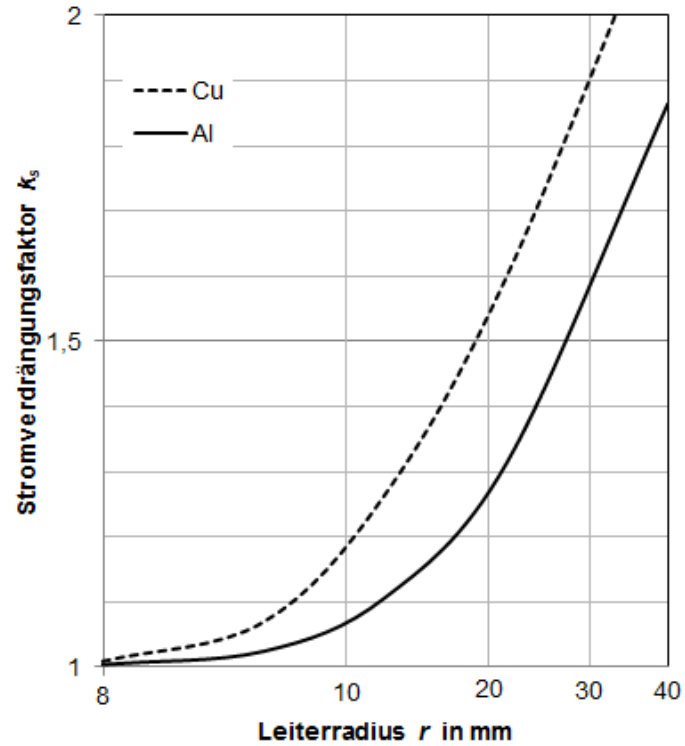
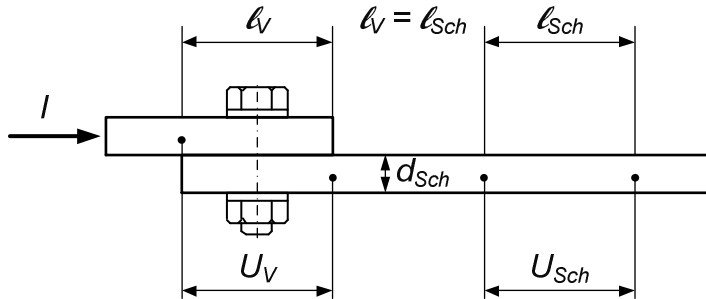


Elektrische Größe		Wärmegröße	
Potential	$\varphi [V]$	Temperatur	$\vartheta [^{\circ}C; K]$
Spannung	$U [V]$	Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta [K]$
Strom	$I [A]$	Wärmeleistung, -strom	$P [W]$
Stromdichte	$S \left[\frac{A}{cm^2} \right]$	Wärmeflussdichte	$q \left[\frac{W}{cm^2} \right]$
Leitfähigkeit	$\kappa \left[\frac{S}{cm} \right]$	Wärmeleitfähigkeit	$\lambda \left[\frac{W}{cm K} \right]$
Kapazität	$C \left[\frac{As}{V} \right]$	Wärmekapazität	$C \left[\frac{Ws}{K} \right] (= m \cdot c)$
		spez. Wärmekapazität	$c \left[\frac{Ws}{g K} \right]$
Ladung	$Q [As]$	Wärmemenge, -energie	$Q [Ws]$
Widerstand	$R \left[\Omega = \frac{V}{A} \right]$	Wärmewiderstand	$R \left[\frac{K}{W} \right]$

Analogie elektrischer Felder und Wärmefelder



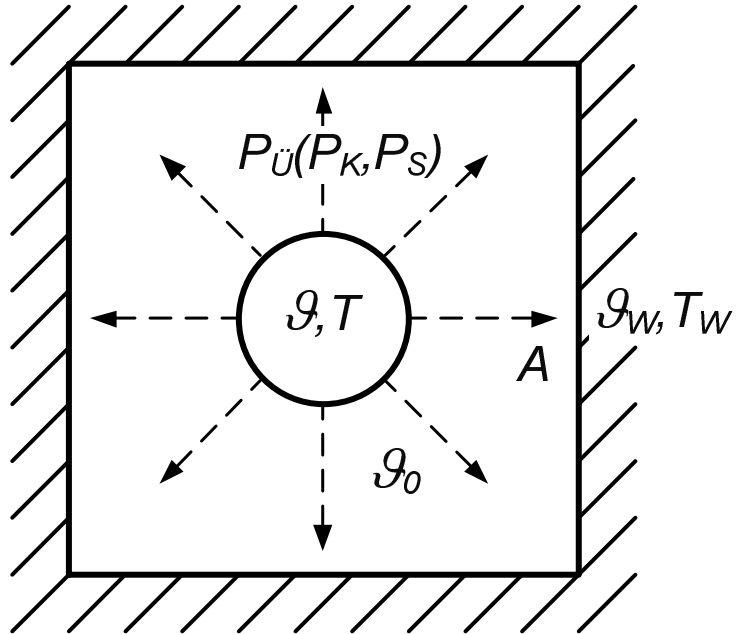
Stromverdrängungsfaktoren k_s für massive Rundleiter /5/



