

## Strahlung

Neben Wärmeleitung und Konvektion kann ein Körper Wärmeenergie durch elektromagnetische Strahlung abgeben oder aufnehmen. Die abgestrahlte (emittierte) Leistung  $P_e$  ist proportional zur Oberfläche  $A$  und zur vierten Potenz der absoluten Temperatur. Dies ist die Aussage des **Stefan-Boltzmann-Gesetzes**, das 1879 von Josef Stefan empirisch gefunden und von Ludwig Boltzmann fünf Jahre später theoretisch begründet wurde. Es lautet

Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P_e = \epsilon \sigma A T^4, \quad 16.17$$

Die Größe  $\epsilon$ , der **Emissionsgrad**, liegt zwischen 0 und 1 und hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des strahlenden Körpers ab. Der Faktor  $\sigma$  ist die **Stefan-Boltzmann-Konstante**

$$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}, \quad 16.18$$

Fällt Strahlung auf einen undurchsichtigen Körper, so wird sie teilweise reflektiert und teilweise absorbiert. Farbige Körper reflektieren einen großen Teil des sichtbaren Lichts, während dunkle Körper den größten Teil absorbieren. Die absorbierte Strahlungsleistung ist

$$P_a = \epsilon \sigma A T_0^4, \quad 16.19$$

wobei  $T_0$  die Umgebungstemperatur ist.

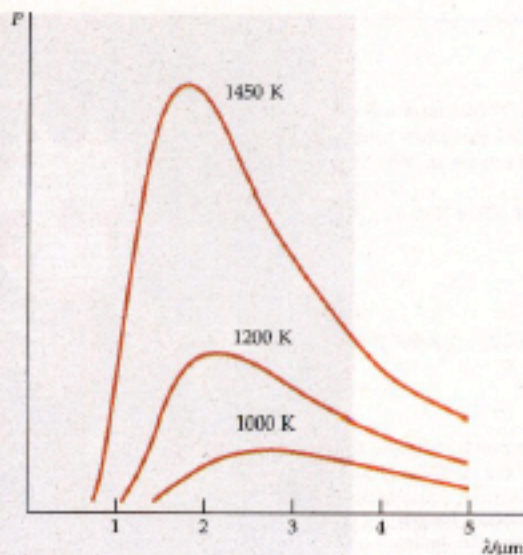
Emittiert ein Körper mehr Strahlung, als er absorbiert, dann kühlt er dadurch ab, während die Umgebung infolge Strahlungsabsorption erwärmt wird – und umgekehrt. Befindet sich ein Körper in thermischem Gleichgewicht mit seiner Umgebung, dann haben beide die Temperatur  $T = T_0$ , und der Körper absorbiert Strahlung im gleichen Ausmaß, wie er emittiert. Die Nettostrahlungsleistung eines Körpers mit der Temperatur  $T$  ist bei der Umgebungstemperatur  $T_0$

$$P_{\text{Netto}} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_0^4), \quad 16.20$$

Einen Körper, der die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert, nennt man **schwarzen Körper**. Er ist gleichzeitig ein idealer Strahler (mit dem Emissionsgrad 1). Seine Strahlungseigenschaften können theoretisch berechnet werden und spielen in der Physik eine große Rolle. Die beste experimentelle Realisierung eines schwarzen Körpers besteht in einem erhitzten Hohlraum, der eine kleine Öffnung hat, durch die die Strahlung austreten kann. Im Inneren befindet sich die elektromagnetische Strahlung mit den Wänden in thermischem Gleichgewicht. Die austretende Strahlung ist daher charakteristisch für die Temperatur des Hohlraums. Die Strahlung eines schwarzen Körpers nennt man deshalb auch **Hohlraumstrahlung**.



16.5 Die Strahlung, die durch ein kleines Loch aus einem erhitzten Hohlraum austritt, gleicht in guter Näherung der Strahlung eines schwarzen Körpers. Sie steht im Inneren mit den Wänden in thermischem Gleichgewicht, weil sie mehrfach absorbiert und wieder abgestrahlt wird, bevor sie austritt.



16.6 Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge für drei verschiedene Temperaturen.

