

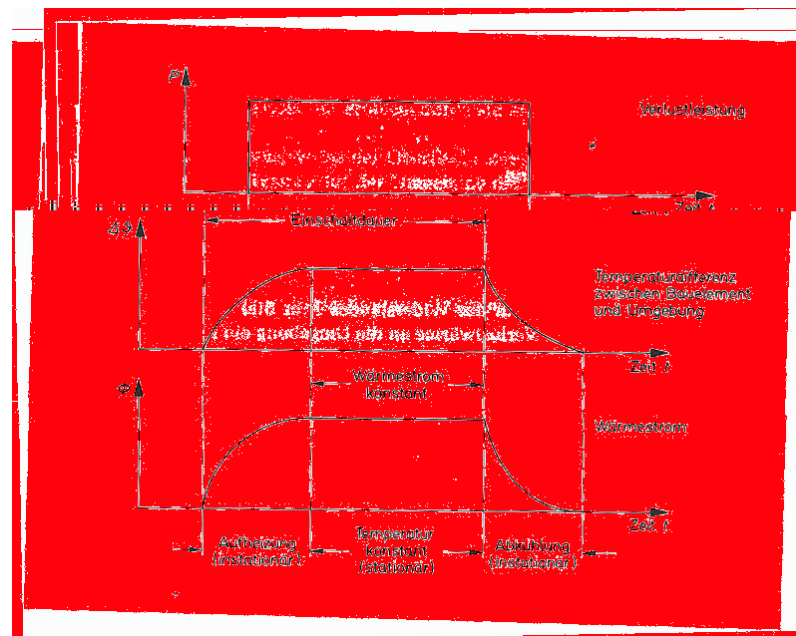
Wärmeableitung

Die Temperatur beeinflusst die Ausfallrate elektronischer Bauelemente. Eine Halbierung der Betriebstemperatur reduziert die Ausfallrate um den Faktor 5 bis 10. Daher müssen elektronische Geräte auch in thermischer Hinsicht sorgfältig dimensioniert werden.

1) Verlustleistung und Temperatur

Während der Einschaltdauer wird die Verlustleistung $P = I^2 \cdot R = U^2/R$ eines Bauteils in Wärme umgesetzt. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ des Bauelements gegenüber der umgebenden Luft. Durch die Temperaturdifferenz entsteht der Wärmestrom Φ zwischen der Oberfläche des Bauelements und der Umgebung.

Während der Aufheizphase nimmt der Wärmestrom Φ proportional zur Temperaturdifferenz zu. Im stationären Zustand wird die Verlustleistung P als Wärmestrom Φ vollständig abgeführt. Die Temperaturdifferenz bleibt konstant. In der Abkühlphase nimmt der Wärmestrom Φ proportional zur Temperaturdifferenz ab.



Leistung P , Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ und Wärmestrom Φ eines Bauteils

Die Wärmeabfuhr von einem Bauelement erfolgt durch:

- * Konvektion
- * Wärmeleitung
- * Wärmestrahlung

2) Konvektion

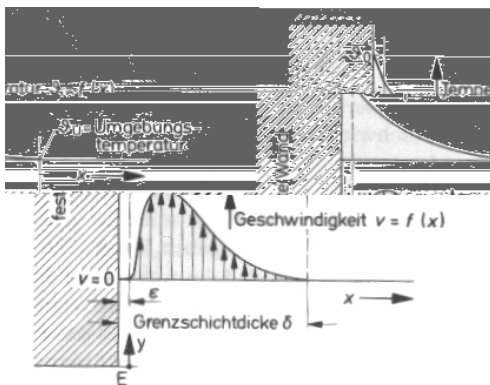
Unter Konvektion versteht man den Wärmeübergang von der Oberfläche fester Körper zu Gasen oder Flüssigkeiten. Man unterscheidet zwischen natürlicher (freier) und erzwungener Konvektion.

natürliche Konvektion

Durch die Temperaturdifferenz $\vartheta_o - \vartheta_u$ wird die Luft erwärmt. Die warme Luft steigt auf und führt die thermische Energie ab. Es entsteht eine Luftströmung.

erzwungene Konvektion

Die Luftströmung wird durch ein Gebläse erzwungen. Die Wirksamkeit der Wärmeabfuhr wird dadurch vergrößert.



