

---

TECHNISCHE AKADEMIE ESSLINGEN

---

LEHRGANG NR. 13631 / 70.146  
MITTWOCH, 06. MÄRZ 1991

THERMOGRAFIE  
IN DER  
ELEKTRONIK,  
DATENVERARBEITUNG,  
NACHRICHTENTECHNIK

I. ASPEKTE DER QUANTITATIVEN  
INFRAROT-THERMOGRAPHIE  
PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

(Dr. Bernd Schönbach)

INHALT

---

**I. QUANTITATIVE INFRAROT-THERMOGRAPHIE - GRUNDLAGEN**

**I.A GRUNDPRINZIP**

**I.B KALIBRIERUNG-TEMPERATURBERECHNUNG**

---

**II. QUANTITATIVE INFRAROT-THERMOGRAPHIE - KOMPLEXE MESSAUFGABEN**

---

**III. TECHNISCHE REALISIERUNG EINES MEBSYSTEMS**

**III.A AUFBAU**

**III.B TEMPERATURBERECHNUNG**

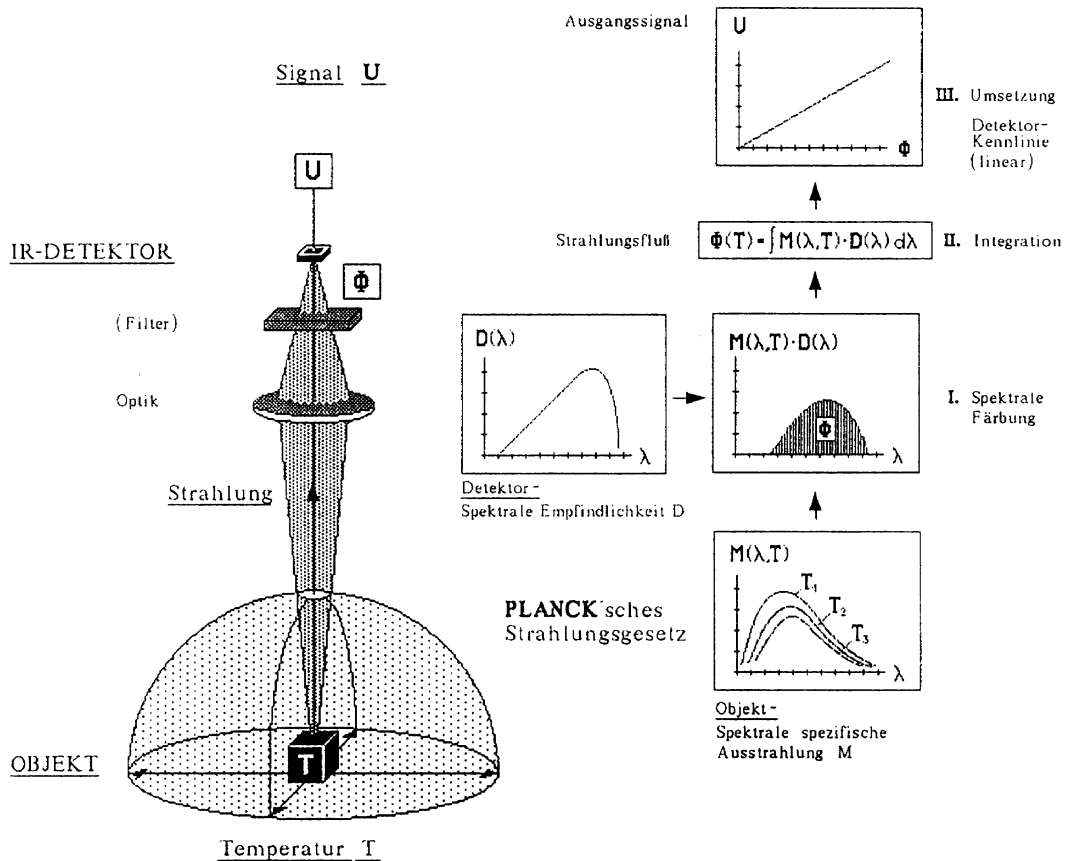
---

**IV. DIGITALE DATENVERARBEITUNG**

---

## I. QUANTITATIVE INFRAROT-THERMOGRAPHIE - GRUNDLAGEN

### I.A GRUNDPRINZIP



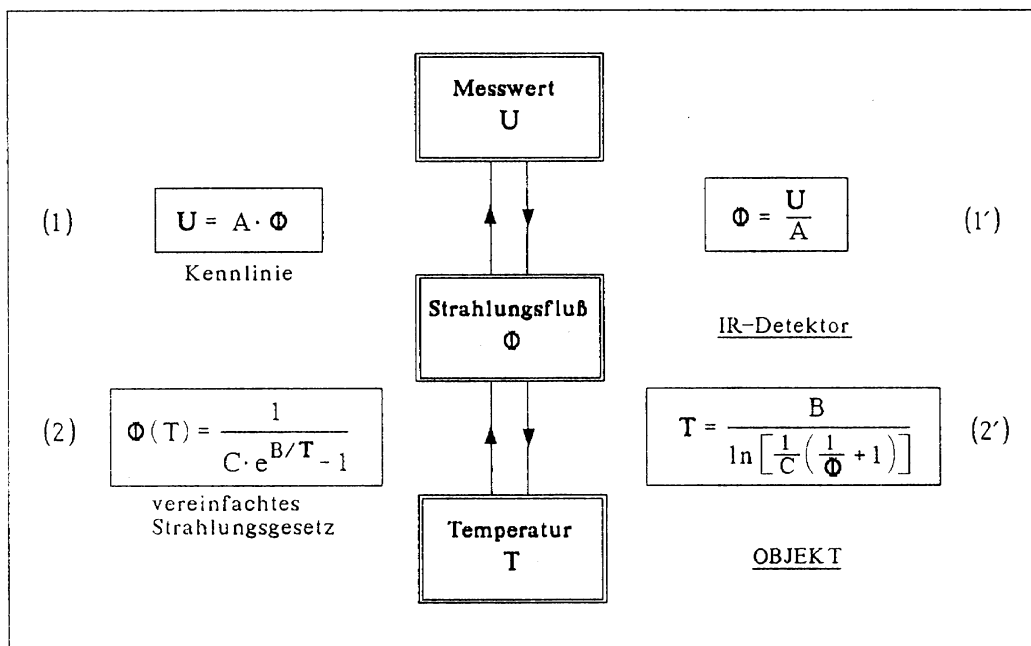
- Aufgrund seiner **Temperatur T** emittiert das Meßobjekt (Schwarzer Strahler) elektromagnetische **Strahlung**
- Intensität und spektrale Zusammensetzung der Strahlung hängen nach dem **PLANCK'schen Strahlungsgesetz** nur von der Objekttemperatur  $T$  ab.
