

Versuch E31: Nennstromerwärmung einer Freileitung

08/2020

Prof. Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler
Dipl.-Ing. K. Schellenberger

1 Einleitung

In allen elektrotechnischen Betriebsmitteln wird ein Teil der übertragenen bzw. aufgenommenen elektrischen Leistung in Wärmeleistung umgewandelt. Das führt zur Erwärmung und einer damit verbundenen thermischen Beanspruchung der Geräte. Bei der Dimensionierung der Geräte muss deshalb darauf geachtet werden, dass diese thermische Beanspruchung die Betriebszuverlässigkeit bzw. Funktionstüchtigkeit nicht mehr als zulässig beeinträchtigt, d. h. die thermische Festigkeit der Konstruktion bzw. der im Gerät enthaltenen Materialien darf nicht überschritten werden. Als Kriterium für die thermische Festigkeit wird hinsichtlich der Art der Beanspruchung zwischen der Dauer- und der Kurzzeitstrombeanspruchung unterschieden. Dazu werden Grenztemperaturen für beide Beanspruchungsarten angegeben, die sich z. B. aus dem Lebensdauerverbrauch und der elektrischen Festigkeit der Isolierstoffe, den mechanischen Festigkeitswerten ($\delta_{0,2}$) der Leiterwerkstoffe, den Eigenschaften der Schmiermittel, der Konstruktion selbst usw. ergeben. Diese sind in technischen Standards zusammengefasst.

Bei der Kurzzeitstrombeanspruchung wird die sich einstellende Temperatur durch die im Leiter erzeugte Wärmeenergie (Leistung \times Kurzschlusszeit) und vom Wärmespeichervermögen des Leiters bestimmt.

Damit die Temperaturen in den Geräten bei der Dauerstrombeanspruchung die Grenztemperaturen nicht überschreiten, können sowohl die erzeugte Wärmeleistung (abhängig von Querschnitt, Leiterwerkstoff, Strombelastung) als auch die Wärmeübertragung verändert werden.

2 Versuchsziel

Es sollen grundlegende Erkenntnisse zur Erwärmung elektrischer Betriebsmittel und damit zu deren Belastbarkeit in Abhängigkeit verschiedener Faktoren vermittelt werden. Zudem werden im Versuch Möglichkeiten der Erfassung und Aufzeichnung von Messwerten während des Erwärmungsvorgangs vorgestellt.

Eine Berechnung thermischer Prozesse wird durchgeführt und deren Übereinstimmung mit den realen Messwerten kann überprüft werden.

3 Grundlagen

3.1 Bestimmung der Wärmeleistung

Übertemperaturen in elektrotechnischen Geräten werden vor allem durch die Stromwärmeverluste bestimmt.

Die temperaturabhängigen Stromwärmeverluste berechnen sich nach

$$P = k I^2 R(\vartheta) = I^2 \frac{k \rho_{20} l}{A} (1 + \alpha_T (\vartheta - 20^\circ \text{C})) \quad (1)$$

In Gl. (1) ist I der Belastungsstrom und $R(\vartheta)$ der temperaturabhängige Gleichstromwiderstand. Der auf 20°C bezogene spezifische Gleichstromwiderstand ρ_{20} und der Temperaturkoeffizient des Widerstandes α_T betragen für die gebräuchlichsten Leiterwerkstoffe:

Aluminium:	$\rho_{20} = 0,0278 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$	$\alpha_T = 0,004 \text{ K}^{-1}$
Silber	: $\rho_{20} = 0,0163 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$	$\alpha_T = 0,0041 \text{ K}^{-1}$
Kupfer	: $\rho_{20} = 0,0175 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$	$\alpha_T = 0,0039 \text{ K}^{-1}$
Stahl	: $\rho_{20} = 0,1341 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$	$\alpha_T = \dots \text{ K}^{-1}$

Der Stromverdrängungsfaktor k kann für Rundleiter aus Bild 5 entnommen werden.

3.2 Grundgesetze der Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung von den elektrotechnischen Geräten an die Umgebung erfolgt durch:

- Leitung,
- Strahlung und
- Konvektion.

3.2.1 Wärmeleitung

Der Begriff Wärmeleitung umfasst den Vorgang des Wärmetransports durch unmittelbare Berührung der Teilchen eines oder verschiedener Körper. Dabei erfolgt die Übertragung der Leistung in Gasen durch Diffusion der Moleküle und Atome, in Flüssigkeiten und festen Körpern hauptsächlich durch elastische Wellen und in Metallen vorwiegend durch die Bewegung der freien Elektronen.

Die durch Wärmeleitung vom höheren zum niederen Temperaturpotential transportierte Wärmeleistung berechnet sich nach der FOURIER'schen Wärmeleitungsgleichung

$$P_L = -\lambda A \text{ grad } \vartheta \quad (2)$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine Materialkenngröße. Für feste Stoffe kann sie bei technischen Berechnungen als konstant betrachtet werden (Tabelle 1). Die Wärmeleitfähigkeit von Gasen und Flüssigkeiten hängt vor allem von der Temperatur ab (Kennlinie für Luft: Bild 2).

3.2.2 Wärmeübergang

Die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion tritt unter normaler Atmosphäre gemeinsam auf und wird als „Wärmeübergang“ bezeichnet, obwohl beide Vorgänge völlig

verschiedener physikalischer Natur sind (vergl. dazu auch die folgenden Abschnitte). Nach der Gleichung des Wärmeübergangs von NEWTON

$$P = \alpha O \Delta \vartheta \quad (3)$$

kann die übertragene Wärmeleistung berechnet werden. Mit der Einführung des Wärmeübergangskoeffizienten α ergibt sich zwar ein einfacher Zusammenhang zwischen der übertragbaren Wärmeleistung P , der Oberfläche O des wärmeabgebenden Körpers und der Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$, jedoch stellt Gl. (3) keine exakte physikalisch-mathematische Beschreibung der komplizierten Vorgänge der Wärmeübertragung dar. Sämtliche den Wärmeübergang beeinflussende Faktoren wurden hier im Wärmeübergangskoeffizienten α zusammengefasst. Zur Abschätzung der zu erwartenden Übertemperatur hat Gl. (3) jedoch eine Berechtigung. Für genauere Berechnungen müssen die beiden Wärmübergangsvorgänge Strahlung und Konvektion getrennt betrachtet werden

$$P = P_s + P_K = \alpha_s O_s (\vartheta_1 - \vartheta_2) + \alpha_K O_K (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (4)$$

Gl. (4) geht nur dann in Gl. (3) über, wenn

- die Umgebungstemperatur ϑ_0 nahezu gleich der Wandtemperatur ϑ_2 ist, d. h. $\vartheta_0 = \vartheta_2$ und
- die durch Konvektion Wärmeleistung übertragende Oberfläche O_K identisch ist mit der Oberfläche O_s des Körpers 1 in Gl. (4), d. h. $O = O_s = O_K$.

Unter diesen Voraussetzungen können die getrennt berechneten Wärmeübergangskoeffizienten der Strahlung und der Konvektion wieder zu

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_K \quad (5)$$

zusammengefasst und Gl. (3) in Verbindung mit Gl. (5) zur Berechnung genutzt werden.

Praktisch treffen diese Voraussetzungen für einen Körper zu, der seine Wärmeleistung frei in den Raum abgibt (z. B. offene Schaltanlage, frei im Raum verlegte Stromschiene, Schaltzellenkapselung).

3.2.2.1 Wärmestrahlung

Ursache der Wärmestrahlung sind inneratomare Anregungszustände (Bewegung der Valenzelektronen auf unterschiedlichen Bahnen entsprechend ihrem Energiezustand), die durch Wärmeenergie hervorgerufen werden. Die Übertragung der Wärmeenergie erfolgt durch elektromagnetische Wellen (Wellenlängenbereich 0,4 ... 40 μm), die von Körpern emittiert bzw. reflektiert oder absorbiert werden.

Die Grundlage für die Berechnung der durch Strahlung übertragenen Wärmeleistung ist das STEFAN-BOLTZMANN'sche Gesetz:

$$P_s = \varepsilon_{12} C_s O_{S1} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

P_s ist die durch Strahlung vom Körper 1 zum Körper 2 übertragene Wärmeleistung. Dabei sind T_1 die absolute Temperatur des wärmeabgebenden Körpers 1 mit der Oberfläche O_{S1} und T_2 die absolute Temperatur des wärmeaufnehmenden Körpers 2. C_s ist das Strahlungsvermögen des ideal schwarzen Körpers. ($C_s = 5,67 \text{ W/ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Ist C das Strahlungsvermögen eines beliebigen Körpers, so gibt dessen Emissionszahl nach der Definition

$$\varepsilon = \frac{C}{C_s} \quad (7)$$

das Strahlungsvermögen dieses Körpers im Vergleich zu dem des idealen schwarzen Körpers an (Tabelle 2).