Freie Konvektion an einer senkrechten, beheizten Wand:

An einer senkrechten, beheizten Wand haftet eine dünne Luftschicht mit der Dicke ε und der Geschwindigkeit $v = 0$). In ihr findet ein reiner Wärmeleitvorgang statt. Die Temperatur nimmt linear ab.

Mit zunehmendem Abstand von der Wand nehmen die Temperatur ϑ und die Strömungsgeschwindigkeit v der Luft infolge der Konvektion den dargestellten Verlauf.

Außerhalb der Grenzschicht mit der Dicke δ findet keine Konvektion statt.

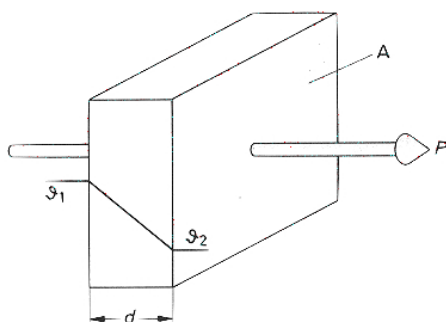
Die Dicke der Grenzschicht δ beträgt bei freier Konvektion ($\delta_u = 20^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta \leq 60\text{ K}$) ca.:

$\delta_{\max} \approx 1\text{ cm}$	für Plattenhöhe $H = 5\text{ cm}$
$\delta_{\max} \approx 1\text{ bis }1,5\text{ cm}$	für Plattenhöhe $H = 10\text{ cm}$
$\delta_{\max} \approx 1,5\text{ bis }2\text{ cm}$	für Plattenhöhe $H = 50\text{ cm}$

Für einen günstigen Strömungsverlauf bei Kühlrippen oder Leiterplatten soll der gegenseitige Abstand $a \geq (1\text{ bis }1,5) \delta_{\max}$ sein.

3) Wärmeleitung

Durchfließt ein konstanter Wärmestrom P eine Wand, ergeben sich an den beiden Oberflächen die Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 .





P	Wärmestrom in W
λ	Wärmeleitfähigkeit in W/m.K
A	Fläche in m ²
d	Dicke in m
ϑ_1, ϑ_2	Temperaturen in K oder °C
R_{thL}	Wärmeleitwiderstand

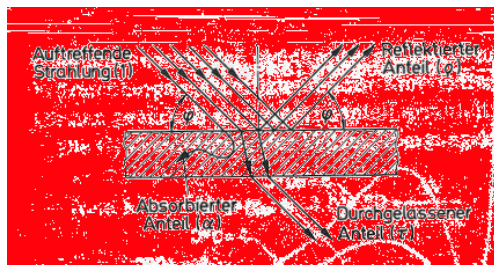
Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe:

Stoff	
Kupfer	372 W/m.K
Aluminium	230 W/m.K
Stahlblech	59 W/m.K
Aluminiumoxid	10 W/m.K
Glimmer	0,3 ... 0,6 W/m.K
Luft	0,257 W/m.K

4) Wärmestrahlung

Für die Wärmestrahlung gelten folgende physikalische Regeln:

- Ein warmer Körper sendet Wärmestrahlen aus.
- Ein kalter Körper nimmt Wärmestrahlen auf.
- Wärmestrahlen unterliegen dem Gesetz der Optik, d.h. sie breiten sich geradlinig aus und werden beim Auftreffen auf einen Körper teilweise reflektiert, absorbiert oder auch durchgelassen.



Absorbierte Strahlung wird wieder in Wärmeenergie zurückgeführt. Im stationären Betrieb ist die absorbierte Energie gleich der emittierten Energie. Für das Absorptions- bzw. das Emissionsvermögen ist nur die Beschaffenheit der Oberfläche wichtig. Besonders geeignet sind mattschwarze Oberflächen. Bei Kühlkörpern wird dies durch Lackieren, Oxidieren oder Eloxieren erreicht.

5) Thermischer Widerstand

Die Sperrschichttemperatur eines Transistors ist dann niedrig, wenn sich dem Energietransport durch den Wärmestrom $\Phi = P$ nur ein kleiner thermischer Widerstand R_{th} entgegenstellt.



