

Seminar zur
Physik der Technischen Lichtquellen

bei Dr. J. Geurts

Betreuer: Andreas Kaser

1. Gesetze der Strahlung

Carsten Jäger

20.04.93

Inhaltsverzeichnis

1	Das elektromagnetische Spektrum	1
2	Lambert-Strahler	3
3	Schwarzer Körper	3
3.1	Plancksche Strahlungsgesetz	3
3.2	Rayleigh-Jeanssche und Wiensche Strahlungsgesetz	6
3.3	Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz	6
3.4	Wiensche Verschiebungsgesetz	6
4	Kirchhoffsche Gesetz	7
5	Candela und ihre Verwandten	9
5.1	Hellempfindlichkeitskurven des Menschen	9
5.2	Gegenüberstellung der jeweiligen Strahlungs- und Lichtgrößen	9
5.3	Candela als Basiseinheit	11

1 Das elektromagnetische Spektrum [5]

Während bei Prismen, Gittern oder Antennen die Wellenlänge eine anschauliche Größe darstellt, ist in der Technik die Frequenz sehr beliebt, da sie im direkten Zusammenhang mit der Energie steht ($h\nu$). Daher hat es sich je nach Arbeitsgebiet eingebürgert, das Spektrum nach Wellenlänge, Frequenz oder Energie aufzutragen.

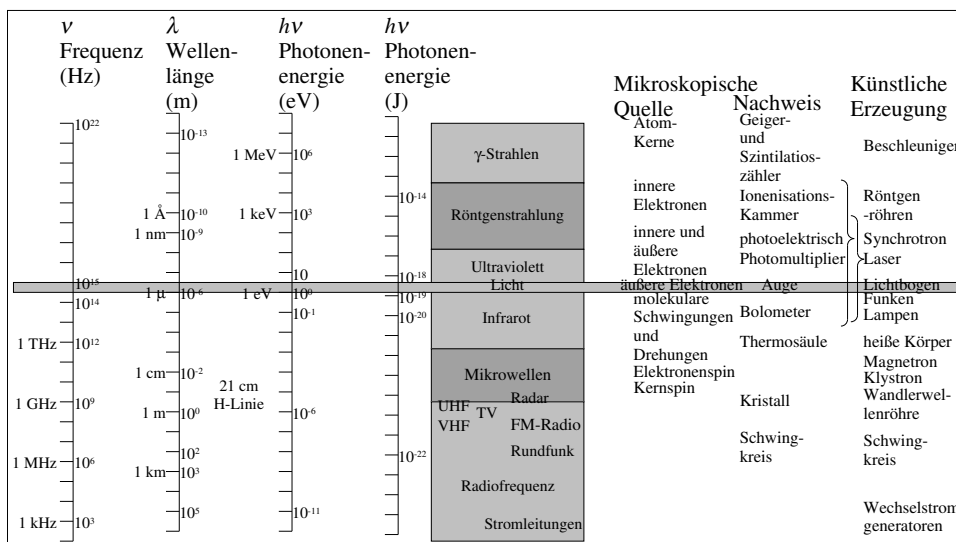


Abbildung 1: [5]

Die UV-Strahlung der Sonne ist so hochenergetisch, daß sie Schichten in der höheren Atmosphäre ionisieren kann. Diese Ionosphäre reflektiert **Lang-, Mittel- und Kurzwellen**. Da die Wellen ständig zwischen Erde und Ionosphäre hin und her reflektiert werden, kann man in diesen Wellenbereichen mit kleinem Aufwand sehr weit senden. Mit steigenden Ansprüchen und technischer Beherrschbarkeit ging man zu immer höheren Trägerfrequenzen über, da sich dann mehr Information übertragen läßt und/oder weil man von der Amplitudenmodulation auf die vielseitigere und störunanfälligere Frequenzmodulation übergehen kann. Die **UKW-Wellen** ($\nu \approx 100 \text{ MHz}$) werden von der Ionosphäre nicht mehr reflektiert, was aber andererseits ein Vorteil ist, wenn man lokal oder regional senden will. Für den Empfang braucht man fast Sichtkontakt. Echten Sichtkontakt braucht man für die Mikrowellen, mit denen die Satelliten ($\nu = 15 \text{ bis } 30 \text{ GHz}$) senden. Diese Frequenzen sind schon recht lichtähnlich in der Ausbreitung, sodaß unsere Parabolspiegel ohne Sichthindernisse zur geostationären Satellitenumlaufbahn über dem Äquator nach Süden schauen müssen.

