bestimmen lässt und wie viel der verfügbaren Kapazität tatsächlich genutzt werden kann.

Die Strombelastbarkeit bei vereinbarten Betriebsbedingungen (Bemessungswert)  $I_r$  einer PVC-isolierten, wärmebeständigen, einadrigen Kupferleitung mit einem Nennquerschnitt vom  $185 \text{ mm}^2$  frei in Luft verlegt, bei einer Umgebungstemperatur von  $30 \text{ °C}$  beträgt nach gültiger Norm DIN VDE 0298-4:2003-08 [79] 448 A. Über drei dieser Kabel könnte somit, bei einer symmetrischen Aufteilung, theoretisch ein Strom von 1344 A übertragen werden, ohne die zulässige Betriebstemperatur am Leiter ( $90 \text{ °C}$ ) zu überschreiten. Werden nun die Kabel vertikal aneinandergereiht, auf einer gelochten Kabelwanne verlegt und bei einer Umgebungstemperatur von  $50 \text{ °C}$  betrieben (entspricht den typischen Betriebsbedingungen der betrachteten Windkraftanlage), müssen die entsprechenden Umrechnungsfaktoren berücksichtigt werden. Diese betragen für die Verlegeanordnung (Häufung)  $f_H = 0,96$  und für die Umgebungstemperatur  $f_U = 0,82$ . Somit reduziert sich der übertragbare Strom pro Leiter auf rund 353 A und die nutzbare Übertragungskapazität sinkt um ca. 20 %.

$$I_{zul} = I_r \cdot f_H \cdot f_U = 448 \text{ A} \cdot 0,96 \cdot 0,82 = 352,6 \text{ A} \quad (9.1)$$

Bei Installationen mit einem hohen Kabelaufwand können somit deutliche Mehrkosten entstehen, da hier eine große Anzahl an Kapazitäten nicht genutzt werden.

Anhand eines weiteren Berechnungsbeispiels, wurden die entstehenden Stromwärmeverluste für eine Kabel- sowie eine Stromschieneninstallation berechnet und verglichen. Betrachtet wurde eine Strecke von 100 m, welche den Übertragungsweg zwischen dem Generator in der Gondel und dem Netzanschlusstransformator am Boden repräsentieren soll. Die WKA hat eine angenommene Nennleistung von 2000 kW, bei einer Nennspannung von 690 V und einem Leistungsfaktor von 0,95. Der zu führenden Nennstrom pro Phase beträgt 1761 A. Bei dem eingesetzten Kabel handelt es sich um ein flexibles Kabel mit hoher Hitzebeständigkeit, dessen Isolierung und Mantel aus synthetischem Elastomer besteht [65]. Der Kabelquerschnitt beträgt  $185 \text{ mm}^2$  und die Umgebungstemperatur wurde mit  $55 \text{ °C}$  angenommen. Die Kabelstränge sind zu Dreierbündel zusammengefasst und im festen Abstand zueinander (doppelter Kabeldurchmesser), vertikal an der Turmwand installiert. Die Bestimmung der maximalen Stromtragfähigkeit der einzelnen Kabel, entspricht geltender Norm [79]. Bei dem betrachteten Stromschienensystem handelt es sich um den Typ LDA5413/2 von SIEMENS [56]. Die Montage erfolgt ebenfalls vertikal entlang des Turms. Die spezifischen Werte für

das Kabel und die Stromschiene wurden aus den jeweiligen Datenblättern der Hersteller entnommen.

Abbildung 9.2 zeigt die erzeugte Verlustleistung in Abhängigkeit der Auslastung der Windkraftanlage. Die Stromschiene erzeugt rund 50 % mehr Verluste, was sicherlich auf die schlechtere Leitfähigkeit des Aluminiums zurückzuführen ist. Im Nennpunkt (100 %) beträgt die Differenz 8,86 kW. Bei einer Auslastung von 60 % ist die Differenz nur noch 3 kW. Im Jahresdurchschnitt (8,5 m/s Durchschnittswindgeschwindigkeit und 3000 Betriebsstunden bei 60 % Auslastung) würde dies, bei einem Einspeisetarif von 0,07 €/kWh, Einbußen von 630,- € bedeuten. Um jedoch eine fundierte Aussage über die Kosten für die Verlustleistung treffen zu können, muss diese über das ganze Jahr bzw. über die gesamte Lebensdauer, unter realen Betriebsbedingungen, berechnet werden.

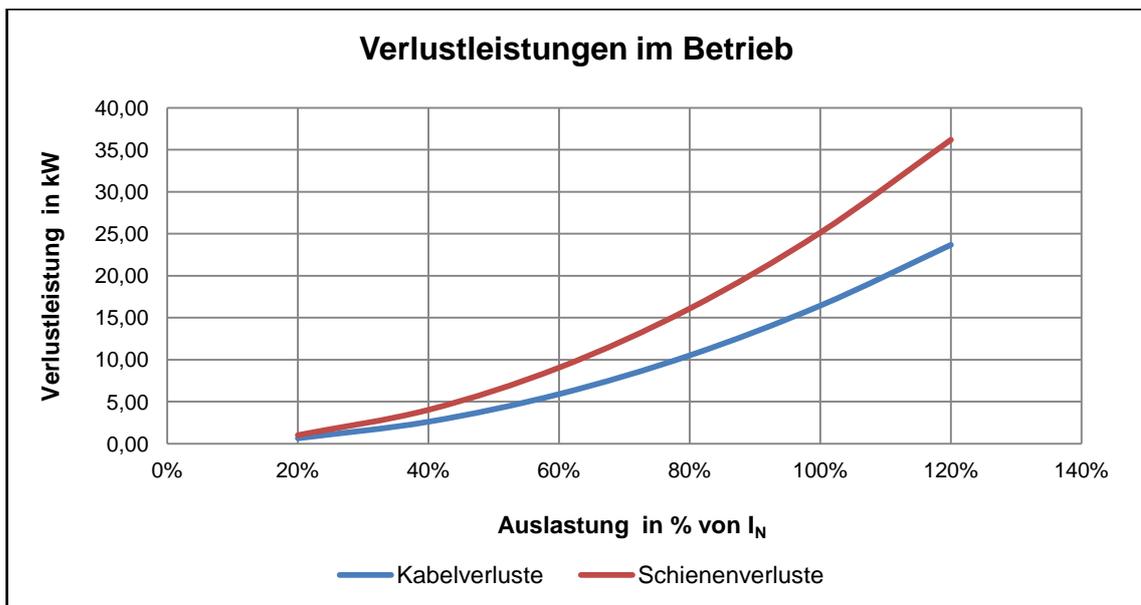


Abbildung 9.2: Verlustleistungsbetrachtung im Vergleich Kabel vs. Stromschiene

### 9.3.2 Montage, Verlegung, Platzverbrauch und Wartung

Im Vergleich zu Verkabelungen, ist die Verlegeanordnung von Stromschienen deutlich übersichtlicher und der Montageaufwand geringer, weil die Schienensysteme in Modulen vorgefertigt geliefert werden und vor Ort nur noch zusammengesetzt und befestigt werden müssen. Moderne Türme für WKA werden aus einzelnen Turmsegmenten, die vor Ort montiert werden, errichtet. Eine Vormontage der Stromschienen, in diesen Bauteilen, ist gut möglich, wodurch bei der Endmontage erheblich Zeit eingespart werden könnte. Die Montage der Schienensysteme am Boden bringt im Gegensatz zur nachträglichen

Verkabelung, in fertig errichteten Anlagen, einige Vorteile mit sich. So müssten lange, schwere Kabelstränge nicht über viele Meter im Inneren des Turms hinaufgezogen werden um dort, auf oft engen Raum, montiert zu werden. Auch auf Grund des geringen Platzbedarfs in vielen Bereichen einer Windkraftanlage, kann durch den Einsatz von Stromschienen, je nach Schientyp und Verlegeanordnung, eine Platzersparnis von 50-70 % erreicht werden.

Kommt es auf Grund von Fehlern im Material oder durch Einwirkungen von außen zu Ausfällen von Kabeln oder ganzen Kabelsträngen, muss die fehlerhafte Kabelstrecke i.d.R. über die gesamte Länge getauscht werden. An Verbindungsstellen von Kabeln werden Muffen eingesetzt, an denen es zu zusätzlichen elektrischen Verlusten kommt. Auch Kabelschuhe die zum Anschluss der Kabel an andere Betriebsmittel dienen, sind oft eine konstruktive Schwachstelle und erwärmen sich sehr stark im Betrieb. Fehlerhafte oder defekte Stromschienenelemente können hingegen relativ rasch und ohne großen Aufwand getauscht werden. Durch die praktisch wartungsfreien, großflächigen Verbindungs- und Anschlusselemente wird ein möglichst verlustarmer Stromfluss ermöglicht.