Bei einer Temperatur unterhalb von rund  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist die Strahlung des schwarzen Körpers nicht sichtbar, da sie fast ganz bei Wellenlängen über  $800\text{ nm}$  liegt (sichtbares Licht erstreckt sich ungefähr von  $400\text{ nm}$  bis  $700\text{ nm}$ ). Mit höherer Temperatur steigt die Strahlungsleistung gemäß Gleichung (16.17) stark an, und die Strahlung nimmt außerdem immer kleinere Wellenlängen an. Bei  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  sehen wir dunkle Rotglut, und mit zunehmender Temperatur erscheint helle Rotglut und schließlich Weißglut. Abbildung 16.6 zeigt die emittierte Strahlungsleistung (gegen die Wellenlänge aufgetragen) bei drei verschiedenen Temperaturen. Die Wellenlänge des Maximums ist umgekehrt proportional zur Temperatur:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898\text{ mm}\cdot\text{K}}{T}$$

16.21

Wiensches Verschiebungsgesetz

Dies ist das **Wiensche Verschiebungsgesetz**. Mit seiner Hilfe kann man die Temperatur von Sternen aus der Charakteristik der von ihnen ausgesandten Strahlung bestimmen. Auch die Temperaturen an verschiedenen Stellen der Oberfläche von heißen Körpern lassen sich mit dieser Gesetzmäßigkeit ermitteln. Man spricht hierbei von **Thermographie** (Aufnahme von Wärmebildern). Diese ist auch in der medizinischen Diagnostik nützlich, weil beispielsweise krebsbefallenes Gewebe oft etwas wärmer ist als gesundes.

Experimentelle und theoretische Arbeiten zur spektralen Verteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers (siehe Abbildung 16.6) waren bei der Entwicklung der modernen Physik von außerordentlicher Bedeutung. Es zeigte sich, daß die tatsächliche Wellenlängenabhängigkeit stark von derjenigen abwich, die mit den Gesetzen der klassischen Physik berechnet wurde. Die Erklärung dieser Diskrepanz führte Max Planck 1900 zur Hypothese von der Quantisierung der Energie; dies werden wir in Kapitel 35 eingehend behandeln.

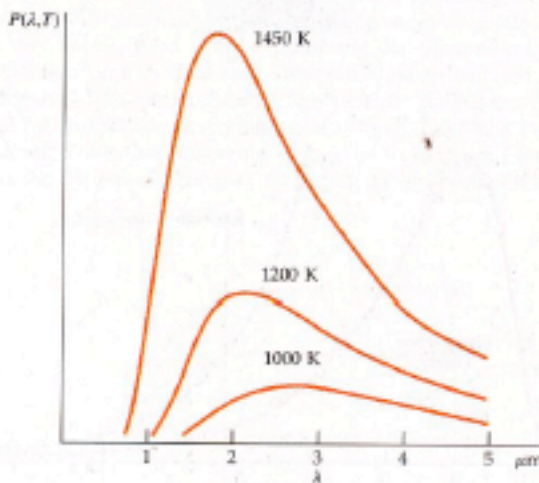
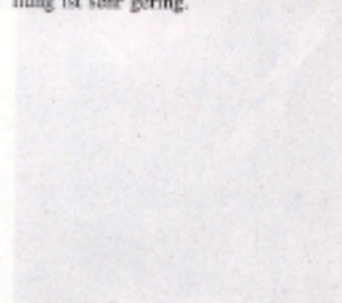
## 35.1 Strahlung des schwarzen Körpers und Plancksches Wirkungsquantum

Am Ende des 19. Jahrhunderts war die Spektralverteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers eines der rätselhaftesten physikalischen Phänomene. Wir haben die Eigenschaften eines schwarzen Körpers schon im Abschnitt 16.3 kennengelernt, wiederholen an dieser Stelle jedoch noch einmal die wesentlichen Ergebnisse. Ein schwarzer Körper ist im Idealfall ein System, das die gesamte einfallende Strahlung absorbiert. Eine gute experimentelle Realisierung eines solchen Körpers ist, der in Abbildung 35.1 gezeigte Hohlraum mit einer sehr kleinen Öffnung. Man spricht daher häufig auch von der **Hohlraumstrahlung**, wenn man die Strahlung des schwarzen Körpers meint. In dem Hohlraum befindet sich die Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit den Wänden, die die Strahlung ständig emittieren und absorbieren. Durch das Loch kann die Strahlung in den Hohlraum eindringen und natürlich auch austreten. Die Wände werden auf einer gleichmäßigen Temperatur gehalten, die sich variieren läßt. Das Loch muß deshalb klein sein, damit das thermische Gleichgewicht in dem Hohlraum durch die ein- und austretende Strahlung so wenig wie möglich gestört wird. Die Eigenschaften der Strahlung in diesem Hohlraum hängen nur von der Temperatur der Wände ab. Bei Temperaturen unterhalb von  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist die thermische Strahlung eines schwarzen Körpers nicht sichtbar, da ein Großteil der Energie über den infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verteilt ist. Wird der Körper über diese Temperaturen hinaus erhitzt, so steigt die von ihm abgestrahlte Energie nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Gleichung 16.17) an, und ihr Strahlungsmaximum verschiebt sich zu kleineren Wellenlängen. Zwischen  $600$  und  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt hinreichend viel Energie im sichtbaren Spektrum, um den Körper dunkelrot erscheinen zu lassen, bei noch höheren Temperaturen erscheint der Körper hellrot oder sogar weißglühend.

