

Anhang A

A.1 Elektromagnetische Strahlung

Das Licht ist genau wie Radio-, Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- oder Gammastrahlung elektromagnetische Strahlung. In der Quantenmechanik werden den Lichtteilchen oder auch Teilchen der elektromagnetischen Strahlung (Photonen oder Quanten) sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften zugeordnet. Für die Wellenlänge λ und die Frequenz f gilt:

$$f \cdot \lambda = c, \quad (\text{A.1})$$

mit der Lichtgeschwindigkeit $c=2,9979 \cdot 10^8$ m/s. Die Photonenenergie E ist wellenlängenabhängig:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (\text{A.2})$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js. Da die Wellenlänge des Lichts im sichtbaren Spektralbereich vom roten zum violetten Ende abnimmt, müssen die Photonen des roten Lichts eine kleinere Quantenenergie haben als die des violetten Lichts (Lerner, 2000). Für Aufnahme oder Abgabe von Strahlung sind Vorgänge in der Elektronenhülle des Atoms maßgeblich. Die idealisierte Modellvorstellung des Bohrschen Atommodells (Niels Bohr, 1913) geht davon aus, dass sich negativ geladene Elektronen als klassische Teilchen auf Kreisbahnen um den positiv geladenen Atomkern bewegen. Diese Bewegung ist vergleichbar mit der Bewegung der Planeten um die Sonne, nur dass im Atomkern elektrostatische Anziehungskräfte die Rolle der Gravitationskraft übernehmen. Elektronen können sich nur auf diskreten Energieniveaus befinden, welches in Abb. A.1 beispielhaft für das Wasserstoffatom¹⁾ dargestellt ist. Im Grundzustand, dem Zustand geringster Energie, ist der Abstand zum Atomkern am geringsten und damit die Bindungsenergie am größten. Höhere Energieniveaus entsprechen Elektronenbahnen mit größerem Radius und damit geringerer Bindungsenergie an das Atom (d.h. größerer Energie bzgl. des Grundzustandes). Ein freies nicht an ein Atom oder Molekül gebundenes Elektron im Ruhezustand besitzt die Energie $E=0$. Atomelektronen streben immer einen Zustand möglichst geringer Energie, d.h. einen stabilen Zustand, an. Wenn ein Elektron in einem Atom von einem höheren Energiezustand in einen niedrigeren übergeht, wird die frei werdende Energiedifferenz in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben, man spricht von Emission. Wird ein Elektron durch Energieaufnahme in ein höheres Energieniveau gehoben, man spricht auch von Absorption, so wechselt dieses Elektron sofort wieder auf ein energetisch

¹⁾Das H-Atom besitzt nur ein Elektron und hat daher von allen Elementen das einfachste Spektrum (Gertsen, 1995).

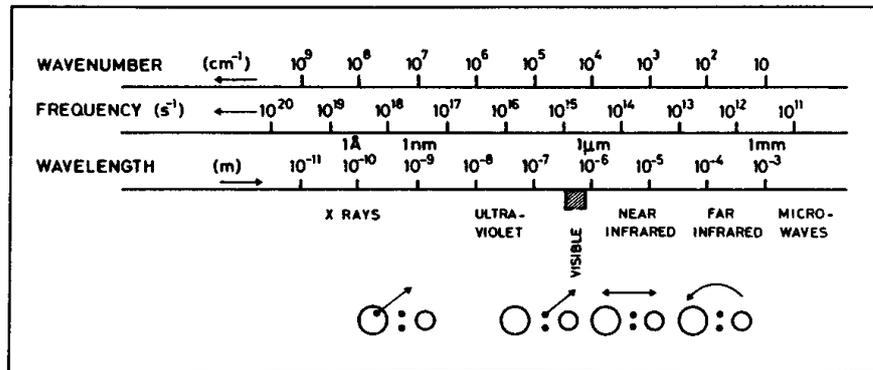


Abbildung A.2: Spektrale Regionen und ihr Einfluss auf Moleküle (von links nach rechts): Ionisation, Dissoziation, Schwingung und Rotation (Brasseur und Solomon, 1984).