### **9.3.3 Wahl der Schutzklasse**

Die Schutzklasse des eingesetzten Schienensystems ist stark von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen am Einsatzort abhängig. Je niedriger die Schutzanforderungen an die Stromschienen sind, desto günstiger kann die Ausführungsvariante ausfallen. Hierbei sind jedoch einige Überlegungen bezüglich dem Standort der Anlage (on-shore, off-shore), der Personensicherheit (Berührungsspannungen), der Bedingungen während dem Transport und der Montage bis hin zur Fertigstellung und Inbetriebnahme (Feuchtigkeit, Temperatur, Verschmutzung, u.v.m.) sowie der Bedingungen während des Betriebs (vorherrschendes Klima, Bildung von Kondenswasser, Vibrationen, Erschütterungen, u.v.m.) anzustellen.

### **9.3.4 Mechanische Belastungen im Betrieb**

Ein weiterer relevanter Punkt ist die mechanische Festigkeit des eingesetzten Übertragungsmediums. Kabel sind durch ihre hohe Flexibilität gegen Verbiegung und Torsion bis zu gewissen Grenzen unempfindlich. Stromschienen hingegen sind starre, kompakte und eher unflexible Gebilde, die zwar robust und widerstandsfähig, dennoch wesentlich anfälliger für mechanische Spannungen sind. Eine sich im Betrieb befindliche Windkraftanlage ist ständig wechselnden mechanischen Belastungen, wie Biegungen, Schwingungen und Vibrationen, ausgesetzt. Die Turmauslenkung an der Spitze kann je nach

Windstärke, Turmhöhe und Windausbeute 0,5 bis 1 Meter betragen. Die damit verbundenen mechanischen Spannungen in den Stromschienen dürfen deren Betriebseigenschaften und deren mechanische Festigkeit nicht unzulässig beeinflussen. Die Anforderungen an Stromschienen in WKA sind deshalb z.T. viel unterschiedlicher, als jene die in industriellen oder öffentlichen Gebäuden vorherrschen und somit dementsprechend zu evaluieren.

#### 9.4 Kostenvergleich

Ein wichtiger Faktor bei der Wahl des eingesetzten Übertragungsmediums ist u.a. der Materialpreis. Der Rohstoffpreis von Kupfer hat sich im Zeitraum von Jänner 2009 bis Juli 2011 knapp um das 3-fache erhöht, hingegen stieg der Preis für Aluminium im selben Zeitraum nur um das 1,6-fache an. Aktuell kostet eine Tonne Kupfer ca. 3,4-mal so viel wie eine Tonne Aluminium (Stand Oktober 2011). Der stetige Anstieg des Kupferpreises, der auf die globale Wirtschaftslage zurückzuführen ist, wird sich laut Prognosen auch in der nahen Zukunft nicht so schnell abflachen [29]. Durch den geringen Rohstoffpreis haben Stromschienen aus Aluminium gegenüber vergleichbaren Kabelvarianten aus Kupfer einen deutlichen Kostenvorteil.

Entscheidend für die Höhe der Gesamtkosten sind, neben den Materialkosten, auch die Installations- und Montagekosten. Die Montage von Stromschienen ist im Vergleich mit Kabelinstallationen deutlich schneller und einfacher. Das dadurch erzielbare Kosteneinsparungspotential, hängt jedoch besonders von der Größe und der Leistung der Anlage ab. Entscheidend sind auch die Arbeitskosten des Montagepersonals. Diese sind in westlichen Industrieländern im Durchschnitt 5 bis 15-mal höher als jene in Niedriglohnländern. Allerdings sind in den letzten Jahren auch in diesen Ländern deutliche prozentuale Anstiege der Lohnkosten erkennbar [66, 67]. Der Standort der Anlage wirkt sich somit indirekt auch auf die Montagekosten aus.

Das Gesamtgewicht einer Stromschiene liegt, wegen des vergleichbar geringen Gewichts von Aluminium, weit unter dem von Kupferkabeln. Dadurch kann auch beim Transport Gewicht und Geld eingespart werden.

Im fernöstlichen Raum stehen zurzeit die möglichst geringen Anschaffungskosten einer Windkraftanlage im Vordergrund. Merkmale wie Verlustleistung, Montage- und Wartungskosten, Lebensdauerkosten oder die Verfügbarkeit einzelner Komponenten spielen in westlichen Ländern eine weitaus wichtigere Rolle. Die Lebensdauer, die Zuverlässigkeit und die Energieausbeute sind Kernthemen im Energieerzeugungssektor. Sie sagen viel über die Qualität einer solchen Anlage aus.

Um eine grobe Abschätzung über die Kostenverteilung zwischen Kabel- und Stromschieneninstallationen zu erhalten, wurden auf Basis der Materialdaten (siehe Berechnungsbeispiel in Abschnitt 9.3.1), die Material- sowie die Montagekosten ermittelt. Die Materialkosten sind in diesem Vergleich nur Annahmen und stützen sich auf Kosten für vergleichbare Anwendungen. Für die Berechnung der Rohstoffkosten, wurden die durchschnittlichen Börsenpreise, Stand August 2011, verwendet [68]. Zur Berechnung der Montagekosten wurden fiktive Arbeitszeiten und Stundenlöhne herangezogen, um lediglich eine Abschätzung dieses Kostenpunktes zu erreichen. Die folgenden Ergebnisse repräsentieren lediglich einen groben, prozentualen Überblick der einzelnen Kostenstellen.