Die in Gleichung (6) enthaltene resultierende Emissionszahl ε_{12} berücksichtigt außer den Emissionszahlen beider Körper auch deren Oberflächenverhältnisse. Umhüllt der die Wärmeleistung aufnehmende Körper 2 den wärmeabgebenden Körper 1, so berechnet sich die resultierende Emissionszahl ε_{12} nach

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{O_{S1}}{O_{S2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (8)$$

Ist die wärmeabstrahlende Oberfläche des Körpers 1 wesentlich kleiner als die des umhüllenden Körpers 2 (z. B. ist das bei Elementen der Strombahn oft der Fall), so gilt $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1$, sofern ε_2 nicht zu klein ist.

Für die Berechnung des Strahlungsanteils in Gl. (4) nach

$$P_s = \alpha_s O_s (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (9)$$

ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung durch Gleichsetzen der Gleichungen. (6) und (9).

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_{12} c_s \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \quad (10)$$

3.2.2.2 Konvektiver Wärmeübergang

Der konvektive Wärmeübergang umfasst den Wärmeaustausch zwischen einem Gas oder einer Flüssigkeit und einem festen Körper bzw. einem Gas und einer Flüssigkeit. An den Berührungsstellen der beiden Medien wird die Wärmeleistung durch Leitung übertragen,

während innerhalb des Gases bzw. der Flüssigkeit der Leistungstransport zum größten Teil durch die Bewegung des Mediums und nur in geringem Maße durch Leitung erfolgt. Die gemeinsame Wirkung von Bewegung des Mediums (Konvektion) und Wärmeleitung wird als konvektiver Wärmeübergang bezeichnet. Bewegen sich die Teilchen des Mediums nur durch die Temperaturunterschiede innerhalb desselben und den dadurch hervorgerufenen Dichteunterschied, d. h. durch den Auftrieb, so spricht man von freier Konvektion.

Die Berechnung der durch Konvektion von einem Körper abgeführten Wärmeleistung ist nicht einfach, da viele Einflussfaktoren gleichzeitig wirken. Die genaue mathematische Beschreibung der Wärmeübertragung durch Konvektion ergibt ein System von Differentialgleichungen (siehe [1], S. 42 - 45), das in geschlossener Form nur für einige Fälle lösbar ist. Aus diesem Grund haben auch heute noch experimentelle Untersuchungen zum konvektiven Wärmeübergang ihre Berechtigung.

Der Konvektionsanteil in Gl. (4)

$$P_K = \alpha_K O_K (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (11)$$

beschreibt den Zusammenhang zwischen der durch Konvektion übertragenen Wärmeleistung P_K , der vom Medium umströmten Oberfläche O_K und der Temperaturdifferenz zwischen dem wärmeabgebenden Körper (ϑ_1) und dem umgebenden Medium (ϑ_0 – z. B. Temperatur der umgebenden Luft).

Der konvektive Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten α_K ist von folgenden Größen abhängig:

- Temperatur, Abmessung und Gestalt der wärmeabgebenden Oberfläche
- Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärme, dynamische Zähigkeit, Ausdehnungskoeffizient, Geschwindigkeit und Art der Bewegung (laminar oder turbulent) des Mediums.

In der Literatur werden oft nur vereinfachte Gleichungen zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α_K oder auch nur Zahlenwerte angegeben, deren Ursprung unklar ist bzw. die für bestimmte Anordnungen aus relativ wenigen Messungen unter nicht oder nur zum Teil angegebenen Versuchsbedingungen ermittelt wurden. Diese Gleichungen bzw. Werte können aber für grobe Abschätzungen unter Beachtung aller Randbedingungen verwendet werden.

Die Grundlage dafür, die aus Experimenten an einer bestimmten geometrischen Anordnung gewonnenen Ergebnisse zur Berechnung anderer ähnlicher Fälle zu benutzen, ist die Ähnlichkeitstheorie. Durch die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie wird der durch das Differentialgleichungssystem beschriebene Zusammenhang zwischen den thermischen und strömungstechnischen Größen sowie den Stoffeigenschaften berücksichtigt.

Grundlagen der Ähnlichkeitstheorie

Der Begriff der Ähnlichkeit ist aus der Geometrie her geläufig. Zwei Körper sind ähnlich, wenn ihre Abmessungen in einem konstanten Zahlenverhältnis zueinanderstehen. Die Ähnlichkeitstheorie allgemein in der Physik angewendet, verlangt nicht nur eine konstante Proportion der äußeren Abmessungen, sondern auch eine solche aller anderen Größen, durch die der betrachtete Vorgang bestimmt wird, z. B. die der Temperatur, der Geschwindigkeit, des Druckes usw.

Die Voraussetzungen für die Anwendung des Ähnlichkeitsbegriffes sind:

1. Die physikalischen Vorgänge müssen analytisch durch gleiche Formeln sowohl der Form als auch dem Inhalt nach beschreibbar sein.

Ist der betrachtete Vorgang zwar der Form nach gleich, dem physikalischen Inhalt nach jedoch verschieden, so bezeichnet man ihn als analog, z. B. Analogie zwischen Wärmeleitung und Diffusion oder zwischen elektrischen und Wärmeströmungsfeldern.

2. Geometrische Ähnlichkeit der Systeme, in denen die Vorgänge ablaufen.
3. Es können nur gleiche Größen in ähnlich liegenden Punkten des Raumes und zu ähnlichen Zeitabschnitten verglichen werden.
4. Ähnlichkeit aller Größen, die die betrachteten Vorgänge beeinflussen, d. h. in allen Punkten des Raumes und nach gleichen Zeitabschnitten muss eine beliebige Größe φ_1 des einen Vorgangs der gleichen Größe des anderen Vorgangs proportional sein, d. h. $\varphi_2 = f \varphi_1$, wobei die Ähnlichkeitskonstante f unabhängig vom Ort und der Zeit ist.

Bei komplizierten, durch viele physikalische Größen beeinflusste Vorgänge stehen die Ähnlichkeitskonstanten (für jede physikalische Größe gibt es eine) in einem bestimmten Verhältnis zueinander und können nicht willkürlich gewählt werden.

Dieser Zusammenhang zwischen den Ähnlichkeitskonstanten ergibt sich aus den Gleichungen, die den Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen beschreiben.

Voraussetzung für die Bildung des Ähnlichkeitskriteriums für einen beliebigen physikalischen Vorgang ist die Kenntnis der analytischen Beziehung zwischen dessen Veränderlichen, sei es auch in der Form nichtintegrierbarer Differentialgleichungen.

Für physikalische Vorgänge, die durch komplizierte oder gar mehrere Gleichungen beschrieben werden, wie z. B. die Wärmeübertragung, ergeben sich mehrere Ähnlichkeitskriterien, die durch diese Gleichungen in einem bestimmten funktionellen Zusammenhang zueinanderstehen. Gibt man also die Ergebnisse irgendeines Versuchs in Ähnlichkeitskriterien an, so gewinnt man eine verallgemeinerte Abhängigkeit, die für alle einander ähnlichen Vorgänge gilt. Bei Anwendung der Ähnlichkeitstheorie auf die Wärmeübertragung erhält man keine allgemeine Lösung der in [2], S. 42 – 51 angegebenen Differentialgleichungen, sondern eine Lösung für den untersuchten und alle ähnlichen Vorgänge, ohne die Differentialgleichungen lösen zu müssen.

Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs

Durch folgende Gleichungen wird der konvektive Wärmeübergang beschrieben:

- Gleichungen des Wärmeübergangs
- Energiegleichung
- Bewegungsgleichung

Auf Einzelheiten dieser Differentialgleichungen wird nicht näher eingegangen, sondern auf [2], S. 42 – 51 verwiesen. Aus jeder dieser Gleichung lassen sich Ähnlichkeitskriterien ableiten, die jeweils nach einem bekannten Forscher auf diesem Gebiet benannt wurden ([2], S. 56 - 65).