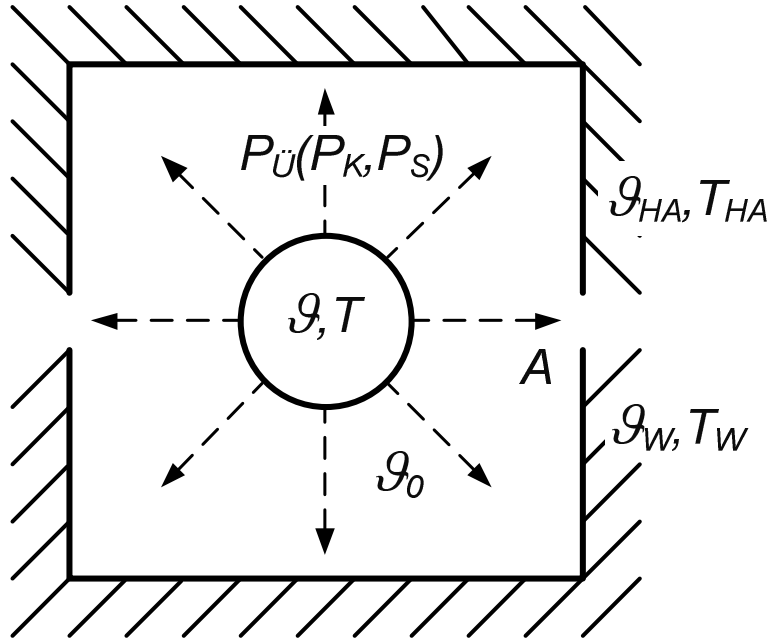
$$k_u = \frac{R_V}{R_{Sch}} = \frac{U_V}{U_{Sch}} = \frac{P_V}{P_{Sch}}$$

- R_V** - Widerstand der Verbindung
- R_{Sch}** - Widerstand des Schienenbezugsabschnitts
- U_V** - Spannung über der Verbindung
- U_{Sch}** - Spannung über dem Schienenbezugsabschnitt
- P_V** - Verlustleistung der Verbindung
- P_{Sch}** - Widerstand der des Schienenbezugsabschnitts

Gütefaktor k_u von Kontaktstellen /5/



Wärmeübergang


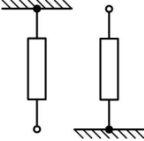
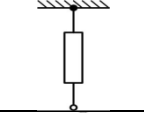
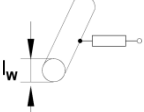
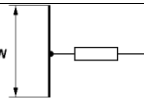


Abstrahlung zur Wand und zu den höheren atmosphärischen Schichten (HA) /5/

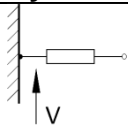
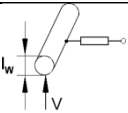
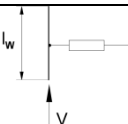
ϑ_m °C	$\lambda \cdot 10^2$ W/m K	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	$\beta \cdot 10^3$ 1/K	Pr -	$k_s \cdot 10^{-7}$ 1/K m ³	δ kg/m ³	c_p Ws/g K
0	2,41	13,50	3,65	0,718	14,264	1,276	1,0050
10	2,50	14,39	3,52	0,716	12,062	1,231	1,0053
20	2,56	15,32	3,40	0,715	10,267	1,189	1,0057
30	2,66	16,27	3,29	0,713	8,791	1,150	1,0062
40	2,71	17,24	3,19	0,712	7,569	1,113	1,0067
50	2,78	18,23	3,09	0,711	6,551	1,079	1,0072
60	2,86	19,24	3,00	0,710	5,698	1,047	1,0078
70	2,93	20,27	2,91	0,709	4,979	1,016	1,0085
80	3,00	21,32	2,83	0,708	4,369	0,987	1,0093
90	3,07	22,39	2,76	0,707	3,849	0,960	1,0102
100	3,14	23,48	2,68	0,706	3,405	0,934	1,0112