hin findet Dissoziation (Trennung)³⁾ von Teilchen statt. Bei Molekülen können zusätzlich zu den Anregungen im Atom Rotationen oder Schwingungen angeregt werden. Auch diese Energiezustände sind gequantelt, d.h. es sind nur diskrete Niveaus möglich. Tritt zusätzlich zu einem Elektronensprung eine Änderung des Rotations- oder Schwingungsniveaus auf, kann die der Energieänderung entsprechende Wellenlänge im sichtbaren Bereich des Spektrums liegen. Der Einfluss der Spektralbereiche auf die Moleküle ist in Abb. A.2 dargestellt. Es gibt sowohl Emissions- als auch Absorptions-Molekül-Bandenspektren. Wie bereits erwähnt wurde, absorbieren Atome und Moleküle nur ganz bestimmte „passende“ Wellenlängen. Das bedeutet, dass bestimmte Moleküle ganz bestimmte Wellenlängenbereiche herausfiltern. CO₂ und H₂O absorbieren in der Atmosphäre in gewissen Teilen des Infrarotbereiches sehr stark, während Ozon (O₃) im wesentlichen für die UV-Absorption verantwortlich ist (vgl. auch Abschnitt 1.4.1, Abb. 1.18).

A.2 Schwarzer Körper

Für einen schwarzen Strahler gilt, dass er die gesamte eintreffende Strahlung absorbiert. Sein Absorptionsgrad α , das ist der Quotient aus absorbierter zu auffallender Strahlungsleistung, ist also eins. Das 1860 von G. R. Kirchhoff gefundene „Kirchhoffsche Gesetz“ besagt, dass ein Körper bei einer bestimmten Temperatur um so stärker Energie abstrahlt, je stärker er Strahlungsenergie absorbieren kann (eine Definition der wichtigsten Strahlungsgrößen ist in Tab. A.1 zu finden). Dies gilt für alle Wellenlängenbereiche (Bergmann et al., 1990):

$$M = \alpha M_s, \quad (\text{A.3})$$

Ein schwarzer Strahler besitzt demnach also auch das größte Emissionsvermögen. Kirchhoff gelangte auf der Suche nach einer vollkommen schwarzen Oberfläche zum Hohlraum, der ein

³⁾ Das Auseinandernehmen oder -trennen von Molekülen durch Licht nennt man Photolyse. Bei der Photolyse wird ein Photon mit passender Energie absorbiert und das Molekül in einen angeregten Zustand versetzt: $XY + h\nu \rightarrow XY^*$. Ist dieser angeregte Zustand instabil, kann das Molekül auch in seine atomaren Bestandteile zerfallen: $XY^* \rightarrow X + Y$. Es kann auch zur Photoionisation kommen: $XY^* \rightarrow XY^+ + e^-$ (Brasseur und Solomon, 1984).

Strahlungsgröße	Symbol	Einheit
Strahlungsenergie (durch Strahlung übertragene Energie)	Q	J=Ws
Strahlungsfluss/ Strahlungsleistung	$\Phi = dQ/dt$	W
Strahlstärke (Strahlungsfluss pro Raumwinkel Ω)	$I = d\Phi/d\Omega$	Wsr^{-1}
spezifische Ausstrahlung (engl. irradiance)	$M = d\Phi/dA$	Wm^{-2}
Strahldichte (engl. radiance)	$L = d^2\Phi/(dA \cos \vartheta d\Omega)$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
spektrale Strahldichte	$L_\lambda = dL/d\lambda = d^3\Phi/(dA \cos \vartheta d\Omega d\lambda)$	$Wm^{-3}sr^{-1}$

Tabelle A.1: Definition der wichtigsten Strahlungsgrößen (aus Bergmann et al., 1990); ϑ =Zenitwinkel (Winkel gebildet durch Flächennormale und Ausstrahlungsrichtung), φ =Azimutwinkel, $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$, dA =strahlendes Flächenelement oder gedachte Fläche im Raum, die von Strahlung durchsetzt wird.