- Ein durch die Scanneroptik bestimmter Anteil dieser Strahlung wird ausgeblendet und auf den **IR-Detektor** fokussiert.
- Der Detektor filtert den innerhalb seines Empfindlichkeitsbereiches liegenden Teil aus, integriert über die Wellenlänge und reagiert auf den resultierenden **Strahlungsfluß  $\Phi$**  mit einer Änderung seines elektrischen Widerstandes.
- Durch den Einbau in eine elektrische Schaltung wird die Widerstandsänderung in ein **Spannungssignal U** umgewandelt (Detektor-Elektronik-Kennlinie).

I.B KALIBRIERUNG-TEMPERATURBERECHNUNG

Umsetzung des Meßschemas (Abschnitt I.A) in eine Kalibrierungs-, bzw. Temperaturberechnungsvorschrift

Annahmen:

- das Signal U hat keinen elektrischen Offset
- das Objekt ist ein schwarzer Körper ( $\varepsilon = 1$ )
- keine Verfälschung der Strahlung durch äußere Einflüsse (z.B. additive Streustrahlung oder Strahlungsdämpfung)



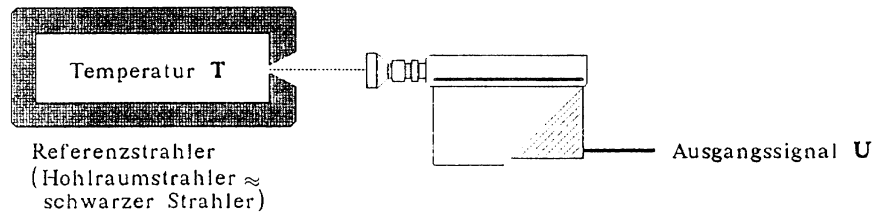
Ansatz: ZWEISTUFIGE KALIBRIERUNG-TEMPERATURBERECHNUNG