$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz in K
P	Wärmestrom, Verlustleistung in W
R_{th}	thermischer Widerstand in K/W

Analogie:

Spannungsdifferenz
 $U_1 - U_2 = I \cdot R$

Temperaturdifferenz
 $\vartheta_1 - \vartheta_2 = P \cdot R_{th}$

6) Wärmeableitung bei Widerständen

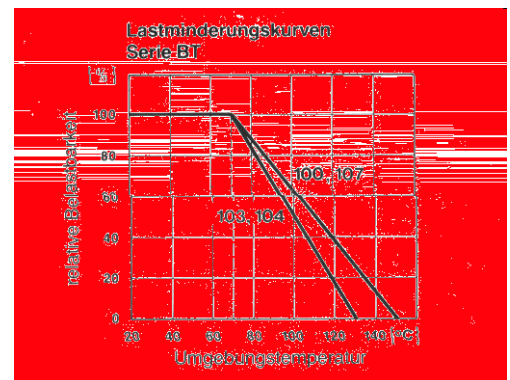
Die Wärmeableitung bei Widerständen erfolgt durch:

- > Konvektion
- > Wärmeleitung über die Anschlussdrähte
- > Wärmestrahlung (bei Hochlastwiderständen)

Die Nennbelastbarkeit eines Widerstandes ist im Datenblatt angegeben. Sie gilt meist bei 70°C Umgebungstemperatur (P_{70}). Bei Umgebungstemperaturen über 70°C ist die Belastung lt. Lastminderungsdiagramm zu reduzieren. Tatsächlich sollte aber die zulässige Belastbarkeit nicht ausgenutzt werden. In der Praxis ist es üblich, immer den Widerstand der nächst höheren Wattzahl zu verwenden.

Im Datenblatt ist angegeben:

$P_{70} = 0,25 \text{ W}$ (Nennbelastbarkeit)
 $T = -55/125^\circ\text{C}$ (Temperaturbereich)
 $R_{th} = 220 \text{ K/W}$ (thermischer Widerstand)



Lastminderungsdiagramm

7) Wärmeableitung bei Halbleiterbauelementen

Die maximale Sperrschichttemperatur ist bei Halbleitern begrenzt. Sie beträgt bei Germanium 75°C - 90°C und Silizium 150°C - 200°C. Die genauen Werte sind in den Datenblättern angegeben.

Die Ursache der Sperrschichttemperatur ist die Verlustleistung P . Der größte Teil der Verlustleistung entsteht durch den Kollektorstrom und die Kollektor-Emitterspannung, der kleinere Teil durch den Basisstrom und die Basis-Emitterspannung.

$$P = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B$$

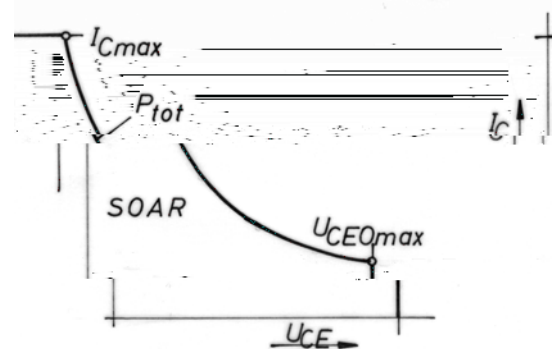
U_{BE} und I_B sind im Verhältnis zu U_{CE} und I_C klein. Sie können bei Transistoren kleiner Leistung meist vernachlässigt werden. Dann gilt:

$$P \approx U_{CE} \cdot I_C$$

Der sichere Betriebsbereich eines Transistors ist durch drei Grenzbereiche eingeschränkt:

- maximale Verlustleistung P_{tot}
- maximaler Kollektorstrom I_{Cmax}
- maximale Kollektorspannung U_{CEmax} (meist U_{CEO})

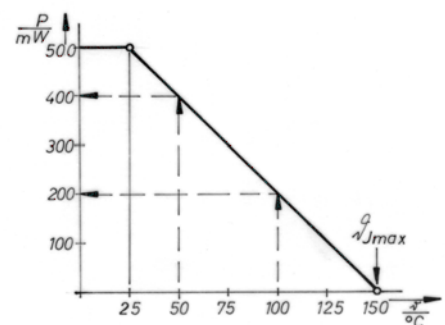
Trägt man die Grenzbereiche in das Ausgangs-Kennlinienfeld des Transistors ein, erhält man das SOAR-Diagramm. (SOAR: Save Operating Area)



Soar-Diagramm

7.1) Thermischer Widerstand R_{thJU} bei Transistoren kleiner Leistung

Bei Transistoren kleiner Leistung erfolgt die Wärmeabfuhr über die Transistoroberfläche. Da kein Kühlkörper verwendet wird ist die Transistoroberfläche klein. Das Gehäuse des Transistors ist meist aus Kunststoff und ein schlechter Wärmeleiter. Dem Wärmestrom P stellt sich ein großer thermischer Widerstand R_{thJU} entgegen.