vollkommenes Absorptionsvermögen für alle Wellenlängen besitzt. Dieser sogenannte „Schwarze Körper“, „Schwarzer Strahler“ oder „Hohlraumstrahler“ wird bei der Messung von Temperaturstrahlung benutzt, um den Einfluss der Oberfläche auszuschalten. Nur der Hohlraumstrahler gibt wegen seiner vollständigen Lichtabsorption in einem großen Spektralbereich eine maximale Lichtemission. Die Strahlung, die aus der kleinen Öffnung eines Hohlraumes austritt, ist vollkommen unabhängig von dem Material und dem Absorptionsvermögen der Wände des Hohlraumes und nur eine Funktion der Temperatur des Hohlraumes (Bergmann et al., 1990). Die Lichtemission eines schwarzen Strahlers mit einer bestimmten Temperatur wird mit Hilfe eines Monochromators (Spektralapparates) gemessen. Dort wird die Strahlung in kleine Wellenlängenbereiche zerlegt, das entstehende monochromatische Licht auf eine kleine schwarze Fläche eines Thermoelementes gelenkt und letztendlich ein elektrischer Strom registriert. Gemessen wird also die spektrale Strahldichte L_λ , die über alle Wellenlängen integriert die Gesamtemission liefert (vgl. Stefan-Boltzmann-Gesetz Gl. A.11).

A.3 Strahlungsgesetze

Das Spektrum eines schwarzen Strahlers folgt dem Planckschen⁴⁾ Strahlungsgesetz:

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \pi \Omega_0} \frac{1}{(e^{c_2/\lambda k T} - 1)}, \quad (A.4)$$

mit den beiden Strahlungskonstanten $c_1 = 2\pi c^2 h = (3,7415 \pm 0,0003)10^{-16} Wm^2$ und $c_2 = ch/k = (1,43879 \pm 0,00019)10^{-2} mK$; c =Vakuumlichtgeschwindigkeit; k =Boltzmann-Konstante; h =Planck-Konstante; $\Omega_0 = 1sr$. Durch Einsetzen der Konstanten c_1 und c_2 und Umschreiben ergibt sich:

⁴⁾1900, benannt nach Max Planck (1858-1947), der 1918 den Nobelpreis erhielt.

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{2c^2h}{\lambda^5\Omega_0} \frac{1}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)}. \quad (\text{A.5})$$

In Gleichung A.4 und A.5 ist die Strahldichte L auf gleiche Wellenlängenintervalle bezogen. Will man die Strahldichte auf gleiche Frequenzintervalle beziehen, muss λ durch c/ν und $d\lambda$ durch $(c/\nu^2)d\nu$ ersetzt werden:

$$L_\nu = \frac{dL}{d\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)}. \quad (\text{A.6})$$

Als Grenzfälle des Planckschen Strahlungsgesetzes lassen sich das Rayleigh-Jeans⁵⁾ Gesetz und das Wiensche⁶⁾ Strahlungsgesetz ableiten, welche schon länger als Teilnäherungen bekannt waren bevor sie sich als Grenzfälle des Planck-Gesetzes ergaben (Gerthsen, 1995). Für sehr kleine Frequenzen ($h\nu \ll kT$) geht Gl. A.6 wegen $e^{h\nu/kT} \approx 1 + h\nu/kT$ über in:

$$L_\nu = \frac{dL}{d\nu} = \frac{2\nu^2}{c^2} kT : \text{Rayleigh-Jeans Gesetz.} \quad (\text{A.7})$$

Dieses Gesetz ist eine gute Näherung für den langwelligen Anteil im Spektrum des schwarzen Strahlers. Die Kurven als Funktion der Frequenz beginnen auf der roten Seite als Parabeln. Im kurzwelligen Bereich, also für große Frequenzen, würde die Energiedichte unendlich werden (UV-Katastrophe), was natürlich nicht sein kann (Breuer, 1994; Gerthsen, 1995; Bergmann et al., 1990). Für $h\nu$ gilt dagegen $e^{h\nu/kT} \gg 1$ und aus Gleichung A.6 wird:

$$L_\nu = \frac{dL}{d\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} : \text{Wiensches Strahlungsgesetz.} \quad (\text{A.8})$$

