

ADAM Research

Berechnungen und Dienstleistungen

Wärmestrahlung

In Gesprächen hört man öfters, dass ein geheiztes Bauteil so und so viel Wärme „abstrahle“. Der Sprecher meint damit eigentlich den gesamten Energieverlust, aber exakter sollte nur der Energieanteil gemeint sein, der durch Infrarotphotonen (IR-Photonen, Wärmestrahlung) abgegeben wird.

Der perfekte Strahler ist der sog. **Schwarze Körper**, der durch das **Plancksche Strahlungsgesetz** beschrieben wird. Die berühmte Planckkurve (Abb. 1 links) ist glatt und hat ein Maximum der Strahlungsintensität bei einer Wellenlänge die genau mit der Temperatur verknüpft ist. Bei Körpern auf Raumtemperatur liegt es in etwa bei einer Wellenlänge von 10 Mikrometer, also im infraroten Teil des Lichtspektrums, bei der Temperatur der Sonnenoberfläche liegt es im sichtbaren Licht bei 0.5 μm . **Realistische Körper**, besser gesagt realistische Oberflächen, haben aber ein charakteristisches wellenlängenabhängiges Emissions- (und Absorptions-) spektrum mit vielen Bergen und Tälern, sog. Banden (Abb.1 rechts). Zur ingenieurmäßigen Vereinfachung behilft man sich mit der Angabe einer Effektivzahl zwischen 0 und 1, dem sog. **Emissionskoeffizient** - Formelzeichen ϵ . Sinnvollerweise trennt man Angaben zum Emissionskoeffizient in einen Infrarotanteil ϵ_{IR} und einen Anteil für das sichtbare Licht ϵ_{vis} .

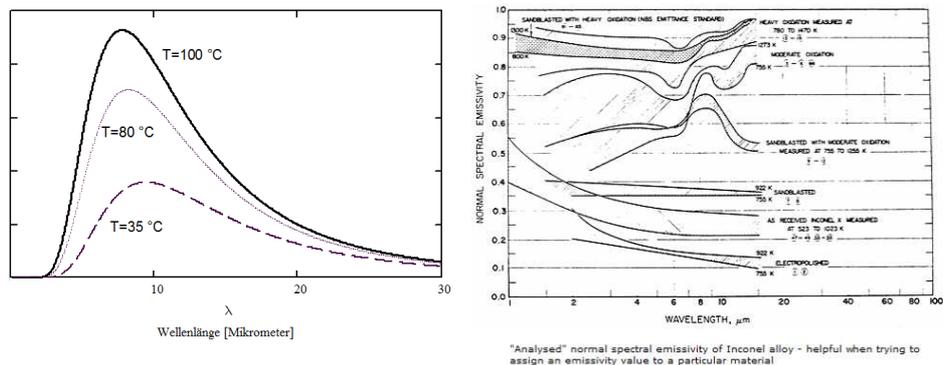


Abb. 1: Links: Planck-Kurve für schwarze Körper von 35, 80 und 100°C. Rechts: Emissivitätsspektren von realistischen Oberflächen von blank (unten) bis oxidiert (oben) (Quelle: <http://www.evitherm.org>)

Die Netto-Gesamtabstrahlungsleistung eines perfekten schwarzen Körpers, summiert über alle Wellenlängen und Winkel, wird durch das Stefan¹-Boltzmann-Gesetz beschrieben

Stefan-Boltzmann-Gesetz: $\dot{Q}_{\text{rad,Planck}} = A \cdot \sigma \cdot (T_{\text{Körper}}^4 - T_{\text{Umgebung}}^4)$

Es besagt, dass die abgestrahlte Energie nur von der 4-ten Potenz der Temperatur abhängt (alle Temperaturen hier in [Kelvin]). Dabei sind A die abstrahlende Fläche (bei Leiterplatten Vorder- und Rückseite), T_U die Umgebungstemperatur und σ eine Naturkonstante, die sog. Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma=5.6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$). Da aber eine reale Oberfläche kein schwarzer Körper ist, wird der **Effektivwert „Emissivität“** (ϵ_{IR} für normal warme Körper) eingeführt

$$\dot{Q}_{\text{rad,real}} = A \cdot \epsilon_{\text{IR}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{Körper}}^4 - T_U^4)$$

Dieser Wärmeverlust (inklusive Konvektion) muss natürlich durch die Heizung der Bauteile kompensiert sein. Das Niveau, an dem sich das Gleichgewicht einstellt ist die Körpertemperatur.