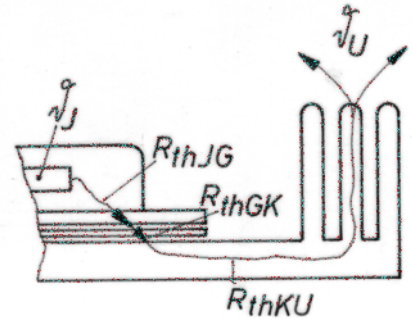


Lastminderungsdiagramm

Übersteigt die Sperrschichttemperatur die zulässigen Grenzwerte, wird der Transistor zerstört. Daher muss das Lastminderungsdiagramm beachtet werden.

7.2) Thermischer Widerstand bei Transistoren großer Leistung

Bei Transistoren großer Leistung reicht die Transistoroberfläche zur Wärmeabfuhr nicht mehr aus. Sie wird mit einem Kühlkörper vergrößert. Der Wärmetransport erfolgt zunächst mittels Wärmeleitung von der Sperrschicht an die Oberfläche des Kühlkörpers, dann durch Konvektion an die Umgebung. Der Anteil der Wärmestrahlung an der Wärmeabfuhr ist durch die niedrigen zulässigen Temperaturen klein.



R_{thJU} wird bei der Berechnung vernachlässigt

R_{thJG} innerer Wärmewiderstand des Halbleiters in K/W.
Angaben siehe Datenblatt des Halbleiterherstellers.

R_{thGK} Kontaktflächenübergangswiderstand zwischen Transistorgehäuse und Kühlkörper in K/W.

Richtwerte:	
trocken	0,2 K/W
mit Wärmeleitpaste	0,1 K/W
Glimmerscheibe und Wärmeleitpaste	0,4 - 0,9 K/W
Kunststoffscheibe und Wärmeleitpaste	0,2 - 0,6 K/W

R_{thKU} Wärmewiderstand Kühlkörper in K/W. Werte siehe Kühlkörperdatenblatt!

Richtwerte:	
Strangkühlkörper	2 - 6 K/W
Fingerkühlkörper	5 - 10 K/W
Kühlstern	45 - 65 K/W

Richtwerte für Umgebungstemperaturen:	ϑ_U
offene Leiterplatte	30 bis 40°C
offenes Gehäuse	50 bis 60°C
geschlossenes Gehäuse	60 bis 70°C

Der thermische Widerstand R_{th} setzt sich zusammen aus den Teilwiderständen:

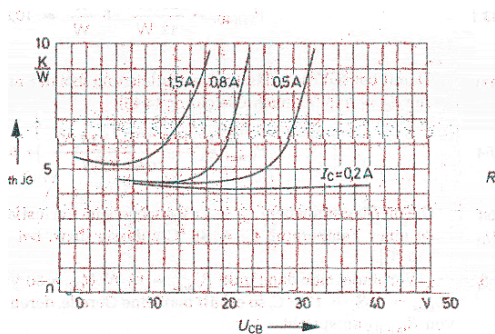
Der Wärmewiderstand R_{thJU} ist im Verhältnis zur Reihenschaltung der Widerstände $R_{thJG} + R_{thGK} + R_{thKU}$ groß und wird vernachlässigt. Durch Einsetzen erhält man aus der Formel $P \cdot R_{th} = \vartheta_J - \vartheta_U$ den gesuchten Wärmewiderstand R_{thKU} . Nach diesem Wert wird der Kühlkörper ausgesucht. Der Wärmewiderstand R_{thKU} des ausgewählten Kühlkörpers muss gleich oder kleiner als der Rechenwert sein.

7.3) Thermische Parallelschaltung mehrerer Transistoren

In vielen Fällen werden mehrere Transistoren auf einem gemeinsamen Kühlkörper montiert. Ihre thermischen Widerstände ergeben somit eine gemischte Reihenparallelschaltung. Die Berechnung erfolgt in Analogie zu den elektrischen Widerständen.