So ergibt sich aus der Gleichung des Wärmeübergangs die Nusselt-Zahl Nu:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_K l_w}{\lambda} \quad (12)$$

Aus der Energie- und Bewegungsgleichung leiten sich die Prandtl-Zahl Pr

$$\text{Pr} = \frac{\vartheta}{a} \quad (13)$$

und bei freier Konvektion die Grashof-Zahl Gr

$$\text{Gr} = \frac{g \beta \Delta \vartheta l_w^3}{\vartheta^2} \quad (14)$$

ab.

Die Bedeutung der in diesen Ähnlichkeitskriterien enthaltenen Größen ist unter Punkt 7 (Formelzeichen) erläutert. Hierbei ist die besondere Bedeutung der in den Gl. (12), (13) und (14) enthaltenen und für den Wärmeübergang charakteristischen Länge l_w zu beachten. Sie ist eine Abmessung der wärmeabgebenden bzw. -aufnehmenden Oberfläche, die insbesondere bei verwinkelten Profilen auf verschiedene Weise gebildet werden kann. Bei der Darstellung von Versuchsergebnissen nach der Ähnlichkeitstheorie muss deshalb die bei der Auswertung der Versuche festgelegte charakteristische Länge mit angegeben werden.

Da die drei genannten, den konvektiven Wärmeübergang beschreibenden Gleichungen nicht unabhängig voneinander sind (gekoppeltes Differentialgleichungssystem), besteht auch zwischen den daraus hergeleiteten Ähnlichkeitskriterien ein funktioneller Zusammenhang.

Für freie Konvektion ergibt sich zwischen den Ähnlichkeitskriterien der Zusammenhang

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}). \quad (15)$$

Dieser funktionelle Zusammenhang zwischen den Ähnlichkeitskriterien muss nur für eine grundlegende Anordnung durch Experimente bestimmt und kann dann zur Berechnung aller ähnlichen Anordnungen verwendet werden.

Für die meisten der in bzw. an elektrotechnischen Betriebsmitteln vorkommenden Anordnungen ergibt sich der gesuchte Zusammenhang in folgender Form:

$$\text{Nu} = c_1 (\text{Gr Pr})^{n_1} \quad (16)$$

Die in den Gl. (16) enthaltene Faktor c_1 und der Exponent n_1 können für einige Anordnungen aus Tabelle 5 entnommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass diese Werte nur innerhalb des dazu angegebenen Bereiches von GrPr die entsprechende Genauigkeit gewährleisten. Außerhalb dieses Bereiches sind die angegebenen Werte durch Untersuchungen nicht belegt. Als charakteristische Länge l_w ist die sogenannte Auftriebshöhe einzusetzen, d.h. die größte Ausdehnung des die Wärmeleistung auf- bzw. abgebenden Körpers in Strömungsrichtung. Bei freier Konvektion ist diese Auftriebshöhe mit der Höhe des Körpers identisch. Bei horizontalen Platten/Stromschienen ist die kleinere Seitenlänge/Breite als l_w einzusetzen.

Bei der Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur Berechnung der Temperaturverteilung sind für die jeweiligen Anordnungen die Ähnlichkeitskriterien Gr und Pr zu bestimmen. Anschließend kann dann nach Gl. (12) der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_K aus

$$\alpha_K = \frac{\text{Nu } \lambda}{l_w} \quad (17)$$

bestimmt werden.

Während die Prandtl-Zahl den Vorteil hat, nur Stoffwerte zu enthalten (für Luft im Temperaturbereich von 0 ... 100°C kann mit $\text{Pr} = 0,71$ gerechnet werden), ist die Grashof-Zahl nach Gl. (14) komplizierter zu bestimmen. Um bei freier Konvektion die Nusselt-Zahl einfacher ermitteln zu können, wurden die Stoffwerte zu einem Koeffizienten zusammengefasst und als Funktion der mittleren Stoffwerttemperatur ϑ_m dargestellt (Bild1 – Stoffwertkoeffizient $k_s = f(\vartheta)$ der Luft).

Mit diesem Stoffwertkoeffizienten

$$k_s = \frac{g \beta}{\nu^2} \text{Pr} \quad (18)$$

kann das Produkt GrPr aus

$$\text{Gr Pr} = k_s \Delta\vartheta l_w^3 \quad (19)$$

ermittelt werden.

Die mittlere Stoffwerttemperatur ϑ_m dient auch zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit λ sowie der kinematischen Zähigkeit ν .

Sie wird nach der Beziehung

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_0}{2} \quad (20)$$

bestimmt, d. h., sie ist das arithmetische Mittel aus der Temperatur des wärmeaufnehmenden bzw. -abgebenden festen Körpers ϑ_1 und der von der Strömung unbeeinflussten Umgebungstemperatur ϑ_0 des Mediums.

3.3 Berechnung der Temperatur

3.3.1 Berechnungsverfahren

Die Berechnung der Temperaturverteilung in einem Betriebsmittel/Gerät ist nur dann relativ einfach, wenn dieses Betriebsmittel als homogener Körper betrachtet werden kann. In der Praxis ist letzteres z. B. bei gestreckten Leitern (Stromschiene, Kabel, Freileitungen) möglich, ohne dass wesentliche Fehler begangen werden. In diesem Fall kann von den in den Abschnitten 3.1 und 3.2 angegebenen Berechnungsgleichungen für die Wärmeleistung und die Wärmeübertragung ausgegangen und mit Hilfe der Wärmebilanz die Temperatur berechnet werden. In [5] werden Beispiele behandelt.

Der größte Teil der elektrotechnischen Betriebsmittel kann allerdings wegen seines komplizierten Aufbaus nicht wie ein homogener Körper behandelt werden. Auf Grund ungleichmäßig verteilter Wärmequellen, unterschiedlichster Wärmeübertragungsbedingungen sowie -Speicherfähigkeiten stellt sich eine inhomogene Temperaturverteilung ein, deren Berechnung wesentlich schwieriger als die eines gestreckten Leiters ist. Eine Methode zur Berechnung der Temperaturverteilung dieser Betriebsmittel ist die Wärmenetzmethode, die die Analogie zwischen dem Wärme- und dem elektrischen Strömungsfeld nutzt und die zur Bestimmung der Temperaturen die für die Berechnung elektrotechnischer Netze entwickelten Verfahren anwendet. Auf Einzelheiten der Wärmenetzmethode soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden (siehe Vorlesung „Hochstromtechnik“ sowie Anleitung „Theorie Wärmenetz“).

3.3.2 Stationärer Zustand

Bei der stationären Belastung eines unendlich langen, homogenen Leiters stellt sich nach genügend langer Zeit eine auf der gesamten Länge gleich große und zeitlich konstante Temperatur ein, d. h., nach Erreichen des stationären Zustandes wird weder Wärmeleistung gespeichert, noch längs der Schiene geleitet.

Damit ergibt sich die Endtemperatur des Leiters aus:

$$\vartheta_{\text{end}} - \vartheta_0 = \frac{k S^2 \rho(\vartheta) A}{(\alpha_s + \alpha_k) U} = \frac{k I^2 \rho(\vartheta)}{(\alpha_s + \alpha_k) U A} \quad (21)$$

Bei einer vorgegebenen, maximal zulässigen Übertemperatur des Leiters $\Delta\vartheta_{\text{zul}}$ kann aus Gl. (21) der zulässige Belastungsstrom I_{zul} berechnet werden.

$$I_{\text{zul}} = \sqrt{\frac{(\alpha_s + \alpha_k) A U \Delta\vartheta_{\text{zul}}}{k \rho(\vartheta)}} \quad (22)$$

Solange der Belastungsstrom kleiner als der nach Gl. (22) berechnete zulässige Belastungsstrom ist, d. h. $I \leq I_{zul}$, überschreitet die thermische Dauerstrombeanspruchung des Leiters dessen thermische Festigkeit nicht.

3.3.3 Instationärer Zustand

Ein unendlich langer, homogener Leiter wird mit einem örtlich konstanten, auf seiner gesamten Länge gleich großen, aber zeitlich sich ändernden Strom belastet, d. h. die Temperatur des Leiters ist nicht vom Ort abhängig. Das Wärmespeichervermögen des Leiters muss aufgrund der zeitlich sich ändernden Belastung berücksichtigt werden.