Das Gesetz beschreibt die Existenz des Maximums und gibt den kurzwelligen Anteil des Spektrums eines schwarzen Strahlers richtig wieder, versagt aber für den langwelligen Bereich völlig. Durch Nullsetzen der Ableitung nach ν ($dL/d\nu = 0$) ergibt sich aus Gl. A.6 das Wiensche⁷⁾ Verschiebungsgesetz, welches das Maximum der schwarzen Strahldichte bei der Frequenz ν_{max} angibt:

$$\nu_{max} = 1,04 \cdot 10^{11} T : \text{Wiensches Verschiebungsgesetz,} \quad (\text{A.9})$$

$$\text{oder als Wellenlänge ausgedrückt: } \lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (\text{A.10})$$

mit der Wienschen Konstante $b = 2,898 \cdot 10^{-3} mK$. Das Maximum der Wellenlänge verhält sich also invers zur Temperatur: je größer die maximale Wellenlänge eines schwarzen Strahlers ist, desto geringer ist seine Temperatur. Die Sonne emittiert beispielsweise maximal bei einer Wellenlänge von 500 nm, das entspricht einer Frequenz von $3,4 \cdot 10^{14}$ Hz. Mit Hilfe von Gl. A.9 ergibt sich die Temperatur ihrer sichtbaren Oberfläche, der Photosphäre, zu ca. 5.800 K (vgl. auch Abschnitt 1.2.2). Die Erdoberfläche hingegen zeigt ein Maximum bei einer sehr viel größeren Wellenlänge (ca. 10 μm) und mit Gl. A.9 ergibt sich eine sehr viel geringere Oberflächentemperatur von ca. 255 K (ca. $-18^\circ C$). Der natürliche Treibhauseffekt sorgt dafür, dass die tatsächliche Temperatur der Erdoberfläche bei 289 K, also $15^\circ C$ liegt.

⁵⁾ 1900, benannt nach Lord Rayleigh (1842-1919) und James Jean (1877-1946)

⁶⁾ 1896, benannt nach Wilhelm Wien (1864-1928)

⁷⁾ 1893, benannt nach Wilhelm Wien

Die Gesamtenergiedichte in einem von schwarzer Strahlung erfüllten Hohlraum, über alle Frequenzen integriert, entspricht der Fläche unter der Planck Kurve (Abb. 1.14). Bis auf einen Faktor c ist diese mit der spezifischen Ausstrahlung des schwarzen Körpers identisch, d.h. mit der Energie, die ein m^2 seiner Oberfläche in alle Richtungen abstrahlt. Das Stefan-Boltzmann⁸⁾-Gesetz beschreibt die Abhängigkeit der Gesamtenergiedichte von der 4. Potenz der Temperatur:

$$\int_0^{\infty} L_{\nu} d\nu = \sigma T^4. \quad (\text{A.11})$$

Den T^4 -Anstieg mit der Temperatur kann man auch folgendermaßen verstehen: Die Fläche einer der Planck Kurve ähnlichen ergibt sich angenähert aus dem Produkt von Breite und Höhe. Die Höhe des Maximums ist nach Gl. A.9 proportional zu ν_{max}^3 , also T^3 . Die Breite der Verteilung entspricht im Energiemaß ausgedrückt in etwa kT (Gerthsen, 1995).

⁸⁾Das Gesetz wurde 1879 von dem Wiener Physiker Josef Stefan (1835-93) bereits erkannt, allerdings als allgemeingültiges Gesetz für alle Strahler. Erst Ludwig Boltzmann (1844-1906) erkannte die Beschränkung auf den schwarzen Strahler (Bergmann et al., 1990).