Zwischen $\lambda = 1 \text{ cm}$ bis 30 m (UKW und Mikrowellen), wird die Ionosphäre durchsichtig, wodurch die Radioteleskopie und der Raumschiff/Satellitenfunkverkehr möglich wird. Molekulare Schwingungen und Rotationen liegen in dem Energiebereich der **Mikrowellen** und des sich dann anschließende Infraroten. Im Mikrowellenherd nutzt man eine Rotationsresonanz ($\lambda = 12,2 \text{ cm}$ bzw. $\nu = 2,45 \text{ GHz}$) des Wassers, was dadurch möglich ist, daß die Wassermoleküle polar sind.

Die Wellenlängen unterhalb des sichtbaren Lichts nennt man **Infrarot**. Die meisten thermischen Strahler haben ihr Maximum in diesem Bereich, so strahlt die Sonne etwa die Hälfte ihrer Energie im IR ab, während Glühlampen fast nur im IR abstrahlen und die Erzeugung von sichtbarem Licht fast Nebensache ist. Bei IR-Strahlern als Strahlungsheizung legt man Wert auf Oberflächenwirkung, im Gegensatz zu medizinischen IR-Bestrahlern, die tief wirken sollen. Letzteres funktioniert gut bei $\lambda = 750 \text{ bis } 1400 \text{ nm}$, also im nahen Infraroten bis Anfang des sichtbaren Lichts [4].

Sichtbar sind etwa $\lambda \approx 380$ bis 780 nm, also nur eine Oktave, während die anderen Wellenbereiche immer über einige Zehnerpotenzen laufen. Die Bandlücken von Halbleitern liegen mit Größenordnungen von 1 eV in diesem Energiebereich.

Über dem sichtbaren Licht schließt sich das **Ultraviolett** an, das von normalem Glas – im Gegensatz zu dem teureren Quarzglas – absorbiert wird. Da die Lichtquanten energiereich sind, können sie erwünschte oder zerstörerische photochemische Reaktionen auslösen. Das UV ist eingeteilt in:

- UV-A von 400 bis 310 nm
- UV-B von 310 bis 280 nm
- UV-C von 280 bis 100 nm

Das UV-A ist nicht wesentlich anders als das sichtbare Licht, außer daß es von der Hornhaut des Auges absorbiert wird und wir es deshalb nicht sehen können. Es ist harmlos und wird z. B. in Schwarzlichtlampen eingesetzt, um die Kleidung blau leuchten zu lassen. Um die Vergilbung der Textilien auszugleichen, sind den Waschmitteln optische Aufheller zugefügt. Diese fluoreszieren durch das UV der Sonne oder Leuchtstoffröhren, wobei sie unsichtbare UV-Strahlung absorbieren und sie als energieärmere Photonen im Sichtbaren emittieren. Dadurch – daß mehr sichtbares Licht emittiert wird, als draufscheint – wird weiße Kleidung weißer als weiß (100% Reflexion). Das funktioniert bei Glühbirnenlicht aufgrund der vernachlässigbaren UV-Abstrahlung nicht – auch Textmarker leuchten nicht.

Das UV-B ist biologisch von Bedeutung: es hat einen großen stimulierenden Einfluß auf den Organismus, bräunt die Haut und ist für die Vitamin-D₂-Bildung in der Haut zuständig.

Beim UV-C wird die Strahlung noch härter, was nicht nur zum Sonnenbrand führt. Die Thymonukleinsäure – die in Chromosomen enthalten ist – hat im Bereich von 250 bis 270 nm ein Absorptionsmaximum. Diese lebensfeindliche Eigenschaft kann man zum Desinfizieren benutzen. Anstatt Wasser zu chlören, kann man es durch UV-C keimfrei machen. Die UV-Strahlung unter 200 nm ist so energiereich, daß sie aus Sauerstoff das aggressive Ozon bildet.