Erwärmungsverlauf nach dem Einschalten:

$$\vartheta = \Delta\vartheta_{\text{end}} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + \vartheta_0 \quad (23)$$

Abkühlungsverlauf nach dem Ausschalten:

$$\vartheta = \Delta\vartheta_{\text{end}} e^{-t/\tau} + \vartheta_0 \quad (24)$$

In den Gln. (23) und (24) ist $\Delta\vartheta_{\text{end}}$ die sich bei dieser Belastung einstellende Übertemperatur nach Gl. (21). Die Zeitkonstante ergibt sich aus:

$$\tau = \frac{c_p \delta A}{(\alpha_s + \alpha_k) U} \quad (25)$$

Bei bekanntem Temperaturverlauf kann die Zeitkonstante auch grafisch bestimmt werden (Bild 4). Sie ist ein Maß dafür, wie schnell nach einer Belastungsänderung der stationäre Zustand wieder erreicht wird. Nach einer Zeit $t = 3\tau$ beträgt die Abweichung von der Endtemperatur noch 5 %.

3.4 Temperaturmessung

Die Messung der Temperatur an elektrotechnischen Geräten kann mit mechanischen, chemischen und elektrischen Berührungsthermometern erfolgen.

Die einfachste Art die Temperatur zu messen, ist die mechanische mit Flüssigkeitsthermometern. Da sich diese Thermometer z. B. aber nur schwer mit der Strombahn der Geräte thermisch gut verbinden lassen und da sie außerdem eine große Zeitkonstante besitzen, werden sie nur selten zur Messung der Temperaturen in den Geräten eingesetzt.

Der Einsatz von Thermocolorfarben, die auf der Basis chemischer Reaktionen, die bei einer definierten Temperatur ablaufen, arbeiten, ist eine einfache Methode, die Temperatur zu bestimmen. Der Nachteil dieser Methode ist aber, dass keine momentanen Temperaturen gemessen werden können, sondern nur aufgrund einer Änderung des Farbtons der Farben

festgestellt werden kann, ob die chemische Reaktion stattgefunden hat oder nicht. Damit kann also nur festgestellt werden, ob die Reaktionstemperatur überschritten wurde oder nicht. Als besonders geeignet zur Messung der Temperatur an elektrotechnischen Geräten haben sich Thermoelemente und Widerstandsmesser erwiesen.

Thermoelemente sind einfach herstellbar und werden zur Messung von Temperaturen im Bereich von -200 °C bis $+1800\text{ °C}$ eingesetzt. Sie bestehen aus zwei Metallen mit unterschiedlichen Elektronenaustrittsarbeiten, die durch Löten oder Schweißen miteinander verbunden werden. Werden zwei dieser Verbindungen elektrisch in Reihe geschaltet (z.B. Drähte aus Cu und CuNi/Konstantan), entsteht ein Thermoelement mit einer Mess- und einer Vergleichsmessstelle.

In [4] ist das Thermoelement wie folgt definiert:

„Ein Thermopaar ist ein Leiterpaar aus unterschiedlichen Materialien, die an einem Ende verbunden sind, und die Teil einer Vorrichtung sind, die den thermoelektrischen Effekt für die Temperaturmessung nutzt. Der thermoelektrische Effekt ist die Erzeugung einer elektromotorischen Kraft (EMK) durch eine Temperaturdifferenz zwischen 2 Verbindungsstellen zweier unterschiedlicher Metalle oder Legierungen, die Teil eines elektrischen Stromkreises sind“.

Die Höhe der elektromotorischen Kraft/Thermospannung hängt von der sogenannten Seebeckspannung der Metalle und der Temperaturdifferenz zwischen der Mess- und der Vergleichsmessstelle ab. Die Höhe der Thermospannung wird von der Stellung der beiden Metalle in der thermoelektrischen Spannungsreihe bestimmt. In [4] sind Thermospannungen in mV für verschiedene Metalle, bezogen auf Platin, angegeben. Sind die Temperaturen an der Mess- und an der Vergleichsmessstelle gleich hoch, ist die Thermospannung Null. Im geschlossenen Stromkreis fließt kein Strom. Wird dagegen die Temperatur der Vergleichsmessstelle auf z.B. konstant 0 °C (auch 50 °C sind mit elektronischen Thermostaten üblich) eingestellt und die Temperatur der Messstelle weicht von dieser Temperatur ab, ergibt sich zwischen der Mess- und Vergleichsmessstelle eine Spannungsdifferenz $\Delta U \Leftrightarrow 0\text{ V}$ abhängig davon, an welcher Stelle die höhere Temperatur herrscht. Mit einem in °C bzw. K kalibrierten Spannungsmessgerät kann somit die Temperatur (0 °C) bzw. Temperaturdifferenz (50 °C) direkt bestimmt werden.

Die gebräuchlichsten Thermopaare sind:

Kupfer-Konstantan	Cu	-	NiCu (Konstantan)
Eisen-Konstantan	Fe	-	NiCu (Konstantan)
Nickelchrom-Nickel	NiCr	-	Ni
Platinrhodium-Platin	PtRh	-	Pt

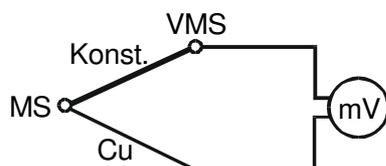
Die für die Messung an elektrotechnischen Geräten am häufigsten verwendeten Thermoelemente sind Fe-NiCu, Cu-NiCu, und Ni-NiCr.

Für die Messung der Thermospannung eignen sich grundsätzlich alle hochohmigen Gleichspannungsmessgeräte. Das am häufigsten verwendete Anzeigeelement ist das Galvanometer. Da die Messgenauigkeit dieses Spannungsmessgerätes von seinem Innenwiderstand abhängt, macht sich eine Kalibrierung auf das verwendete Instrument erforderlich. Mit Gleichspannungskompensatoren wird die Messung unabhängig vom Widerstand und damit von der Länge des Thermoelements.

Für die Aufnahme von Temperaturverläufen über Zeiten von Minuten bis Stunden sind schreibende Messgeräte/Kompensationsbandschreiber oder digitale Datenerfassungsgeräte geeignet.

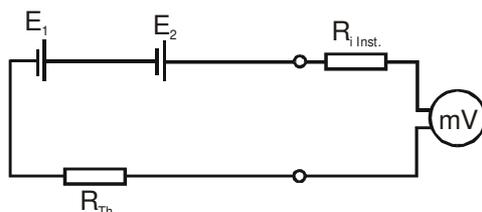
Bei Untersuchungen der Kurzzeitbeanspruchung von elektrotechnischen Betriebsmitteln im Sekundenbereich ist die Temperaturmessung schwieriger. Durch die Trägheit der direkt anzeigenden Messinstrumente und durch die hohen magnetischen Wechselfelder (EMV), durch sie werden Fremdspannungen im Thermoelement induziert, ergeben sich besondere Probleme. Eine Aufzeichnung der Thermospannungen ist dann mit Transientenrecordern oder Oszilloskopen möglich.

Die Kalibrierung der Thermoelemente erfolgt z. B. mit Hilfe eines sich erwärmenden und abkühlenden Öl-Wasserbades, dessen Temperatur mit einem präzisen Ausdehnungs-Thermometer gemessen wird. Da das Thermometer eine größere Trägheit (thermische Zeitkonstante) besitzt als das Thermoelement, wird mit ihm die Temperatur beim Erwärmungsvorgang stets zu klein bzw. beim Abkühlvorgang zu groß gemessen. Für genaue Messungen sollte die Kalibrierung der Thermoelemente sowohl in einem Erwärm- und einem Abkühlvorgang erfolgen. Dabei ergibt sich abhängig von den Temperaturanstiegen in beiden Vorgängen eine unterschiedlich große Hysterese. Die zur Thermospannung tatsächlich gehörende Temperatur liegt zwischen den beiden Temperaturen, die bei gleicher Thermospannung im Erwärm- und Abkühlvorgang gemessen wurden. Sind die Erwärm- und Abkühlzeiten etwa gleich groß, kann aus dem arithmetischen Mittelwert beider Temperaturen z. B. die Kalibrierkurve bestimmt werden.