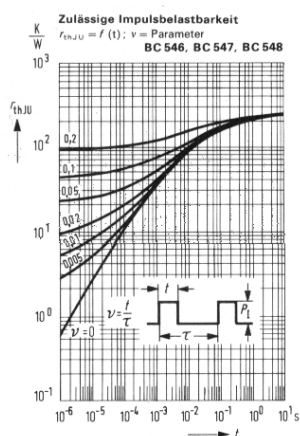
8) Spannungsabhängiger innerer Wärmewiderstand



Speziell bei Leistungstransistoren, die bei hohen Kollektorspannungen und mit großen Strömen arbeiten, tritt, obwohl die zulässige Grenzverlustleistung P_{tot} noch nicht erreicht ist, eine Zerstörung ein (sogenannter 2. Durchbruch).

Durch die hohen Spannungen dehnen sich die Sperrschichten aus und verringern den am Stromfluss beteiligten Querschnitt. Die Stromeinschnürung führt zu lokaler Erhitzung im Halbleiter.

9) Impulsbetrieb



Mit Transistoren können im Impulsbetrieb wesentlich größere Leistungen geschaltet werden, als dies im Dauerbetrieb zulässig ist. Dies ist zulässig, wenn die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit eine Überhitzung der Sperrschicht verhindern.

Zu beachten ist, dass eine Impulsdauer $t > 0,1s$ als Dauerbetrieb gilt.

ohne Kühlkörper: $P_i \cdot r_{thJU} = \Delta\vartheta$

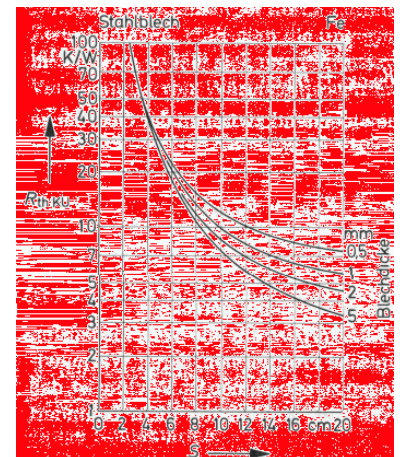
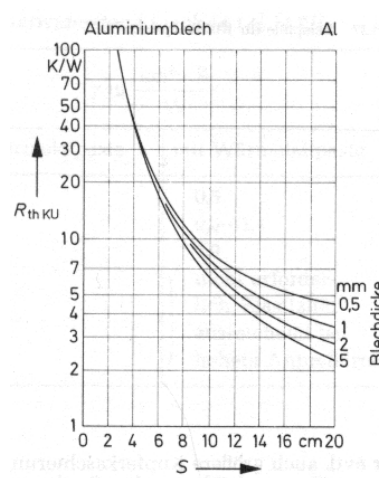
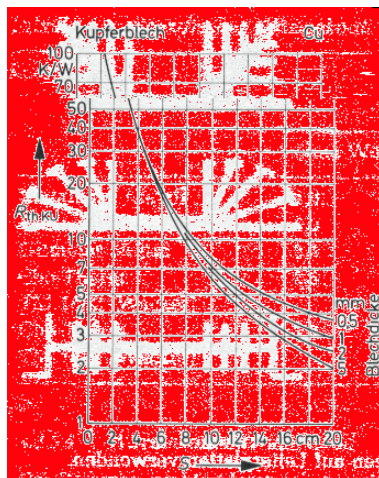
mit Kühlkörper: $P_i \cdot r_{thJG} + P(R_{thGK} + R_{thKU}) = \Delta\vartheta$