Während das sichtbare Licht im Energiebereich der Sprünge der äußeren Elektronen liegt – wodurch der Photoeffekt möglich wird – entsteht die **Röntgenstrahlung** bei Sprüngen der inneren Elektronen. Sie ist noch härter und zerstörerischer als das UV-Licht und gehört mit der Gammastrahlung zu der – für Natur und Technik gefährlichen – ionisierenden Strahlung.

Die **Gammastrahlung** ist so energiereich, daß Kernprozesse dafür nötig sind. Sie ist so energiereich, daß die Quantisierung sehr deutlich wird, sodaß man mit einem Geiger-Müller-Zählrohr einzelne Quanten zählen kann. Bei Gammastrahlung tritt der Compton-Effekt auf und ab 1 MeV kann sie sich in Wechselwirkung mit Materie (Impulserhaltung) in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln.

Die **kosmische Strahlung** entsteht bei Kernprozessen im Weltall. Sie ist nochmal um einige Zehnerpotenzen energiereicher als Gammastrahlung. Durch $E = mc^2$ erzeugt sie beim Einschlag in die Atmosphäre viele Teilchen, die in einer Vielzahl von Folgereaktionen als Schauer auf uns niederprasseln.

2 Lambert-Strahler [2]

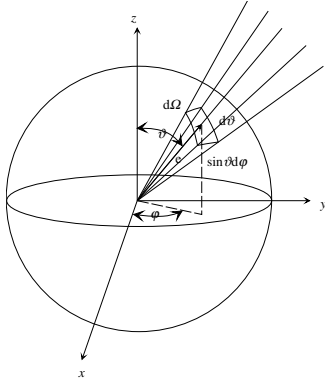


Abbildung 2: [2]

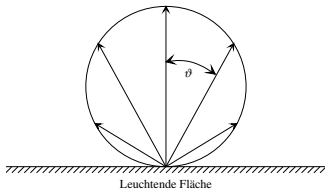


Abbildung 3: Lichtstärke einer Fläche nach dem Lambert-schen Kosinusgesetz. [1]

Die spektrale Strahlungsdichtefunktion $L(\lambda)$ ist eine differentielle Größe. Die Leistung, die von einem differentiell kleinen Flächenstück dA in den Raumwinkelteil dW im Frequenzintervall $d\nu$ abgestrahlt wird, ergibt sich aus:

$$L(\nu) \cos \vartheta dA dW d\nu$$

wobei der $\cos \vartheta$ durch das Skalarprodukt zwischen Betrachtungsrichtung und Flächennormalen entsteht. Schließlich wird die Fläche dA kleiner, wenn man nicht frontal (also mit 0°) draufschaut. Der Raumwinkel $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$ wird in Steradian (sr) gemessen, das ist der Raumwinkelkegel, der aus einer Einheitskugel die Oberfläche der Größe 1 schneidet (die gesamte Vollkugel ergibt 4π Steradian). Ist die Strahlungsdichte richtungsunabhängig, hat man einen Lambert-Strahler vorliegen, als Strahlcharakteristik entsteht eine Kugel (s. Bild).