Abbildung 35.2 zeigt die von einem schwarzen Körper abgestrahlte Leistung in Abhängigkeit von der Wellenlänge für drei verschiedene Temperaturen. Wir nennen diese Kurven **Spektralverteilungen**. Die Größe  $P$  ist die pro Wellenlänge abgestrahlte Leistung, sie ist eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  und der Temperatur  $T$  und heißt **Spektralverteilungsfunktion**. Sie besitzt an der Stelle



35.1 Experimentelle Realisierung eines schwarzen Körpers. Die durch die kleine Öffnung einfallende Strahlung wird an den Wänden reflektiert und nahezu vollständig absorbiert. Die Wahrscheinlichkeit für ein Entweichen durch die Öffnung ist sehr gering.



35.2 Spektralverteilungen der Hohlraumstrahlung für drei verschiedene Temperaturen.

$\lambda_{\max}$  ein Maximum, das man mit dem im Abschnitt 16.3 behandelten Wienschen Verschiebungsgesetz (Gleichung 16.21) berechnen kann:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T}$$

Die Spektralverteilungsfunktion  $P(\lambda, T)$  läßt sich innerhalb der klassischen Thermodynamik ohne großen Aufwand bestimmen. Das Ergebnis dieser Rechnung ist das **Rayleigh-Jeans-Gesetz**

$$P(\lambda, T) = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4}, \quad 35.1$$

wobei  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist. Vergleicht man diese Verteilungsfunktion mit der experimentell gewonnenen Verteilung in Abbildung 35.3, so stellt man fest: Eine gute Übereinstimmung gibt es nur im Bereich großer Wellenlängen und eine sehr deutliche Abweichung im Bereich kleiner Wellenlängen. Für den Grenzwert  $\lambda \rightarrow 0$  geht die experimentell bestimmte Spektralverteilung  $P(\lambda, T)$  gegen null, die berechnete Verteilungsfunktion jedoch gegen unendlich, da sie proportional zu  $\lambda^{-4}$  ist. Nach der klassischen Thermodynamik würden schwarze Strahler bei kurzen Wellenlängen also unendlich viel Energie emittieren. Dieses Resultat bezeichnet man als **Ultraviolett katastrophe**.

Im Jahr 1900 gelang Max Planck die Herleitung einer Verteilungsfunktion  $P(\lambda, T)$ , die mit den experimentellen Daten im gesamten Wellenlängenbereich übereinstimmt. Dazu war allerdings eine merkwürdige Änderung in der klassischen Berechnung notwendig. Abbildung 35.3 zeigt die Plancksche Verteilungsfunktion für eine Temperatur von 1600 K und die zugehörigen experimentellen Werte sowie die klassische Verteilungsfunktion nach Rayleigh-Jeans. Planck suchte bei seiner Herleitung der Verteilungsfunktion, die die experimentellen Daten richtig wiedergibt, nach einer Korrekturmöglichkeit in der klassischen Berechnung. Diese Suche war von Erfolg gekrönt, als er sich entschloß, die Energie des schwarzen Körpers nicht als eine kontinuierliche Größe zu betrachten, sondern anzunehmen, daß sie in kleinen, diskreten Paketen, sog. Quanten, emittiert und absorbiert wird. Die Energie eines Quantums ist dabei proportional zur Frequenz der Strahlung:

$$E = h\nu. \quad 35.2$$



Max Planck (1858–1957) (Foto: Max-Planck-Gesellschaft)

Quantisierung der Strahlungsenergie

35.3 Spektralverteilung der Hohlraumstrahlung für eine Temperatur von 1600 K. Die Berechnung der Spektralverteilungsfunktion in der klassischen Theorie ergibt das Rayleigh-Jeans-Gesetz, das mit den experimentellen Daten nur im Bereich großer Wellenlängen übereinstimmt.