c_p – Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck

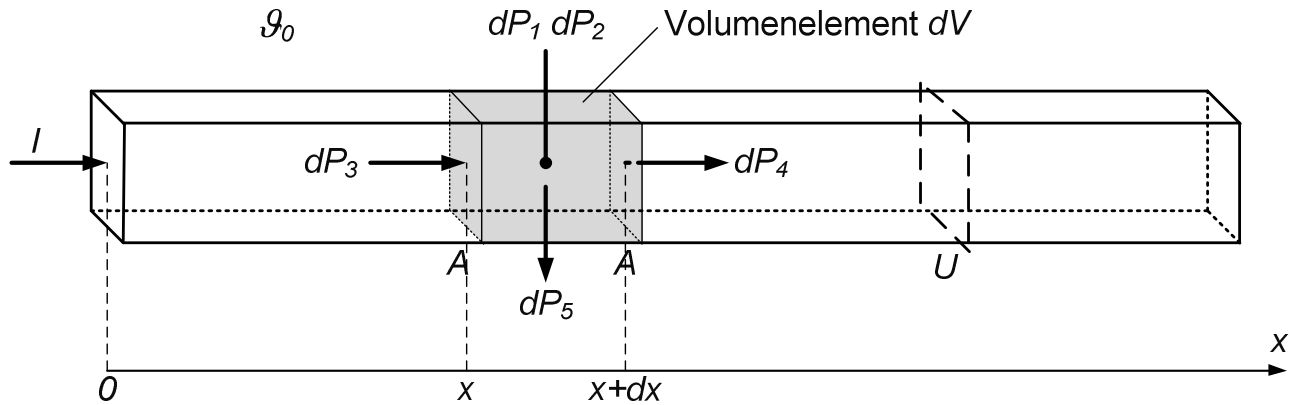
Thermische Stoffwerte für Luft bei Normaldruck (1 bar) /5/

Grundanordnung	Beispiel	Symbol	Berechnungsgrundlagen
senkrechte Wand	Zellenseitenwände innen und außen		$Nu = 0,15 (Gr Pr)^{1/3}$ $1,7 \cdot 10^8 < Gr Pr < 2 \cdot 10^{10}$
waagerechte Wand, Wärmeabgabe nach oben, Wärmeaufnahme von unten	Zellendach innen und außen		$Nu = 0,17 (Gr Pr)^{1/3}$ $2,3 \cdot 10^8 < Gr Pr < 1,1 \cdot 10^9$
waagerechte Wand, Wärmeabgabe nach unten	Kanalboden außen		$Nu = 0,095 (Gr Pr)^{1/3}$ $1,3 \cdot 10^8 < Gr Pr < 1,2 \cdot 10^9$
waagerechter Zylinder	Kabel und Rundleiter, horizontal verlegt		$Nu = 0,54 (Gr Pr)^{1/4}$ $5 \cdot 10^2 < Gr Pr < 2 \cdot 10^7$ $Nu = 0,13 (Gr Pr)^{1/3}$ $2 \cdot 10^7 < Gr Pr < 10^{13}$
Stromschiene waagrecht, hochkant	frei im Raum verlegt		$Nu = 0,6 (Gr Pr)^{1/4}$ $9 \cdot 10^4 < Gr Pr < 5 \cdot 10^6$