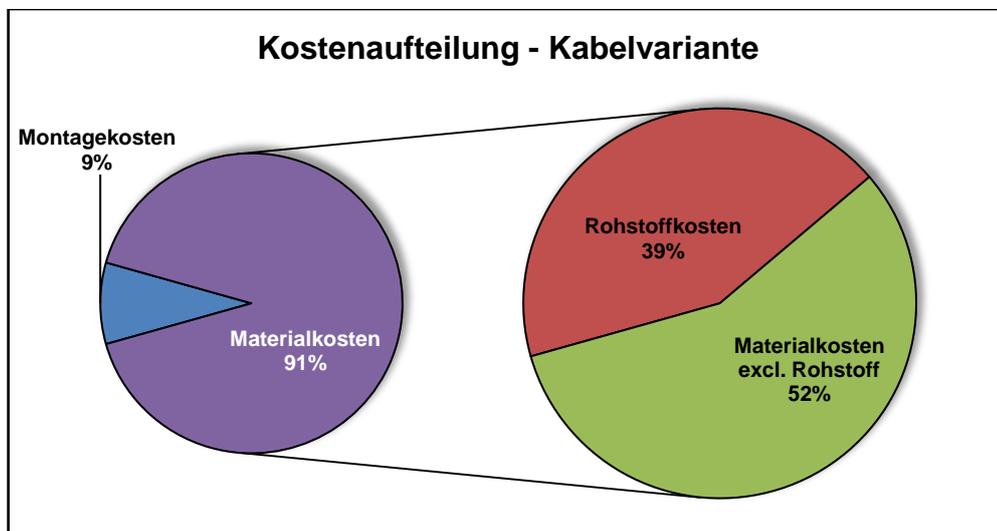


Abbildung 9.3: Kostenaufteilung der Kabelvariante

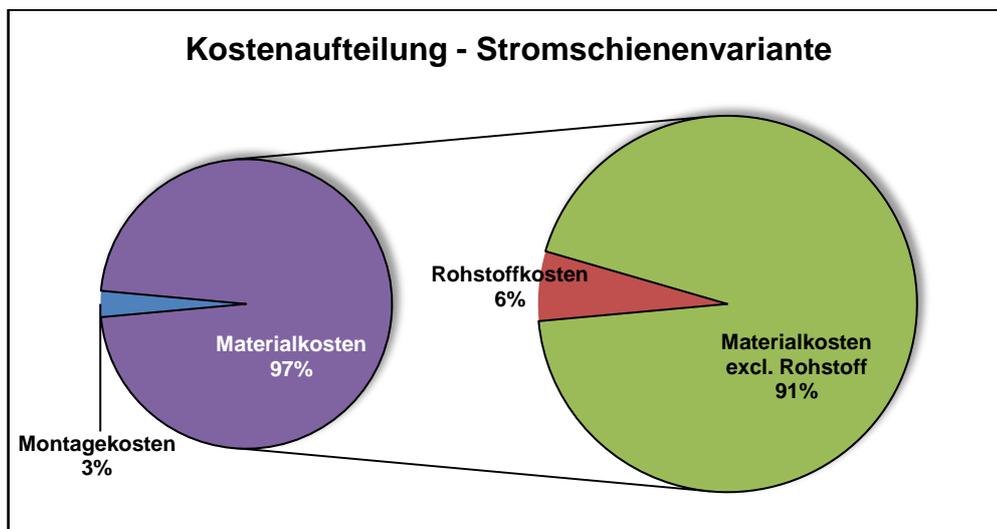


Abbildung 9.4: Kostenaufteilung der Stromschienenvariante

Aus Abbildung 9.3 und Abbildung 9.4 ist deutlich zu erkennen, dass die Montagekosten nur einen sehr kleinen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Die Rohstoffkosten bei Kabeln betragen ca. 30-40 % der gesamten Kabelkosten. Der Rohstoffpreis fällt bei den Stromschienen nicht so sehr ins Gewicht, wodurch Preisschwankungen an den Börsen keinen starken Einfluss auf den Gesamtpreis haben sollten.

## 9.5 Allgemeine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Kabel und Schienenverteilsystemen

Abschließend werden in den folgenden zwei Abschnitten einige allgemeine Vor- und Nachteile von Kabel und Schienenverteilsystemen aufgelistet [64, 70].

### 9.5.1 Vor- und Nachteile von Kabelsystemen

#### Vorteile:

- Gut bekannte und etablierte Technologie.
- Große Produktpalette und sehr viele Anbieter am Markt.
- Sehr gute Verfügbarkeit.
- Widerstandsfähig gegen mechanische Beanspruchungen und atmosphärische Einflüsse.

#### Nachteile

- Häufig sind bei Kabelinstallationen mechanische Zusatzkonstruktionen, wie Kabelwannen, -priesen oder -rohre, erforderlich. Schwere Kabel benötigen wegen ihres großen Eigengewichts viele zusätzliche Befestigungspunkte, was eine Steigerung der Material- und Montagekosten sowie der Montagezeit zur Folge hat.
- Die Verlegung bzw. die Handhabung von schweren Kabeln mit großen Durchmessern ist oft sehr mühsam und wird durch enge Räumlichkeiten zusätzlich erschwert.
- An Einspeisepunkten entstehen oft große Kabelanhäufungen, wodurch die Installation unübersichtlich wird.
- Besonders an Kabelhäufungen und starken Biegungen kann sich die Beschaffenheit und die Form der Kabelisolierung, durch thermische und mechanische Belastungen, verändern und verschlechtern. Dadurch wird der Homogenitätsgrad der Isolierung beeinflusst.

- Kabel benötigen bei der Verlegung oft sehr viel Platz und größere Radien.
- Die Strombelastbarkeit von Kabel ist wesentlich von der Kabelhäufung, der Verlegungsart und der Umgebungstemperatur abhängig.
- Bei der Verwendung von mehreren Parallelkabeln ist darauf zu achten, dass alle eingesetzten Kabel dem gleichen Typen entsprechen und die Längen nicht stark variieren. Auch die Stromaufteilung sollte gleichmäßig sein, um unsymmetrische Belastungen zu vermeiden.
- Relativ hohe elektromagnetische Beeinflussung bei paralleler Verlegung.
- Unsachgemäß verlegte oder nicht ausreichend befestigte Kabelbahnen können durch die starken elektrodynamischen Kurzschlusskräfte beschädigt werden.
- Während Wartungs- oder Umbauarbeiten kommt es auf Grund von notwendigen Abschaltungen zu Versorgungsunterbrechungen.
- Erweiterungen und Umbauten bestehender Trassen sind nur schwer bis gar nicht realisierbar.
- Hoher Kabelpreis durch steigende Rohstoffkosten.
- Aufwändiges Spleißen und Muffen bei der Zusammenführung von Kabeln.
- Teils große Brandlast durch den hohen Anteil an brennbarem Isoliermaterial.
- Hoher Aufwand bei der Fehlersuche.

### 9.5.2 Vor- und Nachteile von Schienenverteilsystemen

#### Vorteile:

- Einfachere Planung und Projektierung durch Einbeziehung von EDV-gestützten Planungstools.
- Geringerer Installationsaufwand (weniger Montagematerial und Hilfsmittel, geringere Montagezeit).
- Durch linienförmigen Netzaufbau sehr übersichtlich.
- Hohe Lebensdauer und wartungsarm.
- 30-40 % leichter als vergleichbare Kabelinstallationen (Aluminiumstromschienen).
- Optimale Raumausnutzung: Eine Schiene kann eine Vielzahl von Kabeln ersetzen; Hohe Flexibilität durch die breite Palette an Richtungsänderungs- und Anschlusselementen; 50-70 % Platzersparnis.
- Geringe gegenseitige elektromagnetische Beeinflussung sowie gute EMV-Werte durch die Kompaktbauweise und das abschirmenden Gehäuse.

- Wartungsarbeiten an den Schienensystemen sind unter Last möglich, somit entstehen keine Versorgungsunterbrechungen für angeschlossene Verbraucher.
- Geringere Brandlast, da wenig brennbare Isolierung vorhanden ist.
- Durch die modulare Bauweise können Schienensysteme gut ausgebaut, verändert und wieder abgebaut werden. Eine Wiederverwendung an einem anderen Ort ist möglich.
- Gute Kurzschlussfestigkeit durch kompakten Aufbau.
- Geringer Aufwand bei der Fehlersuche.
- Höhere Strombelastbarkeit als bei Kabel, da die Wärmeverluste besser abtransportiert werden können.

#### Nachteile:

- Noch nicht sehr viele Langzeiterfahrungen bei bestimmten Anwendungen.
- Geringerer Temperaturbereich → Umgebungstemperatur, gemäß DIN EN 60439-1 und -2, maximal +40 °C und +35 °C im 24-Stunden-Mittel.
- Nicht so flexibel wie Kabel → mechanische Spannungen.
- Durch die enge Anordnung und die damit verbundene magnetische Kopplung, der einzelnen Schienen im Gehäuse, kommt es zu unsymmetrischen Belastungen der Leiter (ungleichmäßige Stromdichteverteilung).

## 9.6 Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Stromschienensysteme für den Einsatz in vielen Bereichen einer Windkraftanlage sehr gut eignen und teilweise besser abschneiden als eine vergleichbare Kabelvariante. Vorteile sind eindeutig bei den Rohstoff- und Montagekosten, den Platz- und Gewichtseinsparungen und der Strombelastbarkeit zu erkennen. Nachteilig sind die etwas höheren Verluste und die teuren Systemkosten. Denkbar ist, dass sich diese bei einer geeigneten Wahl der Schutzklasse und einem entsprechenden Auftragsumfang verringern lassen. Da es auf diesem Sektor noch sehr wenig Langzeiterfahrungen gibt, ist eine ganzheitliche Evaluierung und Konzipierung notwendig.

Schienenverteilsysteme haben sich breites in vielen industriellen und öffentlichen Anwendungen, als auch im Energieerzeugungssektor, für die Verteilung von Strom gut bewährt und stellen somit eine sehr gute und effiziente Alternative zu den immer teurer werdenden Energiekabel dar.

## 10 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die strombedingten thermischen als auch die mechanisch-dynamischen Beanspruchungen an elektrischen Betriebsmitteln und Anlagen aufgezeigt und dargestellt. Es wurde das Verhalten von Leiter-, Isolations- und Kontaktwerkstoffen bei Dauer- und Kurzzeitstrombelastungen beschrieben und deren Folgen auf das Betriebsverhalten geschildert. Die in elektrischen Leitern generierten Stromwärmeverluste tragen größtenteils zur Erwärmung elektrischer Betriebsmittel bei. Die stationäre Endtemperatur des Stromleiters ergibt sich aus den materialabhängigen Stromwärmeverlusten ( $\sim I^2 \cdot R$ ) und den Kühlungsverhältnissen. Thermische Langzeitstrombelastbarkeit charakterisiert sich u.a. durch:

- ausreichend langsame Veränderungen der Werkstoffeigenschaften,
- ausreichend niedrige Gitterschwingungen in Leiterwerkstoffen,
- ausreichend niedrige Ausscheidung von Additiven aus Isolierwerkstoffen,
- ausreichend niedrige Fremdschichtbildung auf Kontaktflächen.