P ist der arithmetische Mittelwert von P_i

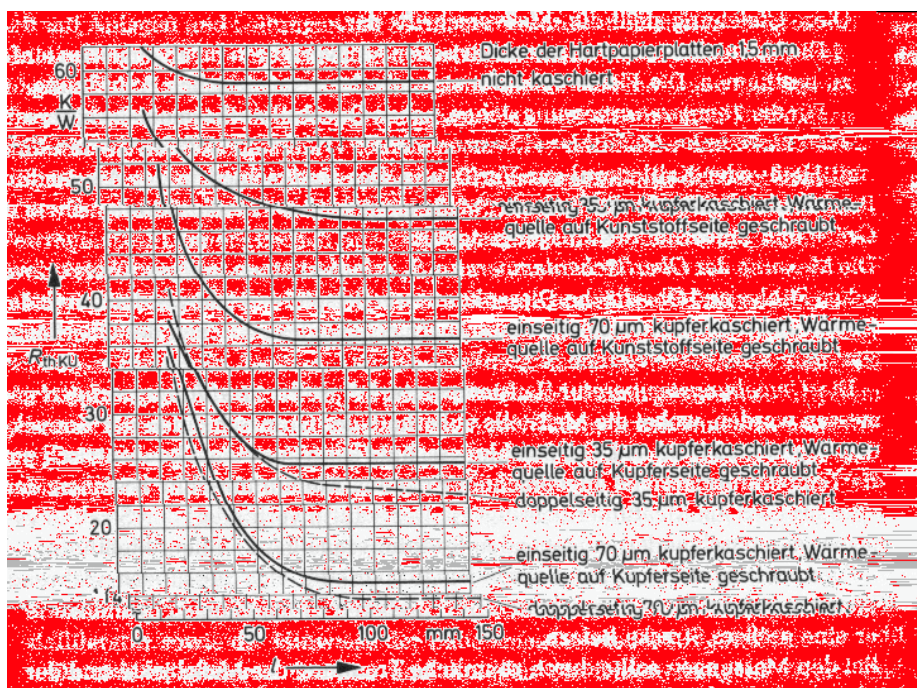
10) Kühlkörper

- Kühlprofile, Fingerkühlkörper, Kühlsterne:
Die Auswahl erfolgt nach dem R_{thKU} aus den Datenblättern.
- Kühlbleche:
Als Kühlkörper können auch Gehäuseteile, Rückwände, Alubleche usw. verwendet werden.

Das Diagramm zeigt die thermischen Widerstände blanker quadratischer Bleche bei senkrechter Anordnung. Bei waagerechter Anordnung muss die Fläche um den Faktor 1,3 größer gewählt werden. Bei geschwärzte Blechen kann die Fläche um den Faktor 0,7 verkleinert werden.



- Kupferflächen von Leiterplatten



Richtwerte für den Wärmewiderstand quadratischer, kupferkaschierter Hartpapierplatten

