

# **Berechnung eines berippten Kühlkörpers**

Von  
Franz Adamczewski

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
Rechengang .....	4
<b>Stoffwerte</b>	<b>4</b>
<b>Kühlkörper</b>	<b>4</b>
<b>Kennzeichnende Abmessung</b>	<b>5</b>
<b>Wärmequellen</b>	<b>5</b>
<b>Grashof - Nußelt - Reynolds</b>	<b>5</b>
<b>Wärmeübergangskoeffizient</b>	<b>7</b>
<b>Wärmeleitwerte</b>	<b>8</b>
<b>Schlußbemerkung</b>	<b>9</b>

# Einleitung

**Zur Berechnung eines berippten Kühlkörpers für natürliche Konvektion ist es erforderlich die Temperaturverhältnisse am Kühlkörper zu bestimmen. Die Umgebungstemperatur ist meist durch die Anwenderspezifikation vorgegeben.**

**Die mittlere Wandtemperatur des Kühlkörpers muß abgeschätzt werden. Sie ist abhängig von Anzahl und Größe der Wärmequellen und den Abmessungen des Kühlkörpers. Man geht von der zulässigen Temperatur des Hotspots aus und rechnet je nach Verhältnissen 10 bis 25% ab.**

**Bei Verwendung von Rechenprogrammen bietet es sich an mehrere Temperaturdifferenzen zwischen Wand und Umgebung iterativ durchzurechnen. So ergibt sich ein guter Überblick über die Abhängigkeit des Wärmewiderstandes von der Verlustleistung.**

**Die Lufttemperaturerhöhung durch die Aufnahme der Verlustleistung kann in erster Näherung vernachlässigt werden, so daß die mittlere Lufttemperatur gleich der Umgebungstemperatur gesetzt wird.**

**Zur Ermittlung der Grashof- bzw. Reynoldszahl ist die charakteristische Abmessung zu ermitteln. Ist der Rippenabstand größer als das Doppelte der zu erwartenden Grenzschichtdicke wird die Länge in Strömungsrichtung zur Berechnung herangezogen. Bei den in der Elektronik verwendeten Kühlkörpern sind die Rippenabstände meist kleiner als die Grenzschichtdicke. Daher muß von einer Rohrströmung zwischen den Rippen ausgegangen werden, wobei als charakteristische Abmessung der hydraulische Durchmesser eingesetzt wird.**

**Die Länge des Kühlkörpers ist zur Bestimmung der konvektiven Luftströmung maßgebend. In Rechenprogrammen kann sie als zweiter Iterationspfad vorgesehen werden. Die Breite des Kühlkörpers geht erst zum Schluß in die Rechnung ein, um den Gesamtwärmewiderstand des Kühlkörpers zu bestimmen.**

# Rechengang

- 1) Die Umgebungstemperatur (Luft Eintrittstemperatur) wird festgelegt:  $T_u = 30^\circ\text{C}$
- 2) Es gibt eine Wärmequelle und sie läßt eine max. Kühlkörpertemperatur zu:  $T_k = 100^\circ\text{C}$

Die mittlere Wandtemperatur schätzen wir auf  $80^\circ\text{C}$ . Damit errechnet sich nach Formel (S2) die Bezugstemperatur für die Stoffwerte zu  $55^\circ\text{C}$ .

## Stoffwerte

Damit werden die Stoffwerte der Luft bestimmt:

- 1) Dichte (S4)  $1,076 \text{ kg / m}^3$
- 2) kinematische Viskosität (S5+S6)  $1,84 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- 3) Wärmeleitfähigkeit (S7)  $0,028 \text{ W/m/K}$
- 4) Wärmekapazität (S8)  $1,008 \text{ kJ/kg/K}$
- 5) Prandtlzahl (S9)  $0,709$

## Kühlkörper

Die Stoffwerte des Kühlkörpermaterials sind nicht relevant temperaturabhängig. Sie können den einschlägigen Tabellen entnommen werden.

Strangpreßkühlkörper werden üblicherweise aus AlMgSi0,5 mit einer Dichte von  $2700 \text{ kg/m}^3$  hergestellt.

Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 200 bis  $220 \text{ W/m/K}$

Die Wärmekapazität ist  $879 \text{ W*s/kg/K}$

Für diese Beispielrechnung wird ein PR-176 von Fa. Alutronic mit einer Länge von 100 mm ausgewählt.

Seine Höhe beträgt Boden 15 mm + Rippen 35 mm = 50 mm. Auf einer Breite von 116,8 mm hat er 11 Rippen.