Unzulässig hohe Temperaturen verändern die Werkstoffeigenschaften und beeinflussen das Betriebsverhalten. Die Grenztemperatur im Dauerbetrieb wird demnach durch die temperaturbedingten Materialveränderungen bestimmt. Als allgemein gültigen Grenzwert kann 100 °C angenommen werden.

Da die Belastungsdauer bei Kurzzeitstrombelastungen sehr gering ist, entsteht dabei eine adiabatische Erwärmung, wodurch sich keine stationäre Leitertemperatur einstellt. Entscheidend für die Kurzzeiterwärmung sind die umgesetzte Verlustleistung  $I^2 \cdot R$ , die Kurzdauer und das thermische Verhalten des Werkstoffes.

Die hohe, kurzzeitige thermische Beanspruchung durch Fehler- oder Schaltströme führt zu intensiven Gitterschwingungen im Leiter, wodurch es zu deutlichen Gefügeänderungen im Werkstoff kommt. Die starke Erwärmung beeinflusst auch Isolierungen (Erweichung, Verformung, Rissbildung, u.v.m.) und Kontakte (z.B. Fremdschichtbildung und Materialabbrand). Die Grenztemperatur bei Kurzzeitstrombelastungen wird durch die spontanen Werkstoffveränderungen bestimmt und liegt bei Leiterwerkstoffen im Bereich von 200 bis 250 °C, bei Isolierstoffen zwischen 140 und 250 °C und bei Kontaktwerkstoffen um die 200 °C.

Neben den thermischen Beanspruchungen werden Betriebsmittel auch mechanisch-dynamisch beansprucht. Zu den nicht elektrisch verursachten mechanischen Langzeitbelastungen zählen u.a. die Verringerung der Kontaktdruckkraft und die Seilzugkräfte.

Die Wärmedehnung stellt hingegen eine indirekt elektrisch verursachte Belastung dar und ist ebenso zu berücksichtigen. Hohe kurzzeitige Ströme, v.a. die Kurzschlussströme, entwickeln enorme elektrodynamische Kräfte proportional dem Quadrat des elektrischen Stroms. Diese wirken auf biegesteife Leiter als Querkraft und erzeugen dadurch mechanische Spannungen im Werkstoff. Übersteigt die Kraftwirkung bestimmte mechanische Belastbarkeitsgrenzen, können irreversible plastische Verformungen zurückbleiben. Auf biegsame Leiter wirken die Stoßkräfte indirekt, indem sie zu Seilzugkräften (Fall- und Bündelleiterseilzugkräfte) führen. Ebenfalls werden Stützpunkte, Verbindungsmittel, Isolatoren und Stahlbauten durch die Kraftwirkung der Kurzschlussströme beansprucht.

Allgemein kann festgehalten werden, dass das Produkt aus Belastungshöhe und Einwirkdauer eine Alterung bzw. Lebensdaueränderung bewirkt. Durch die Tendenz Betriebsmittel immer näher an deren Stromtragfähigkeitsgrenze zu betreiben oder Investitionen in Material und Platz zu verringern, werden stille Reserven abgebaut. Diese thermischen und mechanischen Reserven fehlen dann im Fehlerfall und können dadurch das Betriebsmittel und den Personenschutz gefährden.

In Zusammenarbeit mit der Firma AMSC Windtec GmbH wurde die technische Anwendbarkeit von Stromschienensystemen in Windkraftanlagen analysiert. Hintergründe für diese Untersuchung waren einerseits der Platzmangel in vielen Bereichen von Windkraftanlagen und die steigenden Rohstoffpreise für Kupfer, andererseits die Betrachtung der Betriebseigenschaften und die Anwendbarkeit von Kupfer- aber auch Aluminium-Schienenverteilssystemen unter speziellen betrieblichen Anforderung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sprechen vermehrt für den Einsatz von Stromschienensystemen. Im Vergleich zu Kabelinstallationen, können damit viel Platz, Gewicht und Kosten eingespart werden, der Installationsaufwand verringert und die Strombelastbarkeit gesteigert werden. Dem gegenüber stehen allerdings sehr wenig Langzeiterfahrungen und stärkere mechanische Belastungen als bei Kabelinstallationen. Weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet sind sicherlich sehr erstrebenswert, weil der Einsatz von Schienenverteilssystemen eine sehr effiziente und sichere Alternative zu gebräuchlichen Kabelinstallationen ist und die Erzeugung von Strom aus Windkraft einen immer höheren Stellenwert in der Energiewirtschaft erhält.

## 11 Literatur

- [1] Schufft W.: „*Taschenbuch der elektrischen Energietechnik*“, Carl Hanser Verlag, München, 2007, ISBN 978-3-446-40475-5
- [2] Böhme H.: „*Mittelspannungstechnik*“, Verlag Technik, Berlin, 2005, ISBN 3-341-01495-0
- [3] Lindner H., Brauer H., Lehmann C.: „*Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*“, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München Wien, 1999, ISBN 3-446-21056-3
- [4] Winkler G.: „*VEM-Handbuch Hochstromtechnik*“, Verlag Technik, Berlin, 1987, ISBN 3-341-00305-3
- [5] Weickert F.: „*Hochspannungsanlagen*“, Fachbuchverlag, Leipzig, 1959, Lizenznummer 114-210/79/59
- [6] Löbl H.: „*Stromverdrängung in elektrischen Leitern*“, Praktikum Hochspannungsgeräte, Technische Universität Dresden, IEEA, [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_elektrotechnik\\_und\\_informationstechnik/ieeh/studium/hauptstudium/elektroenergietechnik/hochspannungsgeraete](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_elektrotechnik_und_informationstechnik/ieeh/studium/hauptstudium/elektroenergietechnik/hochspannungsgeraete), 28.09.2011
- [7] Philippow E.: „*Grundlagen der Elektrotechnik*“, Verlag Technik, Berlin, 2000, ISBN 3-341-01241-9
- [8] Hauer H.: „*Hochstromtechnik*“, Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Graz, IHS, 2010
- [9] Herold G.: „*Elektrische Energieversorgung II*“, J. Schlembach Fachverlag, Wilburgstetten, 2008, ISBN 3-935340-60-5
- [10] Kuchling H.: „*Taschenbuch der Physik*“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, ISBN 3-446-22883-7
- [11] Czichos H., Hennecke M.: „*HÜTTE - Das Ingenieurwissen*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-71851-2
- [12] Brakelmann H.: „*Belastbarkeit der Energiekabel*“, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 1985, ISBN 3-8007-1406-X
- [13] Kuchler A.: „*Hochspannungstechnik*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8

- [14] Hell F.: „*Grundlagen der Wärmeübertragung*“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982, ISBN 3-18-400529-1
- [15] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) [Hrsg.]: „*VDI-Wärmeatlas*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, ISBN 3-540-25504-4
- [16] Barcikowski F., Lindmayer M.: „*Untersuchung zur Simulation des Wärmehaushaltes von Schaltgeräten*“, 15. Fachtagung, Kontaktverhalten und Schalten, Karlsruhe, VDE-Fachberichte 55, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 1999, ISBN 3-8007-2471-5, Seite 165-174
- [17] Löbl H.: „*Thermische Beanspruchung und Festigkeit elektrotechnischer Geräte*“, Praktikum Hochstromtechnik, Technische Universität Dresden, IEEA, [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_elektrotechnik\\_und\\_informationstechnik/ieeh/download\\_bereich/praktikaanleitungen/hochstromtechnik](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_elektrotechnik_und_informationstechnik/ieeh/download_bereich/praktikaanleitungen/hochstromtechnik), 28.09.2011
- [18] Crastan V.: „*Elektrische Energieversorgung 1*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-69439-7
- [19] Gremmel H., Kopatsch G. [Hrsg.]: „*Schaltanlagen Handbuch*“, Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG, Berlin, 2006, ISBN 3-589-24102-0
- [20] Grossmann S., Löbl H., Kaltenborn U.: „*Heiße Sache*“, ABB Technik 2/2005, Seite 55-58
- [21] Fischer H., Hofmann H., Spindler J.: „*Werkstoffe in der Elektrotechnik*“, Carl Hanser Verlag, München, 2007, ISBN 978-3-446-40707-7
- [22] Ivers-Tiffée E., von Münch W.: „*Werkstoffe der Elektrotechnik*“, B.G.Teubner Verlag/GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2007, ISBN 978-3-8351-0052-7
- [23] Slade P. G.: „*Electrical contacts: principles and applications*“, Marcel Dekker, Inc., New York, 1999, ISBN 0-8247-1934-4
- [24] Keil A., Merl W. A., Vinaricky E. [Hrsg.]: „*Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1984, ISBN 3-540-12233-8
- [25] Deutsche Kupfer Institut [Hrsg.]: „*Kupfer in der Elektrotechnik - Kabel und Leitungen*“, Düsseldorf, 2000, [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/frameset.php3?client=1&lang=1&idcat=147&parent=19](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/frameset.php3?client=1&lang=1&idcat=147&parent=19), 28.09.2011
- [26] Deutsche Kupfer Institut, [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/index.php](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/index.php), 28.09.2011