Gesucht: KALIBRIERUNGSPARAMETER A, B, C

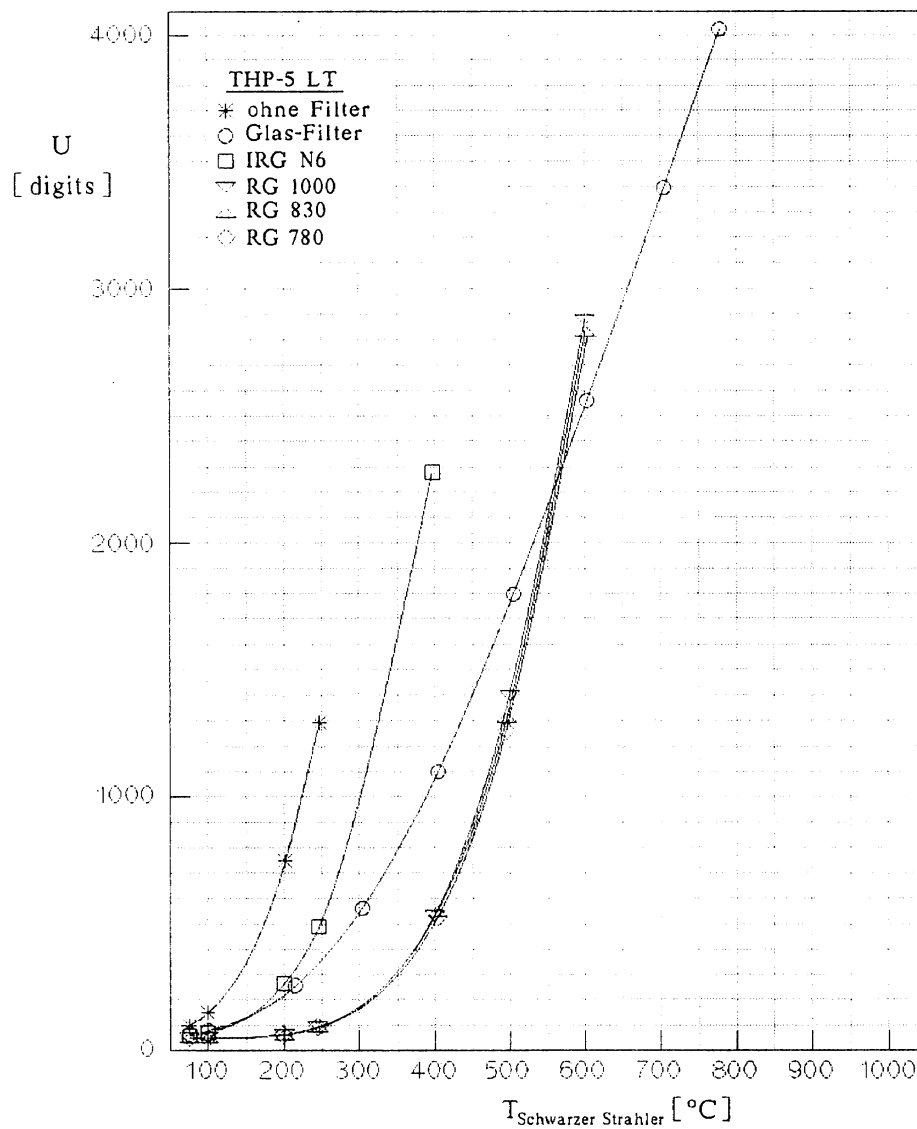
---

 AUFNAHME DER KALIBRIERUNGSKURVE
 

---



Beispiel: KALIBRIERUNGSKURVEN - THP-5 LT Linescanner • verschiedene Filter

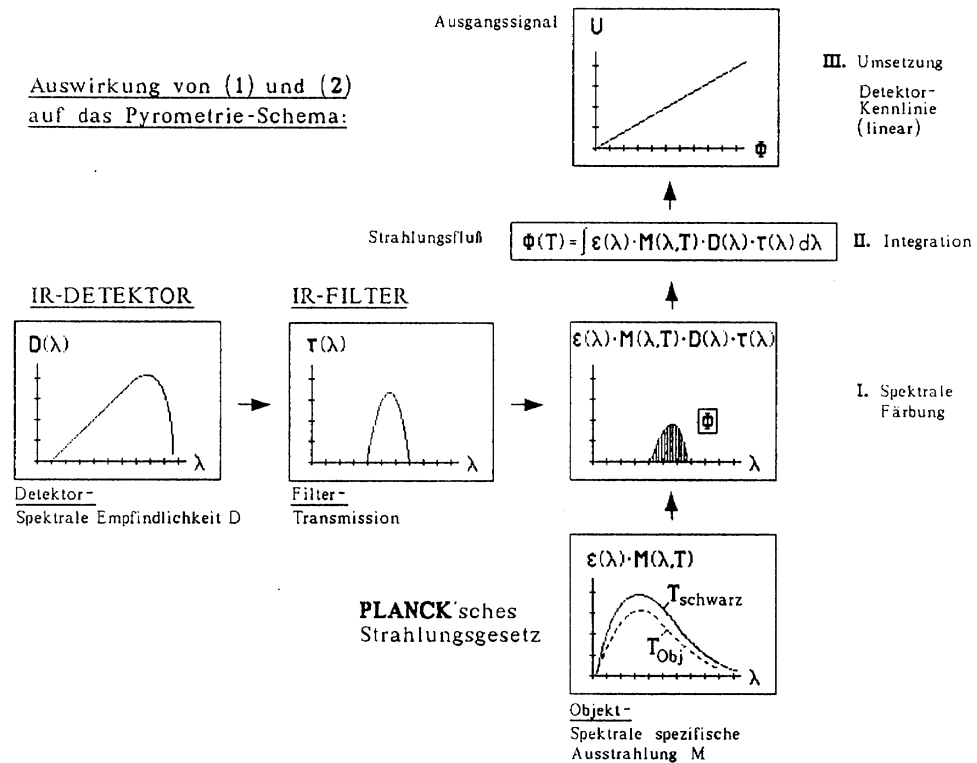


## II. QUANTITATIVE INFRAROT-THERMOGRAPHIE – KOMPLEXE MESSAUFGABEN

### MESSBEDINGUNGEN

- (1) Das Meßobjekt ist kein »Schwarzer Strahler« (Emissionsvermögen  $\varepsilon < 1$ )
- (2) Verwendung von **IR-Filtern** (Filtercharakteristik  $\tau(\lambda)$ )

Auswirkung von (1) und (2)  
auf das Pyrometrie-Schema:



- (3) Die Objektstrahlung wird durch äußere Gegebenheiten beeinflusst (z.B. **atmosphärische Dämpfung**)
- (4) Der IR-Detektor empfängt zusätzlich zur Objektstrahlung **Störstrahlung**
- (5) Das Meßsignal enthält einen **Spannungsoffset** (entweder von der Auswerte-Elektronik oder **Detektor-Drift**)
- (6) Der Detektor ändert über längere Zeit seine sensorischen Eigenschaften (z.B. **Empfindlichkeitsänderung** aufgrund intensiver Bestrahlung)

### III. TECHNISCHE REALISIERUNG EINES MEBSYSTEMS

#### III. A AUFBAU

Infrarotkamera (Scanner) mit zwei rotierenden Prismen (Abtastsystem).  
IR-Wechselobjektive. Echtzeitthermographie mit 25 Bildern/sec.

- Zwei interne Schwarzkörper-Referenzstrahler
- Drei Pt100-Temperaturfühler zur Messung der Gehäuse-/Linsentemperatur

Mechanischer Aufbau und weitere Spezifikationen: siehe Folien.