Die Rippen haben am Fuß 5,5 mm und an der Spitze 3 mm. Daraus ergibt sich mit  $3/4$  Fuß +  $1/4$  Spitze eine mittlere Rippendicke von 4,88 mm.

Die Rippenteilung beträgt 11,15 mm und der mittlere Rippenabstand 6,3 mm

### Kennzeichnende Abmessung

Zur Berechnung der Nußelt- und Reynoldszahl muß die kennzeichnende Abmessung festgelegt werden. Bei den meisten Kühlkörpern kann man davon ausgehen, daß der Rippenabstand kleiner als die sich einstellende doppelte Grenzschichtdicke ist. Damit scheidet die Kühlkörperlänge als kennzeichnende Abmessung aus. Man muß von einer einseitig offenen Rohrströmung zwischen den Rippen ausgehen; ihre kennzeichnende Abmessung ist der hydraulische Durchmesser  $dh = 4 \times \text{Medium-Querschnitt} / \text{benetzter Umfang}$ . Der Strömungsquerschnitt ist mittlerer Rippenabstand  $aR$  x Rippenhöhe  $hR$ :  $6,3 \times 35 = 219,6 \text{ mm}^2$ ; der einseitig offene Umfang ist  $2 \times \text{Rippenhöhe} + (\text{Rippenteilung} - \text{Rippendicke am Fuß})$ :  $2 \times 35 + (11,15 - 5,5) = 75,65 \text{ mm}$ . Damit ergibt sich der hydraulische Durchmesser zu  $11,6 \text{ mm}$ .

Bei einem Rippenhöhen- Abstands-Verhältnis  $>3$  muß noch eine Korrektur nach Idelchik eingeführt werden:  $35 / 6,3 = 5,6$  also  $>3$ . Der notwendige Korrekturfaktor ist  $0,82$  nach der Formel:

„

„

„

$$dh_{hh} = \frac{2}{3} + \frac{11}{24} \cdot \frac{aR}{hR} \cdot \left( 2 - \frac{aR}{hR} \right)$$

Die kennzeichnende Abmessung für diesen Kühlkörper beträgt also  $dh = 9,5 \text{ mm}$

### Wärmequellen

Zur Bestimmung der mittleren Kühlkörpertemperatur muß die Anzahl und Verlustleistung der Wärmequellen sowie Ihre Verteilung auf dem Kühlkörper ermittelt werden. Von dieser geschätzten Temperatur ist der Wärmeübergang Kühlkörper zu Luft abhängig.

Bei diesem Rechenbeispiel legen wir eine Wärmequelle zugrunde und schätzen die mittlere Kühlkörpertemperatur auf 20% unter Hotspot. Damit stehen  $50 \text{ K}$  als Temperaturdifferenz für den Wärmeübergang zur Verfügung.

### Grashof - Nußelt - Reynolds

Nach Formel (10) errechnet sich die Grashofzahl zu:

$$Gr = 9,807 \text{ m/s}^2 \times 0,1^3 \text{ m}^3 \times 50 \text{ K} / (1,84 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2) / 273 + 30^\circ\text{C} = 4,75 \times 10^6$$

Nachdem die Grashofzahl bekannt ist, kann die Grenzschichtdicke mit Formel (8) überprüft werden und die richtige kennzeichnende Abmessung eingesetzt werden. Bei  $11,3 \text{ mm}$  ist auf jeden Fall mit  $dh$  zu rechnen.

Die Nußeltzahl für die Bodenfläche des Kühlkörpers ergibt sich nach Formel (12):

$$\text{Nu}_B = 0,55 \times 4\text{-te Wurzel aus } (0,709 \times 4,75 \times 10^6) = 23,6$$

Die Reynoldszahl nach Formel (11) ergibt sich zu:

$$\text{ReL} = 2\text{-te Wurzel aus } (4,75 \times 10^6 / 2,5) = 1382 \quad (\text{turbulent ab } 3 \times 10^5)$$

Da die Grashofzahl mit der Länge gerechnet ist, muß die Reynoldszahl noch auf die kennzeichnende Abmessung  $dh$  umgerechnet werden:

$$\text{Red} = 1382 \times 9,5 \text{ mm} / 100 \text{ mm} = 131 \quad (\text{turbulent ab } 2300)$$

Da die Rippenseite als Rohrströmung anzusehen ist, muß auch die Grashofzahl mit dem hydraulischen Durchmesser berechnet werden. Der Faktor  $L^3$  wird zu  $L \times dh^2$ . Damit ist  $\text{Gr} = 4,47 \times 10^4$

Die Nußeltzahl für die Rippenseite beträgt damit:  $\text{Nu}_R = 7,3$ .