Thermoelement mit Galvanometer

MS-Messstelle,
VMS-Vergleichsmessstelle



Ersatzschaltbild für das Thermoelement

$$R_{Inst} \gg R_{Th}$$

4 Vorbereitungsfragen

- 1 Warum muss die Temperatur von elektrotechnischen Geräten ermittelt werden?
- 2 Nennen Sie Grenztemperaturen für einen Transformator, eine Mittelspannungsschaltanlage und eine Freileitung.
- 3 Welche physikalischen Effekte führen zur unerwünschten inneren Erwärmung elektrotechnischer Geräte?
- 4 Skizzieren Sie den üblichen Querschnitt eines Mittelspannungs-Freileitungsseiles.
- 5 Für das im Versuch verwendete Freileitungsseil wird eine Nennstrombelastung in Höhe von 645 A angegeben. Unter welchen Bedingungen gilt dieser Richtwert?
- 6 Welche Arten der Wärmeübertragung treten bei einem elektrotechnischen Gerät auf?
- 7 Erklären Sie die physikalischen Vorgänge, die den einzelnen Wärmeübertragungsarten zugrunde liegen.
- 8 Wodurch wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient beeinflusst?
- 9 Welche Probleme treten bei der Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs auf?
- 10 Erklären Sie anhand einer Skizze wie die thermische Zeitkonstante grafisch bestimmt werden kann.
- 11 Welche Bedeutung hat diese Zeitkonstante für die Bestimmung der Grenztemperatur?
- 12 Beschreiben Sie kurz, wie die Bestimmung der Temperatur mittels eines Thermoelements funktioniert.
- 13 Der während des Versuches fließende Strom erzeugt ein starkes elektromagnetisches Feld. Berechnen Sie, wie nahe Sie sich längere Zeit gefahrlos neben dieser Freileitung aufhalten dürften, ohne den zulässigen Grenzwert für Anlagen der öffentlichen Elektrizitätsversorgung (0,1 mT bei 50 Hz Wechselstrom) zu überschreiten.

5 Literatur

- [1] Elsner, N. Grundlagen der Technischen Thermodynamik
Fischer, S. Band 2: Wärmeübertragung,
Huhn, J. 8. Auflage, Akademie Verlag, Berlin 1993

- [2] Michejew, M. A. Grundlagen der Wärmeübertragung
VEB Verlag Technik, Berlin 1968

- [3] Weichert, L.. Temperaturmessung in der Technik
expert-Verlag, Ehningen
5. Auflage 1992

- [4] Grundwerte der Thermospannungen
IEC/EN 60 584-1 von 10/96

- [5] H. Löbl Berechnungsgrundlagen zur Wärmenetzmethode
Technische Universität Dresden, 2002
Theta Ingenieurbüro Dresden

- [6] H. Böhme Mittelspannungstechnik Schaltanlagen berechnen und entwerfen
(Zentralbibliothek der HTW; Ausschnitte der 1. Aufl. über Intranet
der HTW)
2., stark bearb. Auflage, 2005, Verlag Technik Berlin

- [7] V. Crastan Elektrische Energieversorgung 1,
Kapitel 11: Bemessung von Netzelementen (online über Bibliothek der HTW)
Springer Verlag, 2012

- [5] R.R. Cichowski Freileitungen
(demnächst online verfügbar über Bibliothek der HTW)
3., neu bearbeitete Auflage, 2019, VDE-Verlag, Berlin

6 Aufgaben

Gegeben ist ein Freileitungsseil Al/St 240/40, das im Versuch mit Bemessungsstrom beansprucht wird.

Die Freileitung weist zu Beginn des Versuchs (ohne Strombelastung) Umgebungstemperatur auf.

Während des Versuchs wird die Leitung mit einem konstanten Strom $I = 645 \text{ A}$ solange beaufschlagt, bis sich die Leitertemperatur nicht mehr ändert.

6.1 Messaufgaben:

- Im Versuch sind zwei etwa 3 m lange Freileitungsseile an den Enden kurzgeschlossen. Die Stromspeisung erfolgt mittels Stelltransformator (0 – 400 V, 10 A) und Hochstromtransformator (2000 A, 2 V). Der Versuchsaufbau benötigt zum Betrieb mit 645 A nur eine Spannung von $< 1 \text{ V}$.
- Skizzieren Sie den Versuchsaufbau, achten Sie dabei vor allem auf die Position der Temperaturmessfühler.
- Kontrollieren Sie den Anschluss der Sensoren am Messwertumwandler und die korrekte Anzeige aller Sensoren am PC. Schalten Sie die Stromzange ein.
- Schalten sie den Hochstromtransformator ein und steigern Sie den Stromfluss zügig auf 645 A. Halten Sie danach den berechneten Sicherheitsabstand ein. Das Vorhandensein des Magnetfeldes können Sie mit einem kleinen starken Dauermagneten überprüfen.
- Beobachten Sie den steilen Anstieg der Leitertemperatur zu Beginn. Schätzen Sie ab, wie groß die Zeitkonstante τ ist.
- Während des Kolloquiums steigt die Temperatur der Leiterseile weiter an. Beachten Sie, dass die Leiterseile jetzt zu heiß zum Anfassen sind. Übernehmen Sie nach Erreichen der Endtemperatur die gespeicherten Messwerte und die grafische Darstellung für Ihr Protokoll.

6.2 Auswertung

- 1 Stellen Sie die gespeicherten Messwerte für die 5 wichtigsten Temperatursensoren in Ihrem Protokoll grafisch dar. Bestimmen Sie grafisch die beiden Zeitkonstanten τ .
- 2 Berechnen Sie überschlägig die Zeitkonstanten τ für ein gestrichenes („stark oxidiertes“) und ein blankes Leiterseil unter den beim Versuch vorhandenen Bedingungen.
- 3 Berechnen Sie die Leitertemperatur im eingeschwungenen Zustand für das blanke und das gestrichene Seil.

Hinweis: bei allen Berechnungen ist der vollständige Rechenweg mit allen verwendeten Formeln und Konstanten, deren Herkunft sowie wichtige Zwischenergebnisse anzugeben! Bei richtiger Auswertung der Messergebnisse und richtiger Berechnung sollte eine ungefähre Übereinstimmung mit den Messergebnissen erkennbar sein!

- 4 Stellen Sie die nach Ihrer Rechnung zu erwartenden Temperaturverläufe beider Seile über die Zeitdauer des Versuchs in einem Diagramm dar!
- 5 Diskutieren Sie die dargestellten Verläufe und Endtemperaturen. Gehen Sie dabei auf Unterschiede zwischen hellem und dunklem Leiterseil sowie zwischen gemessenen und berechneten Werten ein!
- 6 Vergleichen Sie die Werte mit den Tabellen 3 und 4! Erklären Sie ggf. Abweichungen!

7 Formelzeichen

Formelzeichen	physikalische Größe	Einheit, z. B.
A	Querschnittsfläche	m ²
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² s ⁻¹
b	thermische Ortskonstante	m
C	Strahlungskoeffizient	W m ⁻² K ⁻⁴
C _B	Betriebskapazität	As V ⁻¹
C _S	Strahlungskoeffizient des (idealen) schwarzen Körpers	W m ⁻² K ⁻⁴
c _p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	Ws g ⁻¹ K ⁻¹ , J g ⁻¹ K ⁻¹
c ₁ , c ₂	Konstante	-
Gr	Grashof-Zahl	-
g	Erdbeschleunigung	m s ⁻²
I	Strom	A
k	Stromverdrängungsfaktor	-
k _S	Stoffwertkoeffizient	K ⁻¹ m ⁻³
l	Länge	m
l _w	charakteristische Länge	m
Nu	Nusselt-Zahl	-
n ₁ , n ₂	Exponenten	-
O	Oberfläche	m ²
P	Wärmeleistung, Wärmefluss, Wärmestrom	W
Pr	Prandl-Zahl	-
R	elektrischer Widerstand	Ω
S	Stromdichte	A mm ⁻²
T	absolute Temperatur	K
U	Spannung, Umfang	V, m
v	Geschwindigkeit	m s ⁻¹
α	Wärmeübergangskoeffizient	Wm ⁻² K ⁻¹

α_K	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_S	Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung	$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_T	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes	K^{-1}
β	Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
δ	spezifische Masse	kg m^{-3}
ε	Emissionszahl	-
ϑ	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_m	mittlere Stoffwerttemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
ϑ	Übertemperatur	K
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$
ν	kinematische Zähigkeit	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ρ	spezifischer Widerstand	$\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$
τ	Zeitkonstante	s
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}
$\tan \delta$	Verlustfaktor	-