#### III. B TEMPERATURBERECHNUNG

- OFFSET/DRIFT (Punkt (5))

Berechnung und Kompensation von Spannungsoffsets (Drift) durch Messung der internen Schwarzkörper-Referenzstrahler:

$$U_o = \frac{U_{Ref1} \Phi_{Ref2} - U_{Ref2} \Phi_{Ref1}}{\Phi_{Ref2} - \Phi_{Ref1}}$$

- ZWEI-STUFEN-KALIBRIERUNG

Die **Kalibrierungskonstanten B** und **C** für den individuellen Scanner (inklusive spezielles IR-Filter) werden werkseitig aus der Kalibrierungskurve berechnet und sind im Scanner in einem EPROM abgelegt.

Die **Kalibrierungskonstante A** wird während des Meßbetriebes mit Hilfe der internen Schwarzkörper-Referenzstrahlern immer wieder neu berechnet (→ Punkt (6))

$$A = \frac{c_{Ref2}(U_{Ref2} - U_o) - c_{Ref1}(U_{Ref1} - U_o)}{\Phi_{Ref2} - \Phi_{Ref1}}$$

Die Konstanten  $c_{Ref1}$  und  $c_{Ref2}$  berücksichtigen den Einfluß externer Schutzgläser.

- STÖRSTRAHLUNG (Punkt (3))

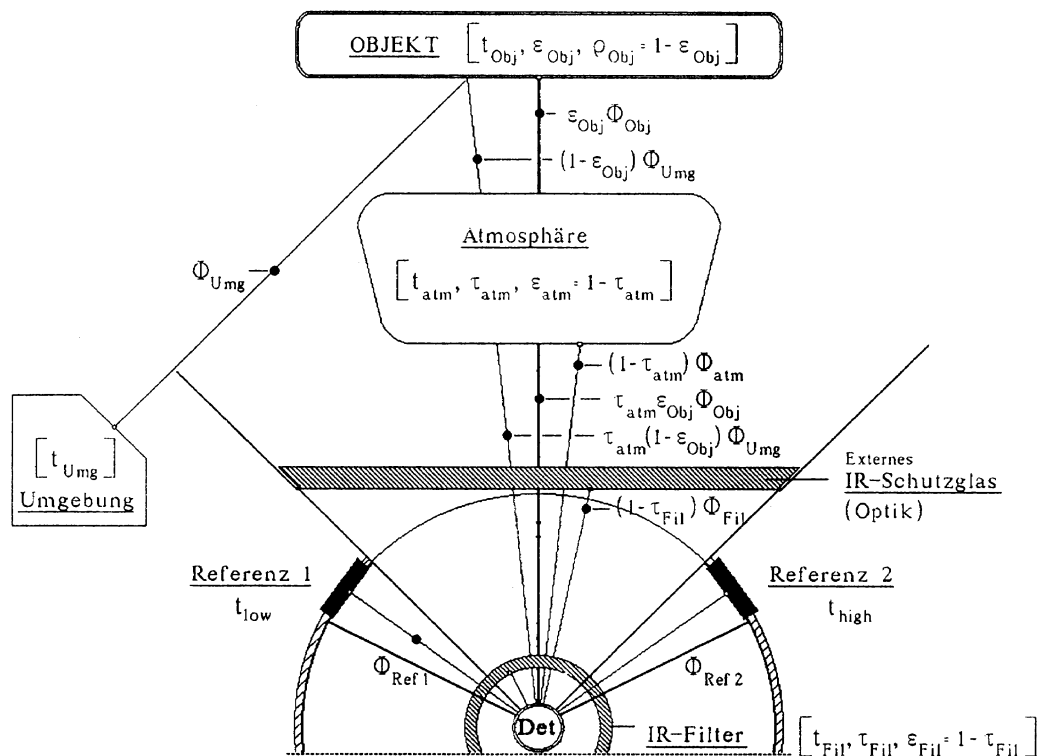
Störstrahlung, die die Messung verfälschen würde, wird mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnet und vom Detektorsignal subtrahiert

$$\Delta \Phi = \frac{(1 - \epsilon_{Obj})}{\epsilon_{Obj}} \Phi_{sur} + \frac{(1 - \tau_{atm})}{\epsilon_{Obj} \tau_{atm}} \Phi_{atm} + (\Phi_{win} - \Phi'_{win}) \frac{(1 - \tau_{win})}{\epsilon_{Obj} \tau_{atm} \tau_{win}} \Phi_{win}$$