- [27] Merkel M., Thomas K.-H.: „*Taschenbuch der Werkstoffe*“, Carl Hanser Verlag, München, 2000, ISBN 3-446-21410-0
- [28] International Aluminium Institute, <http://www.world-aluminium.org/?pg=About%20Aluminium/Applications%20and%20Products/Electricity>, 28.09.2011
- [29] Finanzen.net, Rohstoffpreise, <http://www.finanzen.net/>, 28.09.2011
- [30] Hornbogen E.: „*Werkstoffe*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, ISBN 3-540-30723-0
- [31] Fasching G.: „*Werkstoffe für die Elektrotechnik*“, Springer-Verlag, Wien New York, 2005, ISBN 3-211-22133-6
- [32] Behrens V.: „*Kontaktwerkstoffe für Niederspannungs-Schaltkontakte - eine Einführung*“, 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, Oktober 2009, VDE-Fachbericht 65, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 2009, ISBN 3-8007-3188-6, Seite 155-159
- [33] Holm R.: „*Electric Contacts Handbook*“, Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 1958
- [34] Höft H.: „*Elektrische Kontakte*“, Verlag Technik, Berlin, 1977, Lizenz 201 370/88/77
- [35] Lindmayer M.: „*Schaltgeräte*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1987, ISBN 3-540-16706-4
- [36] Böge W., Plaßmann W. [Hrsg.]: „*Vieweg Handbuch Elektrotechnik*“, Friedr. Vieweg und Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007, ISBN 978-3-8348-0136-4
- [37] Heuck K., Dettmann K.-D., Schulz D.: „*Elektrische Energieversorgung*“, Friedr. Vieweg und Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007, ISBN 978-3-8348-0217-0
- [38] Noack F.: „*Schalterbeanspruchungen in Hochspannungsanlagen*“, Verlag Technik, Berlin, 1980, Lizenz 201 370/69/80
- [39] Rieder W.: „*Plasma und Lichtbogen*“, Friedr. Vieweg und Sohn GmbH, Braunschweig, 1967, Best.-Nr. 4820
- [40] Erk A., Finke H.: „*Über das Verhalten unterschiedlicher Kontaktwerkstoffe beim Einschalten prellender Starkstrom-Schaltglieder*“ ETZ-A 86, 1965, Seite 297-302
- [41] Oeding D., Oswald B. R.: „*Elektrische Kraftwerke und Netze*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-642-19245-6

- [42] Meyer W.: „*Mechanische Kurzschlussfestigkeit von biegesteifen Leitern in IEC 865-1 / DIN EN 60865-1(VDE 0103/11.94)*“, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen, 2002
- [43] Dorsch H., Jacottet P [Hrsg]: „*Elektrische Schaltvorgänge*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1974, ISBN 3-540-05766-8
- [44] Meyer W.: „*Lastannahmen bei biegesteifen Leitern in Schaltanlagen*“, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen, 2004
- [45] Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal G.m.b.H., Versuch im Hochstromlaboratorium, Wien, 27.04.2011
- [46] CIGRÉ SC 23 / IEC TC 73: „*The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Rigid and flexible bus-bars). A Companion Book to Vol. 105*“, Paris: CIGRÉ, Geneva: IEC, 2002
- [47] Hosemann G. [Hrsg.]: „*Elektrische Energietechnik Band 3: Netze*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2001, ISBN 3-540-67343-1
- [48] Schwab A. J.: „*Elektroenergiesysteme*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-92226-1
- [49] Klein M.: „*Einführung in die DIN-Normen*“, B. G. Teubner GmbH, Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 2001 und Beuth Verlag GmbH, Berlin Wien Zürich, 2001, ISBN 3-519-26301-7
- [50] Ehrlenspiel K., Kiewert A., Lindemann U.: „*Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005, ISBN 3-540-25165-0
- [51] Kleinwasserkraft Österreich,  
[http://www.kleinwasserkraft.at/index.php?option=com\\_content&task=view&id=340&Itemid=112](http://www.kleinwasserkraft.at/index.php?option=com_content&task=view&id=340&Itemid=112), 24.10.2011
- [52] Verlustenergiebeschaffung, <http://www.grid-losses-austria.com/>, 24.10.2011
- [53] Fickert L.: „*Dezentrale Energieerzeugung und Kraftwärmekopplung*“, Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Graz, IFEA, 2010
- [54] Siemens Aktiengesellschaft [Hrsg.]: „*Schalten, Schützen, Verteilen in Niederspannungsnetzen*“, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München, 1992, ISBN 3-8009-4122-8
- [55] Global Wind Energy Council: „*Global Wind Report 2010*“, <http://www.gwec.net/index.php?id=180>, 03.10.2011

- [56] Siemens AG: „SIVACON 8PS Busbar trunking systems BD2A/BD2C and LDA/LDC from 160 A to 5000 A“, Technical Information LV 71.T 2004, [www.siemens.com/lowvoltage](http://www.siemens.com/lowvoltage), 27.10.2011
- [57] Schneider Electric GmbH: „Schienenverteiler von 800 A bis 4000 A Canalis® KTA“, Katalog ZXKCANALISKT, April 2010, <http://www.schneider-electric.com>, 03.10.2011
- [58] Siemens AG, „Sentron Busway Overview“, Siemens Power Distribution & Control, SPEEDFAX™ 2007-2008 Product Catalog, Seite 14-21 - 14-22
- [59] SNO-Energietechnik: „Hochstrom-Schienenverteiler EPSOBAR® 800-6300 A“, Produktkatalog, <http://www.sno-energietechnik.de/>, 03.10.2011
- [60] LANZ Oesingen AG, [http://www.lanz-oens.com/DE/giesharz\\_text.htm](http://www.lanz-oens.com/DE/giesharz_text.htm), 03.10.2011
- [61] EAE Elektrik: „E-LINEKB Schienenverteiler 800 A bis 6300 A“, Produktkatalog 01/03/2007, <http://www.eae.com.tr/eng/index.htm>, 27.10.2011
- [62] Vision Electric GmbH: „Vision® Rail Stromschienensystem“, Produktkatalog ve\_visionrail\_de\_09\_2007, <http://www.vision-electric.de/2002/site/index.de.html>, 03.10.2011
- [63] Schneider Electric GmbH, „Schienenverteiler Canalis® von 20 bis 4000 A“, Prospekt ZXPCANALIS, Feb. 2007, <http://www.schneider-electric.com>, 03.10.2011
- [64] Schöb M.: „Power über Stromschienen oder Kabel?“, ET-Elektrotechnik 1/2010, Seite 40-42
- [65] Nexans, Produktbeschreibung: H07BN4-F 1x185 cut to length, [http://www.nexans.be/eservice/Belgium-en/navigateproduct\\_540087290/H07BN4\\_F\\_1x185\\_cut\\_to\\_length.html](http://www.nexans.be/eservice/Belgium-en/navigateproduct_540087290/H07BN4_F_1x185_cut_to_length.html), 03.10.2011
- [66] Institut der deutschen Wirtschaft Köln, <http://www.iwkoeln.de/Publikationen/iwd/Archiv/tabid/122/articleid/30531/Default.aspx>, 03.10.2011
- [67] Kaufmann L., Panhans D., Pooven B., Sobotka B.: „Die niedrigen Löhne locken“, io new management Nr. 11/2005, Seite 47-50
- [68] Fachverband Kabel und isolierte Drähte, <http://www.kabelverband.org/delnotizen/Metallnotierungen%202011.htm>, 03.10.2011
- [69] Moore G. F.: „Electric cables handbook“, Blackwell Science Ltd., Oxford (UK) Malden (USA) Victoria (AUS), 1997, ISBN 0-632-04075-0