¹ Jozef Stefan (1835-1893), Ludwig Boltzmann (1844-1906), beide Universität Wien

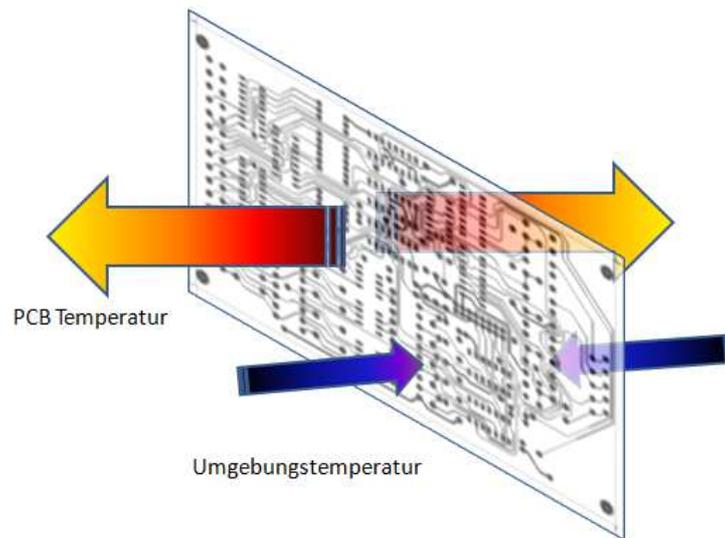


Abb. 2: Eine Leiterplatte gibt Wärmestrahlung an die Umgebung ab und nimmt Strahlung aus der Umgebung auf. Die Strahlung kommt von und geht natürlich in alle Raumrichtungen.

Die Emissivität von Oberflächen muss man messen (s. Abb. 1 rechts). Eine Zusammenstellung von üblichen Werten zeigt Tab. 1 (Emissivität = Absorbtivität).

Table 3.1 Values of absorbtivity.

Surface	Absorbtivity	
	6000 K	300 K
Aluminium		
Highly polished	0.15	0.04
Black anodised	0.78	0.86
Cast iron	0.94	0.21
Ceramic	0.65	0.21
Copper		
Highly polished	0.18	0.03
Tarnished	0.65	0.75
Gold 0.30	0.02	
Nickel	0.33 - 0.45	
Paints		
Black	0.79 - 0.94	0.95
Yellow	0.54	
Gray	0.49 - 0.57	0.90
Blue	0.48	0.90
White	0.19 - 0.33	0.90
Silver 0.25	0.02	
Stainless steel, polished	0.37	0.60

Tab. 1 : Emissionskoeffizienten im infraroten und visuellen Spektralbereich verschiedener technischer Oberflächen (Quelle: "The Computer Products guide to thermal management of power converters", Computer Products Ltd., Youghal, Ireland)

Die Zahlen in Tab.1 besagen folgendes: die beiden Spalten sind eine verknappte Wellenlängenskala, geschrieben in Form einer Strahlungstemperatur. Links ist der Bereich des sichtbaren (Sonnen-)lichts, rechts der Infrarotbereich. Beginnen wir mit der weißen Farbe. Die weiße Farbe hat im Sichtbaren eine niedrige Emissivität und daher ein hohes Reflexionsverhältnis (Emission + Reflexion = 1): deswegen erscheint uns die Farbe mit dem Auge eben weiß. Bei einer schwarzen Farbe ist es genau umgekehrt. Diese Unterschiede existieren im Infraroten nicht: das Emissionsverhältnis ϵ_{IR} aller Lacke ist in etwa gleich groß (≈ 0.9) und das Reflexionsverhältnis klein. Im Infraroten strahlen alle Lacke gleich, unabhängig von der Farbe. Voraussetzung ist, dass die Lackschicht dicker ist als die Wellenlänge der Strahlung, also dicker als $10 \mu\text{m}$! Auch eine Kunststoffplatte ist Lack, ein starrer Lack. Anders verhalten sich die metallischen Oberflächen (s. Abb. 1): polierte Metalle sind im IR schlechte Strahler (Emissivität kleiner als 0.1)! Durch (unkontrolliert alternde) Oxidation wird die Emission besser, am besten aber ist es Metalloberflächen zu lackieren oder zu anodisieren (kontrolliert zu oxidieren).