Bei laminaren Rohrströmungen müssen die Einlaufverhältnisse beachtet werden. Bei freihängenden Kühlkörpern spricht man von gleichzeitig strömungstechnischem und thermischem Anlauf.

Diese Anlaufstrecke errechnet sich zu  $L_a = 0,02 \times \text{Red} \times dh \sim 25 \text{ mm}$ . In diesem Bereich kommt die oben errechnete Nußeltzahl voll zum Tragen. Die Restlänge des Kühlkörpers kann dann mit dem Grenzwert der Nußeltzahl für laminare Rohrströmungen  $\text{Nu} = 3,66$  gerechnet werden. Das beinhaltet die nachstehende Formel:

(Andernfalls muß mit der Nußeltzahl nach Hell S.67 (74) gerechnet werden - mit  $L$  werden aber die Werte viel zu gut!)

$$(H74) \quad \text{Pe}_{i,j} = \text{Red}_{i,j} \cdot \text{Prandtl}_i \cdot \frac{dh}{L_j}$$

$$\text{Nudh}_{i,j} = \left[ 3.66 + \frac{0.0677 \cdot (\text{Pe}_{i,j})^{1.33}}{1 + 0.1 \cdot (\text{Pe}_{i,j})^{0.83} \cdot (\text{Prandtl}_i)^{0.17}} \right]$$

## Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$

Zur Berechnung werden drei Wärmeübergangskoeffizienten benötigt - nach Formel (13).

1. für die Rippenseite 2. für Boden und Seitenteile 3. für die Strahlung

Der Wärmeleitwert der Luft  $\lambda = 0,028 \text{ W/m/K}$

1. In erster Näherung genügt es mit  $Nu_R = 7,3$  zu rechnen und später nur die Anlaufstrecke zu berücksichtigen. Damit ist zwischen den Rippen  $\alpha_R = Nu_R \times \lambda / dh = 21,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$

2. für Bodenseite  $\alpha_B = Nu_B \times \lambda / L = 6,6 \text{ W/m}^2/\text{K}$

3. Hier muß geprüft werden ob überhaupt Strahlung stattfindet - Temperatur der Teile in der näheren Umgebung. Formel (6) geht davon aus, daß der Kühlkörper frei im Raum mit Umgebungstemperatur hängt und daß er schwarz eloxiert ist. Gerechnet wird mit  $\varepsilon = 0,6$  und es ergibt sich ein  $\alpha_{str} = 4,86 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Auf der Rippenseite ist es zweckmäßig den Wärmeübergang einer Rippe auf die Bodenplatte zu beziehen; d.h. auf der Rippenseite hat der Boden zwischen den Rippen den Wärmeübergang von  $\alpha_R$ , während er im Bereich des Rippenfußes den mit der Stabformel berechneten Koeffizienten  $\alpha_R'$  erhält.

$$\alpha_R' = mr \times \lambda_{Al} \times \tanh(mr \times h)$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Rippe:  $\lambda_{Al} = 200$  bis  $220 \text{ W/m/K}$  Die Rippenhöhe  $h = 35 \text{ mm}$

Der Rechenfaktor  $mr$  nach Formel (20) wird mit  $\alpha_R$  und  $\lambda_{Al}$  berechnet; der Umfang  $U = 2 \times L$  und der Querschnitt  $A = L \times$  mittlere Rippendicke. Damit ist  $mr = 6,5/\text{m}$

Damit ist der auf den Rippenfuß bezogene Wärmeübergangskoeffizient einer Rippe  $\alpha_R' = 319 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Die Rippenteilung ist  $t_R = 11,15 \text{ mm}$ . Die Rippendicke am Rippenfuß ist  $d_R = 5,5 \text{ mm}$

Die Bodenplatte hat auf der Rippenseite den Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{BR}$ :

$$\alpha_{BR} = \alpha_R' \times d_R / t_R + \alpha_R \times (1 - d_R / t_R) = 168 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

## Wärmeleitwerte

Mit den oben berechneten Wärmeübergangskoeffizienten werden jetzt die drei Wärmeleitwerte der Platte berechnet.