Indizes

end	End-
K	Konvektion
L	Leitung
S	Strahlung
zul	zulässig, Grenz-
V	Verbindung

8 Anhang

Strahlungsvermögen des „Schwarzen Körpers“		$c_s = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$	
Werkstoff	λ	c_p	δ
	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{Ws g}^{-1} \text{K}^{-1}$	g/cm^3
Aluminium (99,75 Al)	229	0,896	2,7
Duraluminium	165	0,912	2,7
Kupfer (rein)	395	0,383	8,93
Kupfer (E-Cu)	385	0,42	8,3
Kupfer, Handelsware	372	0,419	8,3
Silber	410	0,234	10,5
Messing	81 – 116	0,381	8,6
Schmiedeeisen (rein)	59	0,465	7,85
Gusseisen (3 % C)	58	0,540	7,0 – 7,7
V2A-Stahl, vergütet	15	0,477	8,0
Fensterglas	1,05 – 1,16	0,70 – 0,93	2,48 – 2,7
Plexiglas (PMMA)	0,16 – 0,19	1,3	1,17 – 1,18
Glimmer	0,5 – 0,6	0,837 – 0,88	2,2 – 3,2
Porzellan	0,81 – 1,1	0,79 – 1,09	2,3 – 2,5
Epoxidharz (EP)	0,2 – 0,6	0,9 – 1,4	1,2 – 2,0
PVC	0,17 – 0,19	1,0 – 1,5	1,2 – 1,3
Polyethylen (PE)	0,29 – 0,40	2,1 – 2,3	0,92 – 0,96
Polystyrol (PS)	0,14 – 0,16	1,09 – 1,34	0,16
Hartpapier	0,2 – 0,3	2,39	1,2
Hartgewebe	0,29 – 0,35		1,3
Gummi	0,12 – 0,21	1,38	1,1
Transformatoröl	0,12	2,09	0,84
Kiesbeton	1,28	0,88	2,2
Schaumbeton	0,35 – 0,7		1,0
Ziegelstein (trocken)	0,46	0,84	1,4 – 1,9

Tabelle 1: Stoffwerte von Werkstoffen

Werkstoff	Emissionszahl
Aluminium, ohne Oxidschicht	0,07
Aluminium-Stromschienen, oxidiert, Innenraum	0,25
Kupfer, poliert	0,04
Kupfer, geschabt	0,09
Kupfer-Stromschiene oxidiert, Innenraum	0,25
Kupfer, schwarz oxidiert	0,78
Messing, poliert	0,05
Messing, gewalzt	0,07
Stahl, sandgestrahlt	0,67
Eisen, verzinkt	0,25
Eisenblech, abgeschmirgelt	0,24
Gusseisen, abgedreht	0,44
Stahlblech, mit Walzhaut	0,65
Blei, grau oxidiert	0,28
Glas, glatt	0,94
Isolierstoffe (PVC, Hartpapier, Gießharz)	0,95
Farben und Lacke	0,9
Zinkbelag auf Gießharz	0,5
Mauerstein, rot und rauh	0,93
Porzellan, glasiert	0,92

Tabelle 2: Emissionszahlen häufig verwendeter Materialien beim Schaltanlagenbau

Seile aus Aluminium-Stahl nach DIN 48 204

Nenn- quer- schnitt	Quer- schnitt mm ²		Seil- quer- schnitt	Seilaufbau Drahtanzahl × Durch- messer		Quer- schnitts- verhält- niszahl	Seildurch- messer d mm	Rechne- rische Bruch- kraft kN	Seil- gewicht kg/m	Längen- gewichts- kraft N/m	Zusatz- last ¹⁾ N/m	Ohmsche Widerstar bei 20°C Ω/km
	Al	St		Gesamt	Al							
16/2,5	15,27	2,54	17,8	6 × 1,8	1 × 1,8	6	5,4	5,81	0,062	0,608	5,54	1,8793
25/4	23,86	3,98	27,8	6 × 2,25	1 × 2,25	6	6,8	9,02	0,097	0,951	5,68	1,2028
35/6	34,35	5,73	40,1	6 × 2,7	1 × 2,7	6	8,1	12,70	0,140	1,373	5,81	0,8353
44/32	43,98	31,67	75,7	14 × 2,0	7 × 2,4	1,4	11,2	45,46	0,373	3,659	6,12	0,6573
50/8	48,25	8,04	56,3	6 × 3,2	1 × 3,2	6	9,6	17,18	0,196	1,922	5,96	0,5946
50/30	51,17	29,85	81,0	12 × 2,33	7 × 2,33	1,7	11,7	44,28	0,378	3,708	6,17	0,5644
70/12	69,89	11,40	81,3	26 × 1,85	7 × 1,44	6	11,7	26,31	0,284	2,786	6,17	0,4130
95/12	94,39	15,33	109,7	26 × 2,15	7 × 1,67	6	13,6	35,17	0,383	3,757	6,36	0,3058
95/55	96,51	56,30	152,8	12 × 3,2	7 × 3,2	1,7	16,0	80,20	0,714	7,004	6,60	0,2992
105/75	105,67	75,55	181,2	14 × 3,1	19 × 2,25	1,4	17,5	106,69	0,899	8,730	6,75	0,2736
120/20	121,57	19,85	141,4	26 × 2,44	7 × 1,9	6	15,5	44,94	0,494	4,846	6,55	0,2374
120/70	122,15	71,25	193,4	12 × 3,6	7 × 3,6	1,7	18,0	98,16	0,904	8,868	6,80	0,2364
125/30	127,92	29,85	157,8	30 × 2,33	7 × 2,33	4,3	16,3	57,86	0,590	5,787	6,63	0,2259
150/25	148,86	24,25	173,1	26 × 2,7	7 × 2,1	6	17,1	54,37	0,604	5,925	6,71	0,1939
170/40	171,77	40,08	211,9	30 × 2,7	7 × 2,7	4,3	18,9	77,01	0,794	7,789	6,89	0,1682
185/30	183,78	29,85	213,6	26 × 3,0	7 × 2,33	6	19,0	66,28	0,744	7,298	6,90	0,1571
210/35	209,1	34,09	243,2	26 × 3,2	7 × 2,49	6	20,3	74,94	0,848	8,318	7,03	0,1380
210/50	212,06	49,48	261,5	30 × 3,0	7 × 3,0	4,3	21,0	92,25	0,979	9,603	7,10	0,1363
230/30	230,91	29,85	260,8	24 × 3,5	7 × 2,33	7,7	21,0	73,09	0,874	8,573	7,10	0,1249
240/40	243,05	39,49	282,5	26 × 3,45	7 × 2,68	6	21,8	86,46	0,985	9,662	7,18	0,1188
265/35	263,66	34,09	297,8	24 × 3,74	7 × 2,49	7,7	22,4	82,94	0,998	9,790	7,24	0,1094
300/50	304,26	49,48	353,7	26 × 3,86	7 × 3,0	6	24,5	105,09	1,233	12,895	7,45	0,0949
305/40	304,62	39,49	344,1	54 × 2,68	7 × 2,68	7,7	24,1	99,30	1,155	11,330	7,41	0,0949
340/30	339,29	29,85	369,1	48 × 3,0	7 × 2,33	11,3	25,0	92,56	1,174	11,516	7,50	0,0851
380/50	381,7	49,48	431,2	54 × 3,0	7 × 3,0	7,7	27,0	120,91	1,448	14,204	7,70	0,0757
385/35	386,04	34,09	420,1	48 × 3,2	7 × 2,49	11,3	26,7	104,31	1,336	13,106	7,67	0,0748
435/55	434,29	56,30	490,6	54 × 3,2	7 × 3,2	7,7	28,8	136,27	1,647	16,157	7,88	0,0666
450/40	448,71	39,49	488,2	48 × 3,45	7 × 2,68	11,3	28,7	120,19	1,553	15,234	7,87	0,0644
490/65	490,28	63,55	553,8	54 × 3,4	7 × 3,4	7,7	30,6	152,85	1,860	18,246	8,06	0,0590
495/35	494,36	34,09	528,4	45 × 3,74	7 × 2,49	14,5	29,9	120,31	1,636	16,049	7,99	0,0584
510/45	510,54	45,28	555,8	48 × 3,68	7 × 2,87	11,3	30,7	134,33	1,770	17,363	8,07	0,0566
550/70	549,65	71,25	620,9	54 × 3,6	7 × 3,6	7,7	32,4	167,42	2,085	20,453	8,24	0,0526
560/50	561,7	49,48	611,2	48 × 3,86	7 × 3,0	11,3	32,2	146,28	1,943	19,060	8,22	0,0514
570/40	571,16	39,49	610,7	45 × 4,02	7 × 2,68	14,5	32,2	137,98	1,889	18,531	8,22	0,0506
650/45	653,49	45,28	698,8	45 × 4,3	7 × 2,87	14,5	34,4	155,52	2,163	21,219	8,44	0,0442
680/85	678,58	85,95	764,5	54 × 4,0	19 × 2,4	7,7	36,0	209,99	2,564	25,152	8,60	0,0426
1 045/45	1 045,58	45,28	1 090,9	72 × 4,3	7 × 2,87	23,1	43,0	217,87	3,249	31,872	9,30	0,0277