Bei freier Konvektion und metallischen Oberflächen von Kühlrippen und Gehäuseblechen kann man nur dringend empfehlen sie zu lackieren (Klarlack oder bunt).

Der Kühlungsanteil von Konvektion und Strahlung an Leiterplatten oder Kühlrippen lässt sich abschätzen. Die Zusammenhänge sind nichtlinear und abhängig von der Größe (!) einer Platte. Für freie Konvektion gilt, dass im groben Durchschnitt Konvektion und Strahlung jeweils etwa die Hälfte des Wärmetransports übernehmen. Bei erzwungener Konvektion wird der Anteil der Strahlung sehr klein und kann vernachlässigt werden.

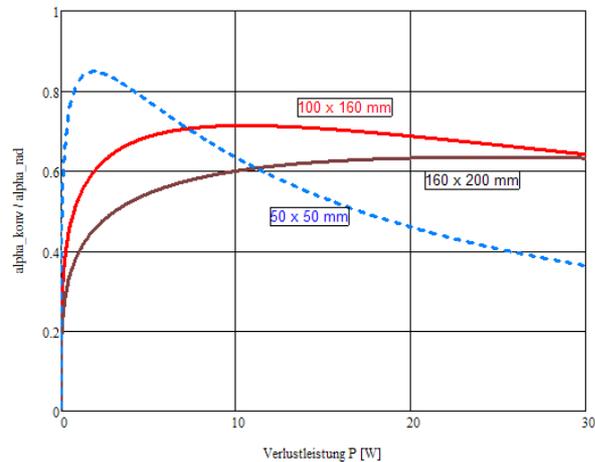


Abb. 3: Verhältnis der Wärmeabgabefähigkeit von Konvektion zu Strahlung für eine stehende Euro-, Doppel-Euro, und eine 50x50 mm Platte ($\epsilon=0.9$) in freier Konvektion. In weiten Bereichen der thermischen Verlustleistung ist das Verhältnis um 0.6.

Die Wärmestrahlung kann umgekehrt zur Temperaturbestimmung ausgenutzt werden. Das macht eine Thermokamera, indem sie den Infrarotfluss gemäß Stefan-Boltzmann in eine Temperatur umrechnet und bildgebend darstellt. Das kann nur funktionieren, wenn der Emissionskoeffizient der gemessenen Oberfläche bekannt ist und überall gleich ist. Da das oft nicht der Fall ist, muss man die zu messende Fläche lackieren. Um die Gesamtabstrahlung des Objekts nicht zu beeinflussen, reicht oft ein Strich mit Tippex oder ein Tesastreifen aus (Hauptsache dicker als 10 μ m), an dem man repräsentativ die örtliche Temperatur abliest. Diese Schwärzung eliminiert gleichzeitig Winkelabhängigkeiten der Emission und die Reflexion der einfallenden Wärmestrahlung aus der Umgebung in die Kamera.

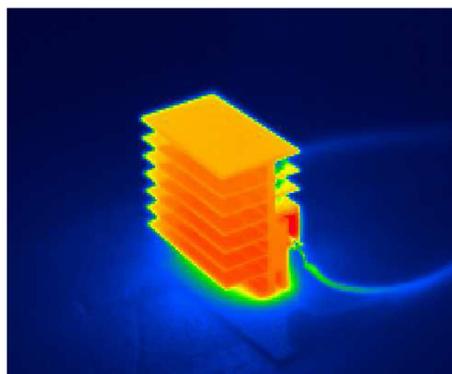


Abb. 4: Die Thermokamera als Messung der Wärmestrahlung

Weitere Tabellen über Emissionskoeffizienten finden Sie hier:

<http://transmetra.ch/images/stories/pdf/publikationen/emissionsgrade.pdf>

www.omega.com/temperature/Z/pdf/z088-089.pdf (Table of total emissivity)

www.electro-optical.com -> Education/Reference -> Emissivity

www.coleparmer.com