### Berechnung der Störflüsse - Erläuterung

Allgemein gilt:

|                                    |
|------------------------------------|
| $\alpha \cdot \rho \cdot \tau = 1$ |
| $\alpha = \varepsilon$             |

Körper undurchsichtig:  $\tau = 0 \rightarrow \alpha \cdot \rho = 1 \rightarrow \rho = 1 - \varepsilon$ Körper nicht reflektierend:  $\rho = 0 \rightarrow \alpha \cdot \tau = 1 \rightarrow \varepsilon = 1 - \tau$ 

Einfallender

Strahlungsfluß: 
$$\Phi_{Det} = \tau_{Spie} \tau_{Fil} \tau_{atm} \varepsilon_{Obj} \Phi_{Obj} + \tau_{Spie} \tau_{Fil} \tau_{atm} (1 - \varepsilon_{Obj}) \Phi_{Umg} + \tau_{Spie} \tau_{Fil} (1 - \tau_{atm}) \Phi_{atm} + \tau_{Spie} (1 - \tau_{Fil}) \Phi_{Fil}$$

- Messung der Temperaturen (Optik, Gehäuse) mit Hilfe der Temperaturfühler. Berechnung und Subtraktion der daraus ermittelten Strahlungsflüsse vom Detektorsignal über internen Mikroprozessor.



- ALGORITHMUS (Punkt(4))

Der endgültige Temperaturberechnungsalgorithmus hat die folgende Form:

$$T = \frac{B}{\ln\left[\frac{1}{C}\left(\frac{1}{\Phi} + 1\right)\right]} - 273.15 \quad \text{mit} \quad \Phi = \frac{U - E_e}{A_e \varepsilon_{\text{Obj}} \tau_{\text{atm}}} - \Delta\Phi$$

Er berücksichtigt neben Offset und Störstrahlung auch die Strahlungsdämpfung durch atmosphärische Einflüsse  $\tau_{\text{atm}}$  sowie das Emissionsvermögen des Objekts  $\varepsilon_{\text{Obj}}$

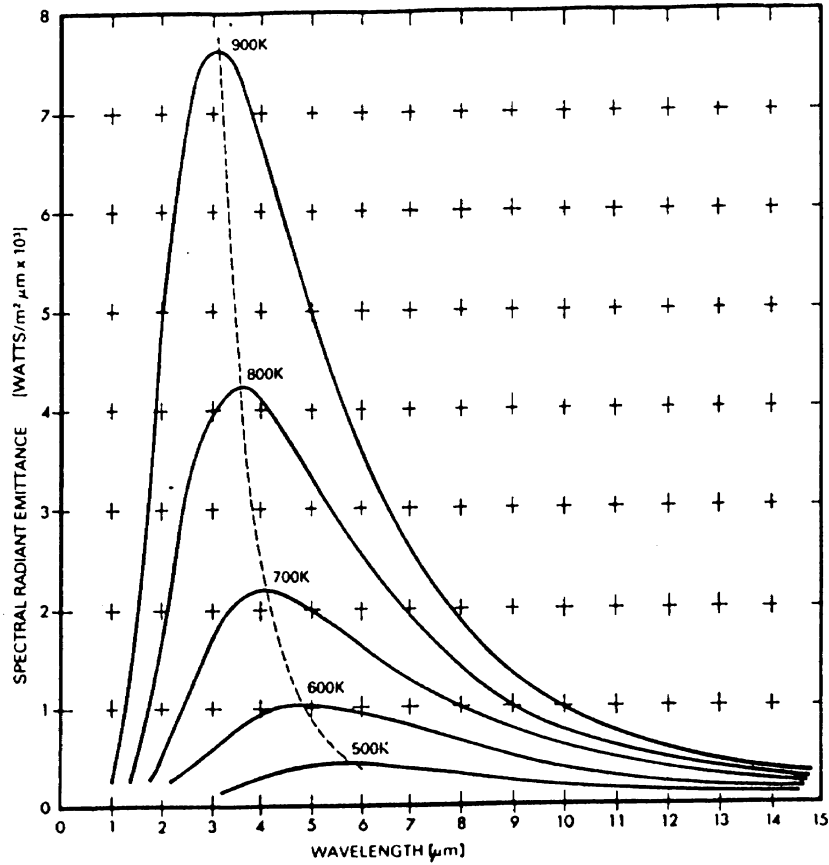
---

#### IV. DIGITALE DATENVERARBEITUNG

- Korrekte Temperaturberechnung
- Bildsubtraktionen
- Emissionsfaktorbestimmung durch Korrelation mit Referenzbildern
- Zoom-Relief-Darstellung
- Archivierung