Tabelle 3: Geometrische Daten von Freileitungsseilen

Nennquerschnitte Kupfer Aldrey- und Aluminiumseile mm ²	Aluminium- Stahl-Seile mm ²	Dauerstrom ¹⁾			
		Kupfer A	Aluminium A	Aldrey A	Aluminium- Stahl A
10		90			
16	16/2,5	125	110	105	105
25	25/4	160	145	135	140
35	35/6	200	180	170	170
50	50/8	250	225	210	210
70	70/12	310	270	255	290
95	95/15	380	340	320	350
120	120/20	440	390	365	410
	125/30				425
150	150/25	510	455	425	470
	170/40				520
185	185/30	585	520	490	535
	210/35				590
	210/50				610
	230/30				630
240	240/40	700	625	585	645
	265/35				680
300	300/50	800	710	670	740
	305/40				740
	340/30				790
	380/50				840
	385/35				850
400		960	855	810	
	435/55				900
	450/40				920
	490/65				960
	495/35				985
500		1 110	960	930	
	510/45				995
	550/70				1 020
	560/50				1 040
	570/40				1 050
625			1 140	1 075	
	650/45				1 120
	680/85				1 150
800			1 340	1 255	
1 000	1 045/45		1 540	1 450	1 580

¹⁾ Die Dauerstromwerte sind Richtwerte, gültig für eine Windgeschwindigkeit von 0,6 m/s und Sonneneinwirkung für eine Umgebungstemperatur von 35 °C sowie für folgende Seilendtemperaturen: Kupferseile 70 °C, Aluminium, E-Al MG Si (Aldrey-) und Aluminiumstahlseile 80 °C. Für besonders gelagerte Fälle bei ruhender Luft sind die Werte im Mittel um etwa 30 % herabzusetzen.

Tabelle 4: Strombelastbarkeit von Freileitungsseilen

Freie Konvektion: $Nu = c_1(Gr Pr)^{n_1}$				
Anordnung	Anwendungsbeispiel	c_1	n_1	Grenzen
senkrechte Platte	senkrechte Zellenwände,	0,15	1/3	$1,7 \cdot 10^8 \leq Gr Pr \leq 6 \cdot 10^9$
horizontale Platte; Wärmeabgabe nach oben	Zellendach außen	0,17	1/3	$2,3 \cdot 10^8 \leq Gr Pr \leq 1,1 \cdot 10^9$
Waagerechte Stromschiene hochkant	Stromschiene frei im Raum verlegt	0,6	1/4	$10^6 \leq Gr Pr \leq 8 \cdot 10^6$
Erzwungene Konvektion: $Nu = c_2 Re^{n_2}(Pr = 0,71)$				
Anordnung	Anwendungsbeispiel	c_2	n_2	Grenzen
senkrechte Platte	senkrechte Zellenwände	0,16	0,66	$Re \geq 10^5$
		0,032	0,8	$10^5 \leq Re$
Stromschiene	im Stromschienekanal	0,046	0,76	$6 \cdot 10^4 \leq Re \leq 7 \cdot 10^5$

Tabelle 5: Faktoren c_1 bzw. c_2 und Exponenten n_1 und n_2 zur Berechnung der Nusselt-Zahl nach Gl. (16) für einige Anordnungen (siehe auch Folie 73 - 75 der Vorlesung)