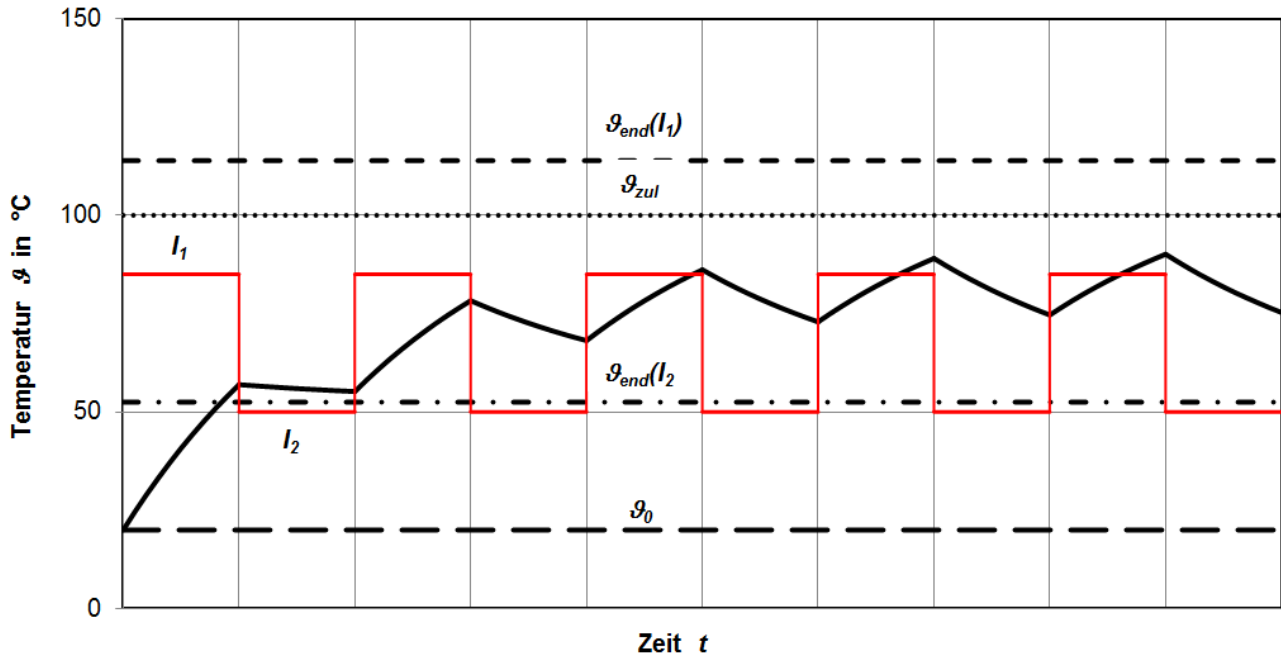
Ähnlichkeitsfunktionen ausgewählter Elemente bei freier Konvektion /5/

Grundanordnung	Beispiel	Symbol	Berechnungsgrundlagen
längs angeströmte Wand	Kanalwand einer zwangsgekühlten, gekapselten Strombahn		$Nu = 0,16 Re^{0,66}$ $Re^* = 0,91 (Gr Pr)^{0,5}$ $Re' < 10^5$
Zylinder quer angeströmt	Einfluss des Windes auf freiluftverlegtes Kabel oder Leiterseil		$Nu = 0,17 Re^{0,62}$ $Re^* = 6,97 (Gr Pr)^{0,403}$ $Re' < 10^4$
Stromschiene waagrecht, hochkant	zwangsgekühlte Stromschiene		$Nu = 0,4 Re^{0,6}$ $Re^* = 2,25 (Gr Pr)^{0,42}$ $Re' < 4,2 \cdot 10^4$

Ähnlichkeitsfunktionen ausgewählter Elemente bei erzwungener Konvektion /5/



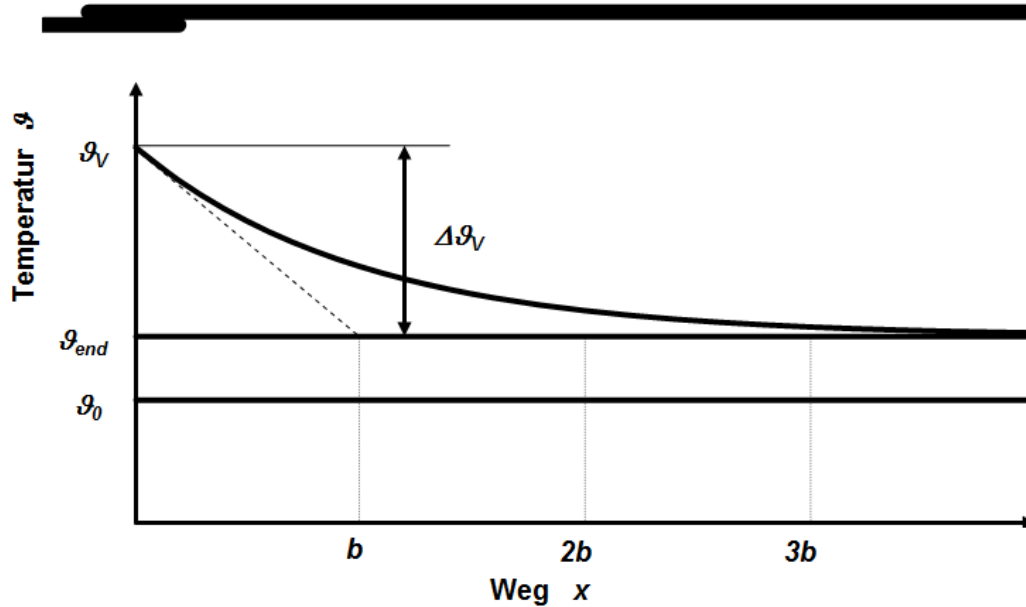
**Leistungsbilanz eines homogenen, linienhaften Leiters $A_x = A_{x+dx} = A$
für das Volumenelement $dV = A dx / \epsilon$**