- [70] Siemens AG: „*Grundlagen der Niederspannungs-Schalttechnik*“, Schienenverteiler-Systeme, Siemens AG 2008, Seite 7-1 - 7-26, [www.siemens.de/lowvoltage/grundlagen](http://www.siemens.de/lowvoltage/grundlagen), 27.10.2011
- [71] Kießling F., Nefzger P., Kaintzyk U.: „*Freileitungen*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2001, ISBN 3-540-42255-2
- [72] DIN EN 60865-1, VDE 0103 Teil 1, IEC 865-1:1993: „*Kurzschlussströme - Berechnung der Wirkung, Teil 1: Begriffe und Berechnungsverfahren*“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [73] DIN EN 60909-0, VDE 0102, IEC 60909-0:2001: „*Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Teil 0: Berechnung der Ströme*“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2002
- [74] DIN 40500: „*Kupfer für die Elektrotechnik. Technische Lieferbedingungen Teil 1 bis 5*“
- [75] DIN 40501: „*Aluminium für die Elektrotechnik. Technische Lieferbedingungen Teil 1 bis 5*“
- [76] EUROCODE 3: „*Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, DIN V ENV 1993 Teil 1-1/04.93: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau*“, 1993
- [77] DIN IEC 60038 (VDE 0175):2002-11: „*IEC-Normspannungen*“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2002
- [78] DIN EN 60059 (VDE 0175-2):2010-03: „*IEC Normwerte für Bemessungsströme*“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2010
- [79] DIN VDE 0298-4: „*Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen*“, VDE-Verlag, Berlin, 2003
- [80] DIN 43 670: „*Stromschienen aus Aluminium - Bemessung für Dauerstrom*“, Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln, 1975
- [81] DIN 43 671: „*Stromschienen aus Kupfer - Bemessung für Dauerstrom*“, Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln, 1975
- [82] DIN EN 60085, VDE 0301-1, IEC 60085:2007: „*Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung*“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2008

## 12 Anhang

**Tabelle 21: Wichtige physikalische Eigenschaften von gebräuchlichen Leiterwerkstoffen [19]**

Eigenschaft	Zeichen	Einheit	Kupfer Cu-ETP	Rein- Aluminium E-Al 99,5	Al- Legierungen E-Al MgSi	Messing CuEnBT	Stahl (verzinkt)
Dichte	$\rho$	$kg/dm^3$	8,9	2,7	2,7	8,5	7,85
Elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C	$\kappa$	$m/\Omega \cdot mm^2$	58	35	30	≈ 18	≈ 7
Elektrische Leitfähigkeit bei 60 °C	$\kappa$	$m/\Omega \cdot mm^2$	48	30	26	≈ 16	≈ 6
Leitfähigkeit / Dichte			6,3	13	11	≈ 2	≈ 1
Spezifischer elektr. Widerstand bei 20 °C	$\varrho_{20}$	$\Omega \cdot mm^2/m$	0,0178	0,0286	0,0333	≈ 0,0555	≈ 0,143
Temperaturkoeffizient des elektr. Widerstandes (1- 100 °C)	$\alpha_T$	$K^{-1}$	0,0038	0,0040	0,0036	0,0024	0,005
Schmelztemperatur	$T_S$	°C	1083	658	630	≈ 912	1400
Mittlere spez. Wärmekapazität (1-100 °C)	$c$	$J/g \cdot K$	0,393	0,92	0,92	0,377	0,485
Wärmeleitfähigkeit (1-100 °C)	$\lambda$	$W/m \cdot K$	394	220	190	120	46
Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient (1- 100 °C)	$\alpha_t$	$mm/m \cdot K$	0,017	0,024	0,023	0,018	0,012
Elastizitätsmodul	$E$	$kN/mm^2$	110	65	70	≈ 90	210
Thermische Grenzstromdichte <sup>1</sup>	$S_{th,Grenz}$	$A/mm^2$	154	102	89	91	-
Schmelzstromdichte <sup>2</sup>	$S_{th,Schmelz}$	$A/mm^2$	3060	1910	1690	1900	-

<sup>1)</sup> Thermische Grenzstromdichte, ist die Stromdichte bei der nach 1 s Belastung die Leitertemperatur von 35 °C bis 200 °C ansteigt. Wärmeableitung vernachlässigt.

<sup>2)</sup> Schmelzstromdichte ist die Stromdichte, bei der nach 0,01 s Belastung die Leitertemperatur auf Schmelztemperatur ansteigt. Werte nach Müller-Hillebrand.

**Tabelle 22: Thermische Stoffkennwerte gängiger fester Isolierstoffe [2]**

Stoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	Spezifische Wärmekapazität $c$
	in W/m K	in J/g K
Polyethylen	0,30-0,50	2,1-2,7
PVC	0,15-0,17	1,0-1,25
Hartpapier	0,24	2,4
Porzellan	0,8-1,2	0,8
Glas	0,4-0,8	0,84
Gummi (für Kabel)	0,13	1,43

**Tabelle 23: Emissionszahlen häufig verwendeter Materialien [17]**

Werkstoff	Emissionszahl $\epsilon$
Aluminium, ohne Oxidschicht	0,07
Aluminium, oxidiert Innenraum	0,25
Aluminium, oxidiert Freiluft	0,5
Aluminium, oxidiert, verschmutzt Freiluft	0,8 - 0,9
Blei, grau oxidiert	0,28
Kupfer, poliert	0,04
Kupfer, geschabt	0,09
Kupfer, oxidiert Innenraum	0,25
Kupfer, stark oxidiert	0,75
Kupfer, stark oxidiert, verschmutzt Freiluft	0,85 - 0,95
Kupfer, schwarz oxidiert	0,78
Messing, poliert	0,05
Messing, gewalzt	0,07
Messing, oxidiert Innenraum	0,25
Stahl, sandgestrahlt	0,67
Eisen, verzinkt	0,25
Eisenblech, abgeschmirlgelt	0,24
Gusseisen, abgedreht	0,44
Gusseisen, rau oxidiert	0,96
Stahlblech, mit Walzhaut	0,65
Blei grau oxidiert	0,28
Glas, glatt	0,93
Isolierstoffe (z.B. PVC, Gießharz)	0,95
Farben und Lacke	0,85 - 0,95
Zinkbelag auf Isolierstoffe	0,5
Mauerstein, rot und rau	0,93
Porzellan, glasiert	0,92

**Tabelle 24: Werte für  $C_Q$  in (4.50) [2]**

Kontaktwerkstoffe (gesäuberte Oberflächen)	$C_Q$
Kupfer – Kupfer	$0,14 \cdot 10^{-3}$
Aluminium – Aluminium	$0,18 \cdot 10^{-3}$
Silber – Silber	$0,11 \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 25: Werte für m in (4.50) [2]**

Form der Kontaktstücke	m
Kugel – Fläche	0,5
Kugel – Kugel	0,5
Stromschienen-Verbindung	0,5