### 1. Rippenseite

Nachdem  $\alpha_R$  mit  $Nu_R$  gerechnet wurde, berechnet man den Leitwert  $S_R$  mit  $L = \text{Anlaufstrecke}$  zu

$$S_R = \alpha_{BR} \times \text{Kühlkörperbreite} \times \text{Anlaufstrecke} = 168 \text{ W/m}^2/\text{K} \times 116,8 \text{ mm} \times 27 \text{ mm} = 0,54 \text{ W/K}$$

### 2. Bodenseite und Seitenteile

Es muß geprüft werden, inwieweit die Bodenseite des Kühlkörpers am Wärmeübergang beteiligt ist, oder ob durch die Montage von Bauteilen die Luftkonvektion unterbrochen bzw. nicht stattfindet. In diesem Fall müssen Teile der Bodenfläche Breite x Länge von der Berechnung ausgenommen werden.

In diesem Beispiel gehe ich davon aus, daß Konvektion nur an den Seitenteilen stattfindet:

$$S_B = \alpha_B \times 2 \times \text{Höhe} \times \text{Länge} = 6,6 \text{ W/m}^2/\text{K} \times 2 \times 0,05 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} = 0,067 \text{ W/K}$$

### 3. Strahlung

Hier muß geprüft werden ob überhaupt Strahlung stattfindet - Temperatur der Teile in der näheren Umgebung - und welche Flächen für die Strahlung in Frage kommen.

In diesem Beispiel gehe ich davon aus, daß nur die Rippenseite und die Seitenteile strahlen und daß der Kühlkörper frei im Raum hängt. Gerechnet wird mit  $\alpha_{str} = 4,86 \text{ W/m}^2/\text{K}$

$$\Sigma_{\Sigma} = \alpha_{str} \times \text{Strahlungsumfang} \times \text{Länge} = 4,86 \text{ W/m}^2/\text{K} \times 0,217 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} = 0,105 \text{ W/K}$$

Diese drei Wärmeleitwerte können zum Gesamtleitwert = 0,71 W/K addiert werden. Der Reziprokwert ist der Wärmewiderstand des Kühlkörpers von 1,4 K/W bei der vorgegebenen mittleren Temperaturdifferenz von 50 K, was etwa einer abgeführten Verlustleistung von 38 W entspricht.

Im Labor vermessen wurde dieser Kühlkörper mit 55 W Verlustleistung, wobei sich eine Temperaturdifferenz von 74 K einstellte.



### Schlußbemerkung

Dieses Rechenbeispiel sollte den Rechengang aufzeigen, der notwendig ist, um einen Rippenkühlkörper möglichst praxisnah zu berechnen. Es geht daraus hervor, daß der richtigen Einschätzung von verschiedenen Randbedingungen wesentliche Bedeutung zukommt.

Wichtig ist die Wahl der mittleren Kühlkörpertemperatur. Man kann sich mittels der Stabgleichungen Anhaltspunkte schaffen, indem man nach der ersten Durchrechnung von der Wärmequelle ausgehend sich Leitstäbe denkt, den zugehörigen m-Faktor nach Formel(20) berechnet und damit die Temperaturen in den Ecken des Kühlkörpers berechnet und damit einen Mittelwert bildet. Das Verfahren ist nicht sehr genau und würde den Umfang dieses Artikels sprengen.

Übertemperatur am Stabende  
 $\Delta\theta_A$  = Temperatur am Stabanfang  
m = m-Faktor (20) L = Stablänge