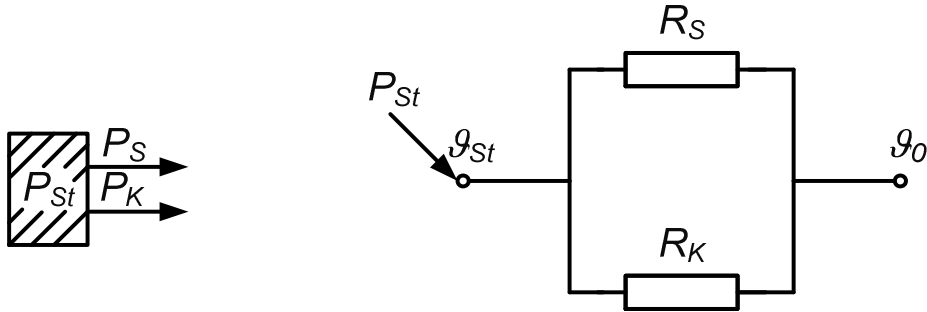
Beispiel für Wärmebelastungszyklus

Verbindungs-
stelle (Heißpunkt)

Leiter



Temperaturverlauf an einer Verbindungsstelle (Wärmequelle) /5/



P_{St} - Verlustleistung

P_S - (Verlust-)Leistungsabgabe durch Strahlung

P_K - (Verlust-)Leistungsabgabe durch Konvektion

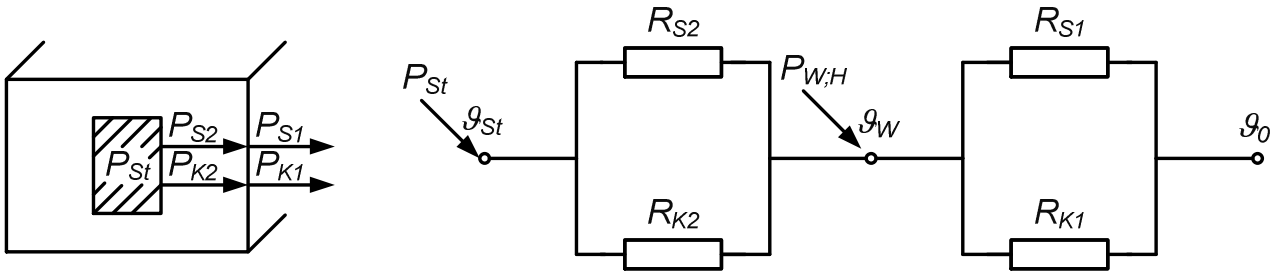
ϑ_{St} - Stromschiementperatur

ϑ_0 - Umgebungstemperatur

R_S - Wärmeübergangswiderstand für Strahlung $R_S = \frac{\vartheta - \vartheta_W}{P_S} = \frac{1}{\alpha_S \cdot O_S}$; $\vartheta_W \approx \vartheta_0$

R_K - Wärmeübergangswiderstand für Konvektion $R_K = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{P_K} = \frac{1}{\alpha_K \cdot O_K}$

Wärmenetzmethode für Stromschiene frei im Raum /5/



- P_{St} - in der Stromschiene erzeugte Verlustleistung
- $P_{W,H}$ - in der Kanalwand durch Wirbelströme und Hysterese erzeugte Verlustleistung
- P_{S1}, P_{S2} - durch Strahlung abgeführte Wärmeleistungen
- P_{K1}, P_{K2} - durch Konvektion abgeführte Wärmeleistungen
- R_{S1}, R_{S2} - Wärmeübergangswiderstände für Strahlung
- R_{K1}, R_{K2} - Wärmeübergangswiderstände für Konvektion
- ϑ_{St} - Stromschiementemperatur
- ϑ_W - Wandtemperatur
- ϑ_0 - Umgebungstemperatur

Wärmenetzmethode für Stromschiene frei im Metallkanal /5/