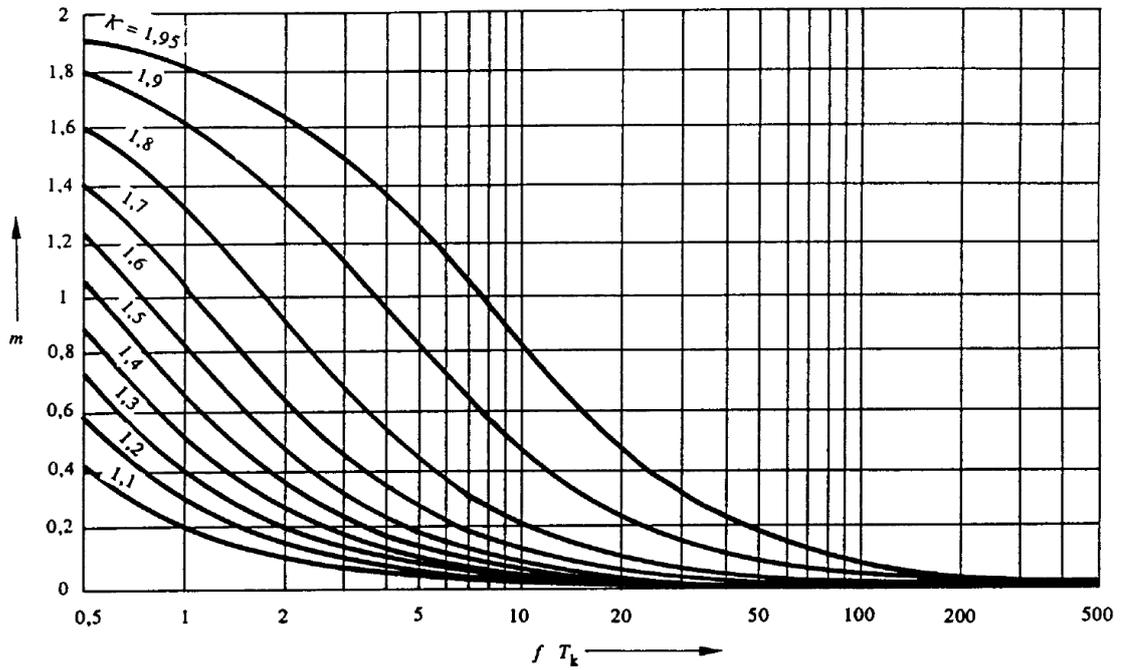


Abbildung 12.1: Faktor  $m$ , Wärmewirkung durch die Gleichstromkomponente in Dreh- und Wechselstromanlagen [72]

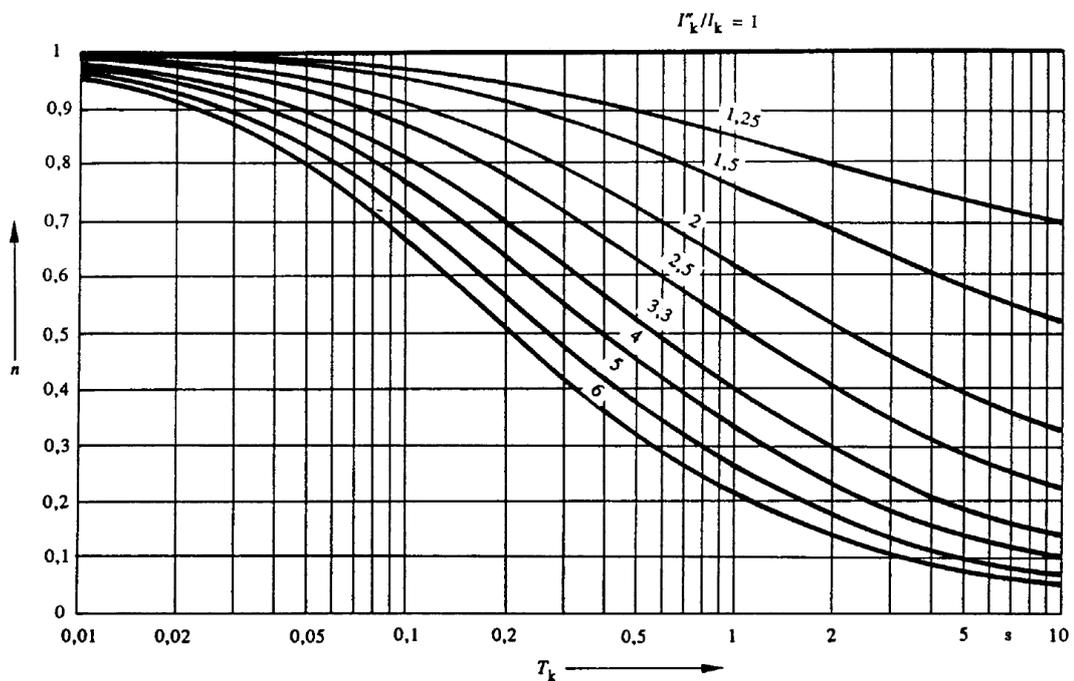


Abbildung 12.2: Faktor  $n$ , Wärmewirkung durch die Wechselstromkomponente in Drehstrom und näherungsweise in Wechselstromanlagen [72]

**Tabelle 26: Richtwerte für Eigenschaften von Leiterwerkstoffen [19]**

Werkstoff	Zustand	Zugfestigkeit $R_m$	0,2%-Dehngrenze $R_{p,0,2}$	Bruchdehnung $A, A_{50}, A_{100}$ <sup>1)</sup>	Härte HV	
		in $N/mm^2$	in $N/mm^2$	in %	min.	max.
		min.		min.		
<b>Kupfer</b>						
Cu-ETP	D	-	-	-		
Cu-ETP	H040	-	-	-	40	65
Cu-ETP	R200	200	max. 120	25-35		
Cu-ETP	H090	-	-	-	90	110
Cu-ETP	R280	280	min. 240	8-10		
<b>Aluminium</b>						
ENAW-1350A	-F	-			-	
ENAW-1350A	-O	65	min. 20	20-26	20	
ENAW-1350A	-H 24	105	min. 75	3-8	33	
<b>Aluminium-Knetlegierung</b>						
ENAW-6101B	-T 6	215	min. 160	6-8	-	-
ENAW-6101B	-T 7	170	min. 120	10-12	-	-

<sup>1)</sup> Je nach Materialdicke

## 12.1 Zeichenerklärung

### Symbolverzeichnis

$a$	Abstand, Temperaturleitfähigkeit, Faktor, Radius
$a_m$	wirksamer Abstand zwischen Hauptleitern
$a_n$	wirksamer Abstand zwischen Teilleitern
$A$	Querschnitt, Fläche
$A_K$	Kontaktfläche
$A_n$	Konturfläche
$A_S$	scheinbare Kontaktfläche
$A_{\text{Schweiß}}$	Schweißfläche
$A_t$	tragende Kontaktfläche
$A_W$	wirksame Kontaktfläche
$b$	thermische Ortskonstante
$\vec{B}$	magnetische Flussdichte
$c$	spezifische Wärmekapazität, Faktor
$C$	Kapazität, Faktor, Materialkonstante
$C_{12}$	Strahlungsaustauschzahl
$C_{th}$	Wärmekapazität
$E$	Elastizitätsmodul
$\vec{E}$	elektrische Feldstärke
$f$	Frequenz
$f_c$	Kennfrequenz, Eigenschwingzahl
$f_H$	Umrechnungsfaktor für die Häufung
$f_U$	Umrechnungsfaktor für die Umgebungstemperatur
$F$	Kraft
$F_a$	Abhebekraft
$F_d$	Kraft auf den Stützpunkt bei biegesteifen Leitern
$F_H$	Haftkraft
$F_K$	Kontaktkraft
$F_{m3}$	Kraft auf mittleren Hauptleiter (dreipoliger Kurzschluss)
$F_s$	Kraft zwischen den Teilleitern während eines Kurzschlusses
$F_{th}$	thermisch bedingte Kraft
$g$	Fallbeschleunigung



G	Schubmodul
$\vec{H}$	magnetische Feldstärke
$H_K$	Kontakthärte
$i_1, i_2$	Leiterströme
$i_{d.c.}$	abklingender aperiodischer Anteil des Gleichstroms
$i_k$	Kurzschlussstrom
$i_p$	Stoßkurzschlussstrom
$i_{p3}$	Stoßkurzschlussstrom beim dreipoligen Kurzschluss
I	elektrischer Strom, Effektivwert des Stroms
$I_b$	Ausschaltstrom
$I_B$	Betriebsstrom
$I_C$	Stromkomponente (kapazitiver Blindstrom)
$I_k$	Dauerkurzschlussstrom
$I_{k,zul}$	zulässiger Kurzzeitstrom
$I_k''$	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
$I_N$	Nennbetriebsstrom
$I_r$	Bemessungsstrom
$I_{rG}$	Generatorbemessungsstrom
$I_{th}$	thermisch gleichwertiger Kurzzeitstrom
$I_{thr}$	Bemessungs-Kurzzeitstrom
$I_{zul}$	zulässiger Belastungsstrom
$I_\delta$	Stromkomponente (Wirkstrom)
J	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) eines Hauptleiters
$J_S$	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) eines Teilleiters
k	Stromverdrängungsfaktor
$k_P$	Korrekturfaktor für Proximityeffekt
$k_S$	Korrekturfaktor für Skineffekt
$k_u$	Gütefaktor
$k_{u0}$	Anfangsgütefaktor
$K_1$	Konstante
l	Länge
L	Induktivität