## ANHANG I

## PLANCK'sches Strahlungsgesetz



$$M_{\lambda, \text{schwarz}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

$M_{\lambda, \text{schwarz}}$  ..... spektrale spezifische Ausstrahlung  $10^{-6} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right]$

$\lambda$  ..... Wellenlänge [m]

$T$  ..... absolute Temperatur des Strahlers [°K]

$c$  ..... Lichtgeschwindigkeit  $2.998 \cdot 10^8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$

$h$  ..... PLANCK'sches Wirkungsquantum  $6.626 \cdot 10^{-34} \left[ \frac{\text{J sec}}{\text{J}} \right]$

$k$  ..... BOLTZMANN Konstante  $1.381 \cdot 10^{-23} \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$

Folgerungen aus dem PLANK'schen Strahlungsgesetz:

I.A Das STEFAN-BOLTZMANN'sche Gesetz

Durch Integration der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_\lambda$  über  $\lambda$  von  $\lambda=0$  bis  $\lambda=\infty$  erhält man die gesamte spezifische Ausstrahlung  $M_{ges}$ , die proportional der 4. Potenz der absoluten Temperatur ansteigt:

$$M_{ges} = \sigma T^4$$

$M_{ges}$  ..... Gesamte spezifische Ausstrahlung  $[\frac{W}{m^2}]$

$T$  ..... absolute Temperatur des Strahlers  $[^{\circ}K]$

$\sigma$  ..... STEFAN-BOLTZMANN-Konstante  $5.6697 \cdot 10^{-8} [\frac{W}{m^2 K^4}]$

I.B Das WIEN'sche Verschiebungsgesetz

Die Isothermen der spektralen Energieverteilung besitzen ein Maximum, dessen Lage sich mit wachsender Temperatur nach kleineren Wellenlängen verschiebt:

$$\lambda_{max} = \frac{const}{T}$$

$\lambda_{max}$  ..... Lage (Wellenlänge  $[\mu m]$ ) des Maximums der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_\lambda$