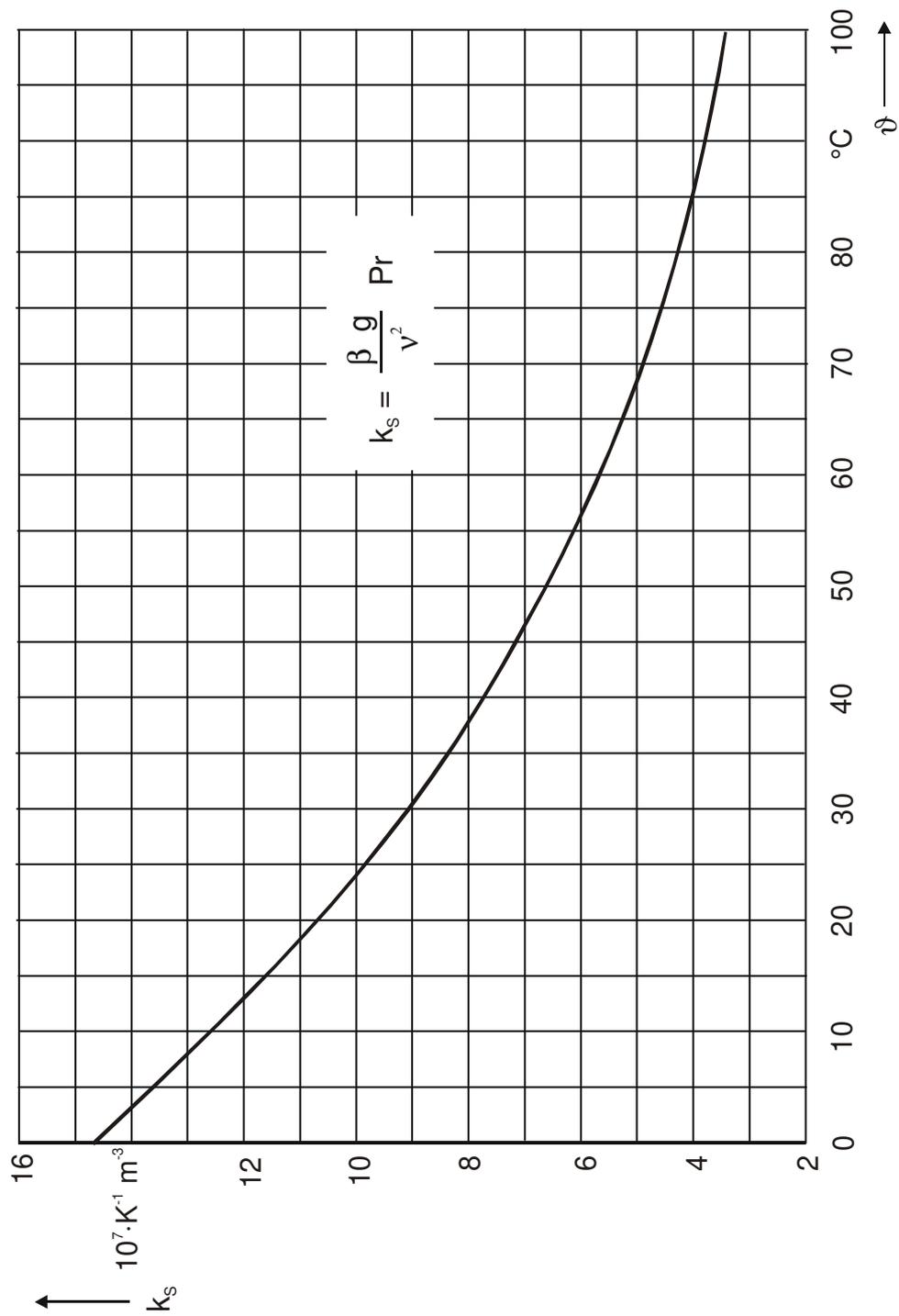


Bild 1: Stoffwertkoeffizient $k_s = f(\vartheta)$ für Luft bei Normaldruck

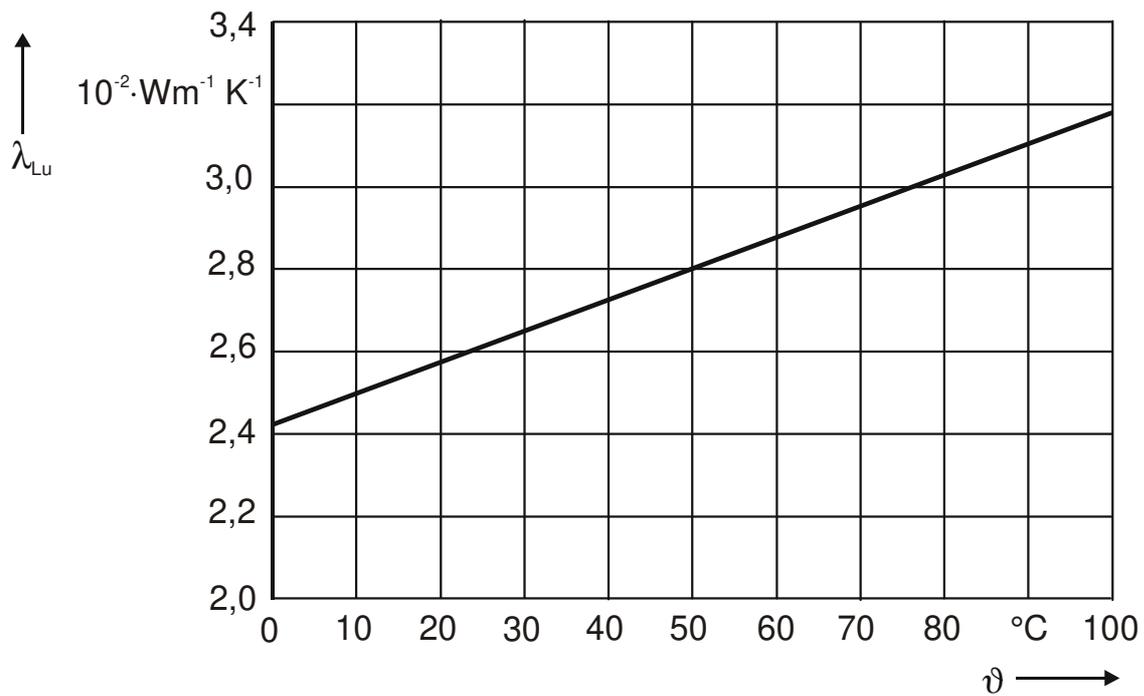


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit der Luft

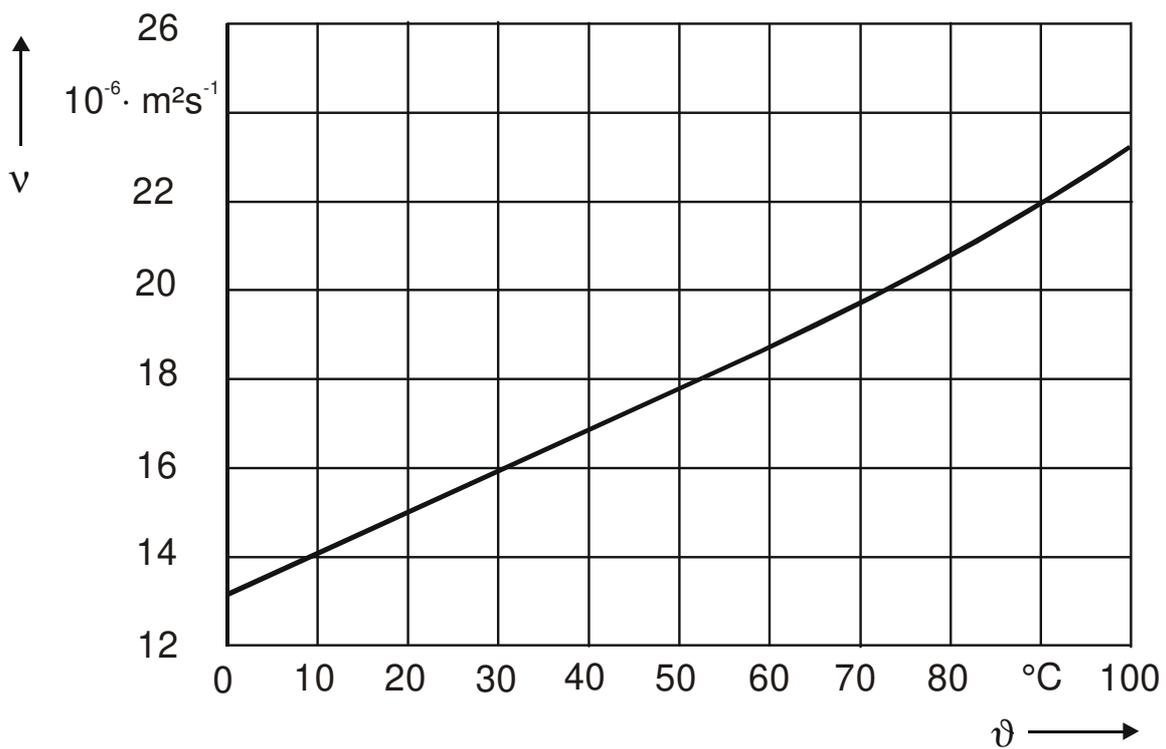


Bild 3: Kinematische Zähigkeit für Luft bei Normaldruck

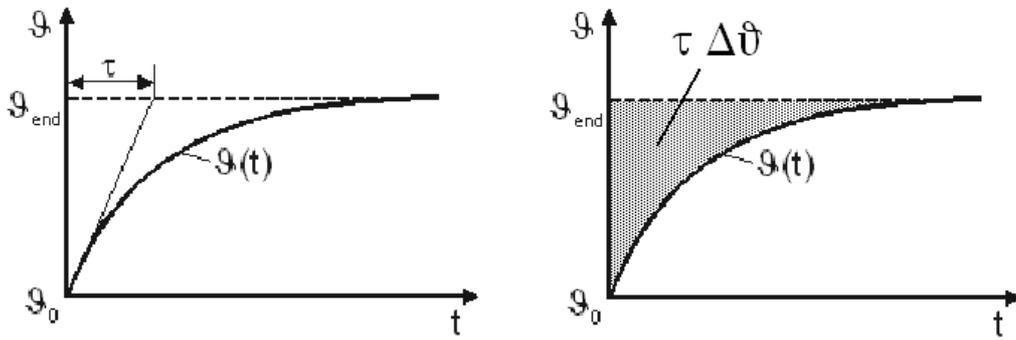


Bild 4: Temperaturverlauf beim Erwärmungsvorgang

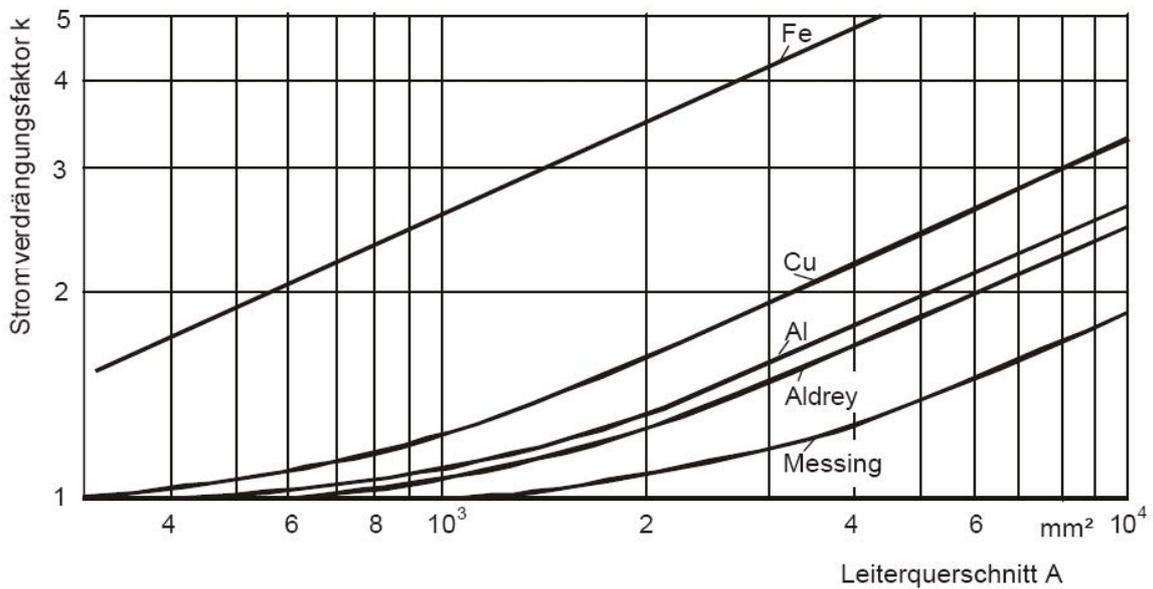


Bild 5: Stromverdrängungsfaktor für Rundleiter für $f = 50 \text{ Hz}$ (Skin-Effekt)