$m$	Masse, Faktor
$m'$	Massebelag eines Hauptleiters
$m'_s$	Massebelag eines Teilleiters
$M$	Widerstandsmoment
$M_m$	Widerstandsmoment des Hauptleiters
$M_n$	Widerstandsmoment des Teilleiters
$n$	Faktor, Anzahl der Teilleiter
$O$	Oberfläche
$O_K$	Oberfläche, die Wärme durch Konvektion abgibt
$P$	elektrische Leistung
$P_{ab}$	abgeführte Wärmeleistung
$P_D (P_\delta)$	dielektrische Verluste
$P_H$	Hystereseverluste
$P_K$	Wärmeleistung durch Konvektion
$P_L$	Wärmeleistung durch Strahlung
$P_L$	Wärmeleistung durch Wärmeleitung
$P_{SH}$	Wärmeleistung durch Sonnen- und Himmelsstrahlung
$P_{St}$	Stromwärmeverluste
$P_W$	Wirbelstromverluste
$P_{zu}$	zugeführte Wärmeleistung
$q$	Plastizitätsfaktor
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
$\dot{Q}$	Wärmeleistung, Wärmestrom
$Q$	Wärme
$Q_C$	kapazitive Blindleistung
$r$	Radius
$R.$	Gleichstromwiderstand
$R_.$	Wechselstromwiderstand
$R_{20}$	Widerstand bei 20 °C
$R_B$	Widerstand des Betriebsmittels
$R_E$	Engewiderstand
$R_{el}$	elektrischer Widerstand
$R_F$	Fremd-/Dünnschichtwiderstand
$R_K$	Kontaktwiderstand

$R_k$	Kurzschlusswiderstand
$R_L$	Widerstand eines Leitungsstückes
$R_{p0,2}$	0,2%-Streckgrenze
$R_{th}$	thermischer Widerstand
$R_V$	Verbindungswiderstand
$\Delta R$	Widerstandsänderung
$S$	Stromdichte
$S_{th}$	thermisch gleichwertige Kurzzeitstromdichte
$S_{thr}$	Bemessungs-Kurzzeitstromdichte
$t$	Zeit
$t_{min}$	Mindestschaltverzug
$T$	absolute Temperatur [°K]
$T_k$	Kurzschlussdauer
$T_{kr}$	Bemessungs-Kurzzeit
$\tan\delta$	Verlustfaktor
$U, u$	elektrische Spannung, Umfang
$U_d$	Durchschlagsspannung (Kippspannung $U_k$ )
$U_{Ent}$	Entfestigungsspannung
$U_K$	Kontaktspannung
$U_m$	höchste Betriebsspannung
$U_n$	Nennspannung
$U_r$	Bemessungsspannung (engl.: rated voltage)
$U_S$	Schmelzspannung
$U_{Sd}$	Siedespannung
$V$	Volumen
$V_r$	Verhältnis von dynamischen Beanspruchungen (Kraft auf den Stützpunkt, Hauptleiter-Biegespannungsbetrag) bei erfolgloser dreipoliger Kurzunterbrechung zu den dynamischen Beanspruchungen bei erfolgreicher dreipoliger Kurzunterbrechung
$V_{rs}$	Verhältnis des dynamischen Biegespannungsbeitrags bei erfolgloser dreipoliger Kurzunterbrechung zum dynamischen Biegespannungsbeitrag bei erfolgreicher dreipoliger Kurzunterbrechung
$V_\sigma$	Verhältnis vom dynamischen zum statischen Hauptleiter-Biegespannungsbeitrags

$V_{os}$	Verhältnis vom dynamischen zum statischen Teilleiter-Biegespannungsbeitrag
$x$	Ortskoordinate
$X_k$	Kurzschlussreaktanz
$\underline{Z}_{(0)}$	Kurzschlussnullimpedanz
$\underline{Z}_{(1)}$	Kurzschlussmitimpedanz
$\underline{Z}_{(2)}$	Kurzschlussgegenimpedanz
$Z_k$	Kurzschlussimpedanz
$Z_L$	Lastimpedanz
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient, Faktor
$\alpha_K$	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion
$\alpha_l$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\alpha_S$	Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung
$\alpha_T$	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands
$\beta$	räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient, Faktor
$\beta_T$	quadratischer Temperaturkoeffizient
$\gamma$	Volumenausdehnungskoeffizient, Faktor
$\gamma_F$	Belastungsbeiwert
$\gamma_M$	Materialbeiwert
$\delta$	Eindringtiefe, Verlustwinkel
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Emissionszahlen
$\vartheta$	Temperatur
$\vartheta_0$	Umgebungstemperatur
$\vartheta_E$	Temperatur in der Stromenge
$\vartheta_{E,max}$	maximale Temperatur in der Stromenge
$\vartheta_{end}$	stationäre Endtemperatur
$\vartheta_{Ent}$	Entfestigungstemperatur
$\vartheta_f$	Temperatur des Fluids
$\vartheta_G$	Temperatur einer zusätzlichen Wärmequelle
$\vartheta_k$	Temperatur während Kurzschlussstrombelastung
$\vartheta_K$	Maximaltemperatur in der Kontaktfläche
$\vartheta_{k,zul}$	zulässige Grenztemperatur bei Kurzzeitbelastung

$\vartheta_R$	Rekristallisationstemperatur
$\vartheta_S$	Schmelztemperatur
$\vartheta_{Sd}$	Siedetemperatur
$\vartheta_{Sint}$	praktische Sintertemperatur
$\vartheta_V$	Temperatur für viskoses Fließen
$\vartheta_{zul}$	zulässige Dauertemperatur
$\Delta\vartheta$	Temperaturänderung
$\vartheta_b$ ( $\vartheta_b$ )	Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlussbeginn
$\vartheta_e$	Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlussende
$\vartheta_{end}$	Leiterübertemperatur bei stationärem Betrieb
$\vartheta_{zul}$	maximal zulässige Übertemperatur des Leiters
$\kappa$	spezifische elektrische Leitfähigkeit
$\kappa$	Stoßfaktor
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{min/max}$	Faktor zu Berechnung des Dauer Kurzschlussstroms
$\mu$	Permeabilität, Poissonsche Zahl, Abklingfaktor
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante
$\nu$	kinetische Viskosität
$\rho$	Dichte
$\varrho$	spezifischer elektrischer Widerstand
$\varrho_{20}$	spezifischer elektrischer Widerstand bei 20 °C
$\sigma$	mechanische Spannung, empirische Größe (Hautwiderstand)
$\sigma_B$	Zug-/Bruchfestigkeitsgrenze
$\sigma_E$	Elastizitätsgrenze
$\sigma_G$	statische Belastung durch Eigengewichtskraft
$\sigma_m$	Biegespannung durch Kräfte zwischen den Hauptleitern
$\sigma_{max}$	maximal auftretende mechanische Spannung
$\sigma_s$	Biegespannung durch Kräfte zwischen den Teilleitern
$\sigma_S$ ( $R_p$ )	Streckgrenze
$\sigma_{th}$	thermisch bedingte Druckspannung
$\sigma_{tot}$	maximale Biegespannung im Leiter
$\sigma_{zul}$	zulässige Biegespannung
$\tau$	thermische Zeitkonstante



$v$	Strömungsgeschwindigkeit
$\varphi$	Phasenwinkel
$\varphi_{10}$	Stufensprung
$\omega$	Kreisfrequenz

## Abkürzungsverzeichnis

APG	Austrian Power Grid
DIN	Deutsche Industrie Norm
E-Al	Leitungsaluminium
E-Cu	Leitungskupfer
EIM	elektrisches Isoliermaterial
EIS	elektrisches Isoliersystem
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EPR	Ethylen-Propylen-Kautschuk (engl.: ethylene propylene rubber)
GIL	Gasisolierte Leitung
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
Gr	Grashof-Zahl
IACS	International Annealed Copper Standard
KS	Kurzschluss
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
Nu	Nußelt-Zahl
NZR R10	Normzahlreihe R10
PE	Polyethylen
Pr	Prandtl-Zahl
PVC	Polyvinylchlorid
Re	Reynolds-Zahl
SIR	Silikon-Kautschuk (engl.: silicon rubber)
TAL	Thermisch belastbares Aluminium
TIWAG	Tiroler Wasserkraft AG
VKW	Vorarlberger Kraftwerke
VPE	Vernetztes Polyethylen
WKA	Windkraftanlage