$T$  ..... absolute Temperatur des Strahlers  $[^{\circ}K]$

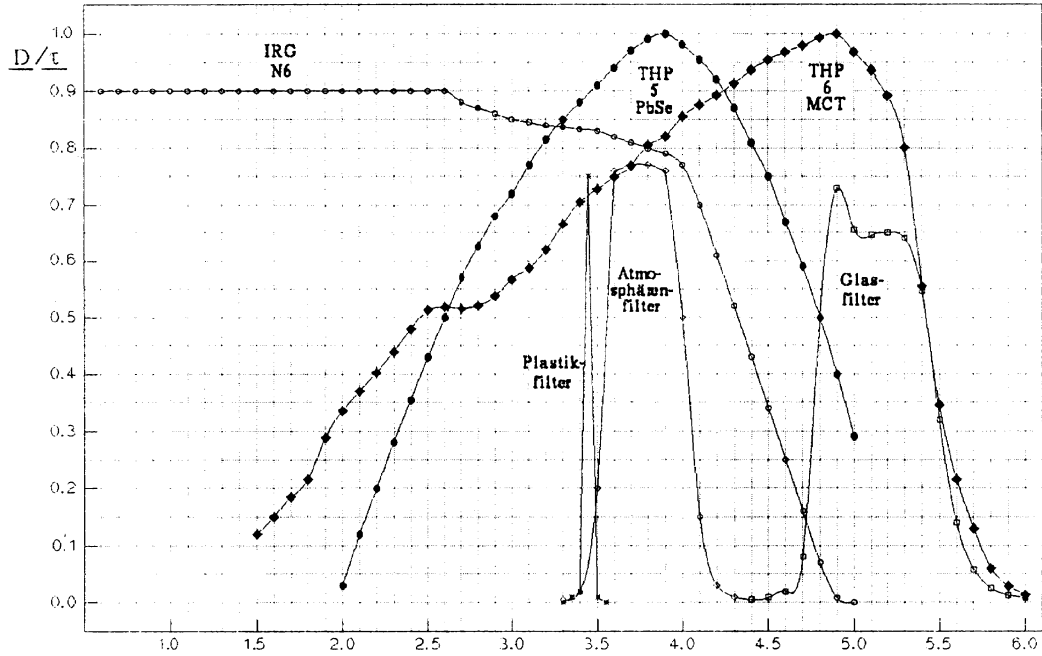
const. .... 2897.8  $[\frac{\mu m}{K}]$

BEISPIEL:

| T<br>[ $^{\circ}K$ ] | T<br>[ $^{\circ}K$ ] | $\lambda_{max}$<br>[ $\mu m$ ] | $M_{ges}$<br>[ $\frac{W}{m^2}$ ] | T<br>[ $^{\circ}K$ ] | T<br>[ $^{\circ}K$ ] | $\lambda_{max}$<br>[ $\mu m$ ] | $M_{ges}$<br>[ $\frac{W}{m^2}$ ] | T<br>[ $^{\circ}K$ ] | T<br>[ $^{\circ}K$ ] | $\lambda_{max}$<br>[ $\mu m$ ] | $M_{ges}$<br>[ $\frac{W}{m^2}$ ] |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| -250                 | 23.15                | 125.17                         | 0.16                             | 350                  | 623.15               | 4.65                           | 8 549.3                          | 950                  | 1232.15              | 2.37                           |                                  |
| -200                 | 73.15                | 39.61                          | 1.62                             | 400                  | 673.15               | 4.30                           | 11 641.5                         | 1000                 | 1273.15              | 2.28                           | 148 963                          |
| -150                 | 123.15               | 23.53                          | 13.04                            | 450                  | 723.15               | 4.01                           | 15 505.1                         | 1100                 | 1373.15              | 2.11                           |                                  |
| -100                 | 173.15               | 16.74                          | 50.96                            | 500                  | 773.15               | 3.75                           | 20 258.9                         | 1200                 | 1473.15              | 1.97                           | 267 023                          |
| -50                  | 223.15               | 12.99                          | 140.58                           | 550                  | 823.15               | 3.52                           |                                  | 1300                 | 1573.15              | 1.84                           |                                  |
| 0                    | 273.15               | 10.61                          | 315.62                           | 600                  | 873.15               | 3.32                           | 32 954.6                         | 1400                 | 1673.15              | 1.73                           | 444 324                          |
| 50                   | 323.15               | 8.97                           | 618.27                           | 650                  | 923.15               | 3.14                           |                                  | 1500                 | 1773.15              | 1.63                           | 560 457                          |
| 100                  | 373.15               | 7.77                           | 1099.24                          | 700                  | 973.15               | 2.98                           | 50 848.6                         | 2000                 | 2273.15              | 1.27                           | 1 513 810                        |
| 150                  | 423.15               | 6.85                           | 1 817.76                         | 750                  | 1023.15              | 2.83                           |                                  | 3000                 | 3273.15              | 0.89                           | 6 507 640                        |
| 200                  | 473.15               | 6.12                           | 2 841.55                         | 800                  | 1073.15              | 2.70                           | 75 197.2                         | 5000                 | 5273.15              | 0.55                           | 43 837 000                       |
| 250                  | 523.15               | 5.54                           | 4 246.83                         | 850                  | 1123.15              | 2.50                           |                                  | 6000                 | 6273.15              | 0.46                           | 87 801 700                       |
| 300                  | 573.15               | 5.06                           | 6 118.33                         | 900                  | 1173.15              | 2.47                           | 107 393.                         | 10000                | 10273.15             | 0.28                           | 631 502 000                      |

ANHANG II

DETEKTIVITÄT D und TRANSMISSION  $\tau$  verschiedener IR-DETEKTOREN und FILTER



DETEKTIVITÄT THP-6 · Filter

$$(D_{\text{THP-6} \cdot \text{Filter}} = D_{\text{THP-6}} \cdot \tau_{\text{Filter}})$$