11) Rechenbeispiele

- a) Ein Transistor mit der Bauform TO3 wird mit einer Leistung von $P = 1 \text{ W}$ belastet. Er ist, durch eine Glimmerscheibe isoliert, auf einem Kühlkörper montiert. Berechne die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ an der Glimmerscheibe (0,05 mm dick, Ellipse 20 x 30). ($A = (\pi \cdot D1 \cdot D2)/4$)
Ergebnis: $\Delta\vartheta = 0.312 \text{ K}$
- b) Ermittle die zulässige Belastbarkeit eines Kohleschichtwiderstandes bei den Umgebungstemperaturen 70°C und 100°C .
Ergebnis: $70^\circ\text{C} \rightarrow 0,25 \text{ W}$ / $100^\circ\text{C} \rightarrow 0,11 \text{ W}$
- c) Der Transistor BC547B wird bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}$ betrieben und hat laut Datenblatt folgende Werte: $R_{thJU} = 250 \text{ K/W}$, $\vartheta_J = 150^\circ\text{C}$. Mit welcher Dauerleistung P_{tot} und welcher Impulsleistung P_i ($f = 1\text{kHz}$, Tastverhältnis 1ein : 3aus) kann dieser Transistor maximal betrieben werden?
- d) Berechne, mit welcher maximal zulässigen Leistung der Transistor BC 547 bei den Umgebungstemperaturen 50°C und 100°C betrieben werden darf.
Angaben lt. Datenblatt: BC 547 Bauform TO 92 $P_{tot} = 500 \text{ mW}$
 $T_J = 150^\circ\text{C}$ $R_{thJU} = 250 \text{ K/W}$
Ergebnis: 50°C : 0,4W , 100°C : 0,2W
- e) Mit welcher Leistung kann ein Spannungsregler 7815 ohne Kühlkörper belastet werden?
Ergebnis: 1,2 W
Datenblattangaben 7815: Bauform TO220 $\vartheta_U = 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_J = 120^\circ\text{C}$
 $R_{thJU} = 65 \text{ K/W}$ $R_{thJG} = 5 \text{ K/W}$
- f) Der Spannungsregler 7815 wird mit 2 W belastet. Wie groß muss die Cu-Fläche auf einer Leiterplatte sein, wenn sie als Kühlkörper verwendet werden soll?
Ergebnis: 35 x 35 mm
- g) In einem Netzgerät wird der Transistor 2N3055 als Längsregler verwendet. Am Transistor werden folgende Werte gemessen: $U_{CE} = 6 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ A}$. Berechne den R_{thKU} des Kühlkörpers bei Montage mit Glimmerscheibe und Wärmeleitpaste
Ergebnis: 4,8 K/W
Datenblattangaben 2N3055: Bauform TO3 $\vartheta_U = 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_J = 120^\circ\text{C}$ $R_{thJG} = 1,5 \text{ K/W}$
- h) Mit welcher Leistung kann der Transistor BC140 ohne bzw. mit Kühlstern belastet werden!
Ergebnis: 0,4 W/1 W
Datenblatt BC140: Bauform TO5 $\vartheta_U = 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_J = 120^\circ\text{C}$
 $R_{thJU} = 200 \text{ K/W}$ $R_{thJG} = 35 \text{ K/W}$ $R_{thKU} = 48 \text{ K/W}$ (Kühlstern)
- i) Die Leistung $P = 60 \text{ W}$ wird auf 3 Leistungstransistoren aufgeteilt. Berechne den thermischen Widerstand R_{thKU} des Kühlkörpers.
Ergebnis: 1,67 K/W
Datenblattangaben: $R_{thJG} = 0,6 \text{ K/W}$ $R_{thGK} = 0,4 \text{ K/W}$ $\vartheta_U = 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_J = 160^\circ\text{C}$
- j) An einem Transistor, der mit 50 W belastet ist und einen R_{thJG} von 0,5 K/W besitzt, wird 40°C Oberflächentemperatur gemessen. Wie hoch ist die Sperrschichttemperatur?
Ergebnis: 65°C
- k) In einer Schaltung ist der Transistor BD135 auf einem Kühlkörper mit einem $R_{thKU} = 20 \text{ K/W}$ montiert. Die Montage erfolgt ohne Glimmerscheibe, jedoch mit Wärmeleitpaste. Er wird mit 3,5 W belastet. Kontrolliere, ob die Berechnung für den Betrieb auf offener Leiterplatte ausreicht. Kann der Transistor auch in einem offenen Gehäuse betrieben werden?
Angaben lt. Datenblatt BD135: $R_{thJU} = 100 \text{ K/W}$ $T_{Jmax} = 150^\circ\text{C}$ $R_{thJG} = 10 \text{ K/W}$

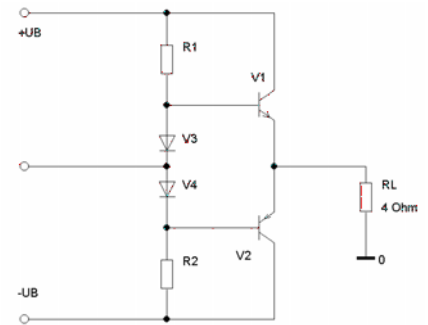
l) Leistungsverstärker:

Der Leistungsverstärker hat eine Ausgangsleistung $P_{RL} = 70 \text{ W}$ an $R_L = 4 \Omega$. Die beiden Transistoren sind auf getrennten Kühlkörpern montiert. Berechne die Kühlkörper.

Angaben: $R_{thJG} = 1,5 \text{ K/W}$ $R_{thGK} = 0,2 \text{ K/W}$

$\vartheta_U = 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_J = 150^\circ\text{C}$

Ergebnis: $3,4 \text{ K/W}$



m) In einer Leistungsendstufe sind zwei Transistoren (BD241

= NPN und BD242 = PNP) auf einem gemeinsamen Kühlkörper montiert. Die Montage erfolgt mit Glimmerscheibe und Wärmeleitpaste. Mit welcher Leistung kann jeder der beiden Transistoren auf einer offenen Leiterplatte betrieben werden

Angaben lt. Datenblatt BD241, BD242: $R_{thJU} = 65 \text{ K/W}$ $T_{Jmax} = 150^\circ\text{C}$ $R_{thJG} = 3,5 \text{ K/W}$

[illegible]