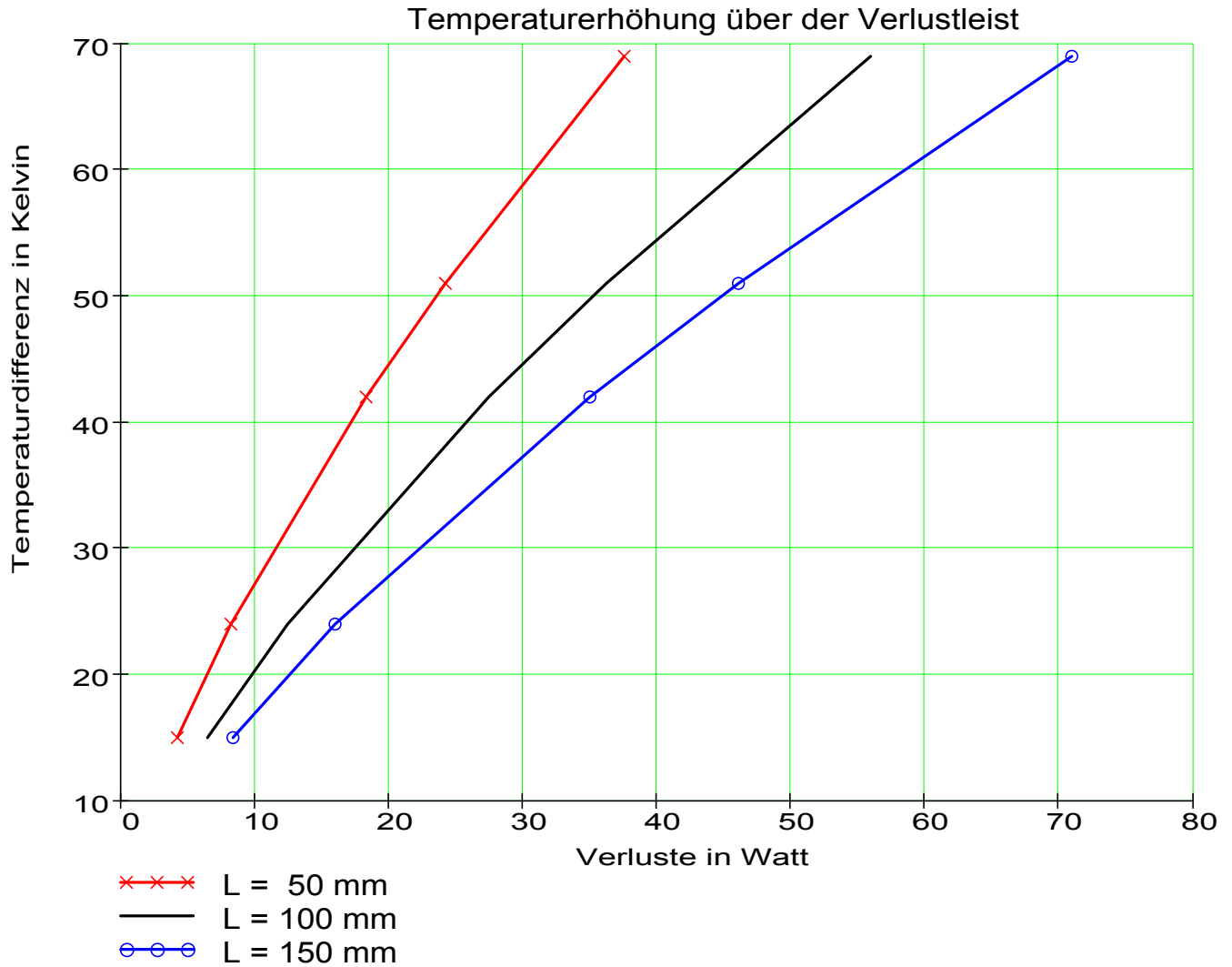
$$\Delta\theta_E = \frac{\Delta\theta_A}{\cosh(m \cdot L)}$$

Als Weiteres ist wichtig die Strömungsverhältnisse richtig einzuschätzen; also die Anlaufbedingungen genau zu betrachten. Die Formel für die strömungstechnische Anlaufstrecke wird in der Literatur mal mit dem Faktor 0,02 und mal mit 0.06 angegeben. Die Wahrheit liegt wohl dazwischen. Außerdem stimmt die Leitwertberechnung mit dieser Anlaufstrecke nur bei höheren Temperaturdifferenzen mit der Praxis überein; bei kleinen Differenzen < 40 K sind die Werte zu niedrig.

Bei den modernen computergestützten thermischen Simulationen kann man sich die Fehler bei der Einschätzung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse ersparen. Ich werde später noch auf die Simulation eingehen. Wichtig ist trotzdem, daß man anhand obigen Rechengangs ein Gefühl für die verschiedenen Einflußgrößen bekommt, um die Vorgaben für eine richtige Simulation entsprechend genau eingeben zu können.

Auf der folgenden Seite finden Sie noch den Ergebnisausdruck meiner MathCad-Berechnung.

K



Strahlungsanteil im freien Raum: bei 0.6

Wärmewiderstand:

TL 30 Grad\_C

bei L = 50 100 150 mm

deltaT<sub>i</sub>

Verlustleistung:

x	Strahlungsanteil			%	R <sub>th</sub>	Wärmewiderstand			K/V	deltaT <sub>i</sub>	Verlustleistung			W
	bei 0.6	bei L = 50	bei L = 100			bei L = 150	15	24			42	51	69	
	19	26	31			3.55	2.32	1.79			4.2	6.5	8.4	
	15	21	26			2.92	1.93	1.5			8.2	12.5	16	
	13	18	21			2.29	1.53	1.2			18.3	27.5	35	
	12	17	20			2.11	1.41	1.11			24.2	36.2	46.1	
	12	16	19			1.84	1.23	0.97			37.6	56	71	

Anzahl der nebeneinander liegenden Wärmequellen: AZWQ 1