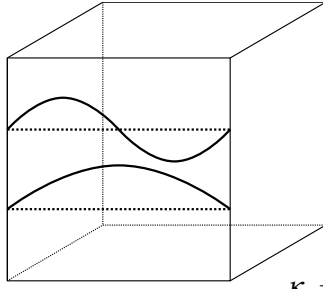
3 Schwarzer Körper

3.1 Plancksche Strahlungsgesetz

Absolut schwarze Körper, die also jede Frequenz zu 100 % absorbieren, gibt es in der Natur nicht. Dennoch ist diese Idealisierung von Interesse, da sie einerseits theoretisch gut berechnet werden kann, und da man andererseits über das Kirchhoff-Gesetz zu nicht-schwarzen Strahlern kommt. Einen Schwarzstrahler erhält man näherungsweise experimentell, indem man durch ein sehr kleines Loch in einen Hohlraum schaut, in dem die Oberfläche diffus reflektierend ist. Wenn einmal Licht durch das Loch hineingefallen ist, wird es so lange labyrinthartig hin und her reflektiert, bis es ganz absorbiert ist – das Loch ist schwarz. Das Loch muß möglichst klein sein, damit es das thermische Gleichgewicht möglichst wenig stört wird – andererseits braucht man aber leider eine gewisse Größe, um sinnvoll messen zu können. Ruß – seit Gutenberg bis heute unverändert die Grundlage der Druckerschwärze – ist auch deshalb so schwarz, weil die Oberfläche so zerklüftet ist. Für einen Hohlraum, der sich in thermischen Gleichgewicht befindet, ergibt sich als Energiedichte ρ der Hohlraumstrahlung:

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{1}{V} \frac{dN(\nu)}{d\nu} \cdot \bar{\epsilon}(\nu, T) d\nu,$$

wobei $\frac{dN(\nu)}{d\nu}$ die Häufigkeit der Eigenschwingungen darstellt, und $\bar{\epsilon}(\nu, T)$ die mittlere Energie, die eine Eigenschwingung in Abhängigkeit von der Frequenz ν und Temperatur T beansprucht. Die Anzahl der Eigenschwingungen berechnet sich nach dem von Rayleigh stammenden Abzählverfahren folgendermaßen:



Angenommen, wir haben einen Würfel der Kantenlänge s . Dadurch, daß die Wände die Wellen reflektieren, bildet sich ein System von stehenden Wellen. Die Randbedingungen erzwingen für

$$\sin(\kappa_x s) = \sin(\kappa_y s) = \sin(\kappa_z s) = 0$$

die Wellenzahlen:

$$\kappa_x = n_x \frac{\pi}{s}; \quad \kappa_y = n_y \frac{\pi}{s}; \quad \kappa_z = n_z \frac{\pi}{s}.$$

Gehen wir auf Kugelkoordinaten über, ergibt sich:

$$\sum_0^\infty \sum_0^\infty \sum_0^\infty \dots \approx \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty dn_x dn_y dn_z \dots = \int_0^\infty \frac{1}{8} \eta^2 4\pi d\eta \dots \quad \text{mit } \eta^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

Das $1/8$ entsteht dadurch, daß n_x , n_y und n_z positive, ganze Zahlen sind, und man somit nur über den ersten Oktanten der Kugelschale integrieren darf.

$$\text{Mit } \kappa = \frac{2\pi\nu}{c} \quad \text{folgt: } \frac{\pi}{2} \eta^2 d\eta = \frac{\pi}{2} \left(\frac{s}{\pi}\right)^3 \kappa^2 d\kappa = \frac{\pi}{2} \frac{8V\nu^2}{c^3} d\nu.$$

Da elektromagnetische Wellen transversal sind, müssen wir für die beiden Polarisationsrichtungen noch mit 2 multiplizieren und erhält:

$$\frac{dN(\nu)}{\nu d\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}.$$

Um die mittlere Energie zu berechnen, postulierte Planck intuitiv die Hypothese, daß die Energien der Schwingungen gequantelt wären:

$$\varepsilon = n \cdot h\nu,$$

wobei er das h so anpaßte, daß der Kurvenverlauf möglichst gut mit den empirischen Befunden übereinstimmte – er ahnte damals nicht, daß er auf eine fundamentale Naturkonstante gestoßen war. Nach Boltzmann berechnet sich dann die mittlere Energie durch:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_n \varepsilon_n e^{-\varepsilon_n/kT}}{\sum_n e^{-\varepsilon_n/kT}}.$$

Mit Einführung der Zustandssumme

$$Z = \sum e^{-\beta\varepsilon_n} \quad \text{und} \quad \beta = \frac{1}{kT}$$

ist

$$\bar{\varepsilon} = \frac{d \ln Z}{d\beta}.$$

Die harmonische Reihe ergibt

$$Z = \sum_0^\infty \left(e^{-\beta h\nu}\right)^n = \frac{1}{1 - e^{-\beta h\nu}}, \quad \text{also} \quad \bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Die Energiedichte lautet also

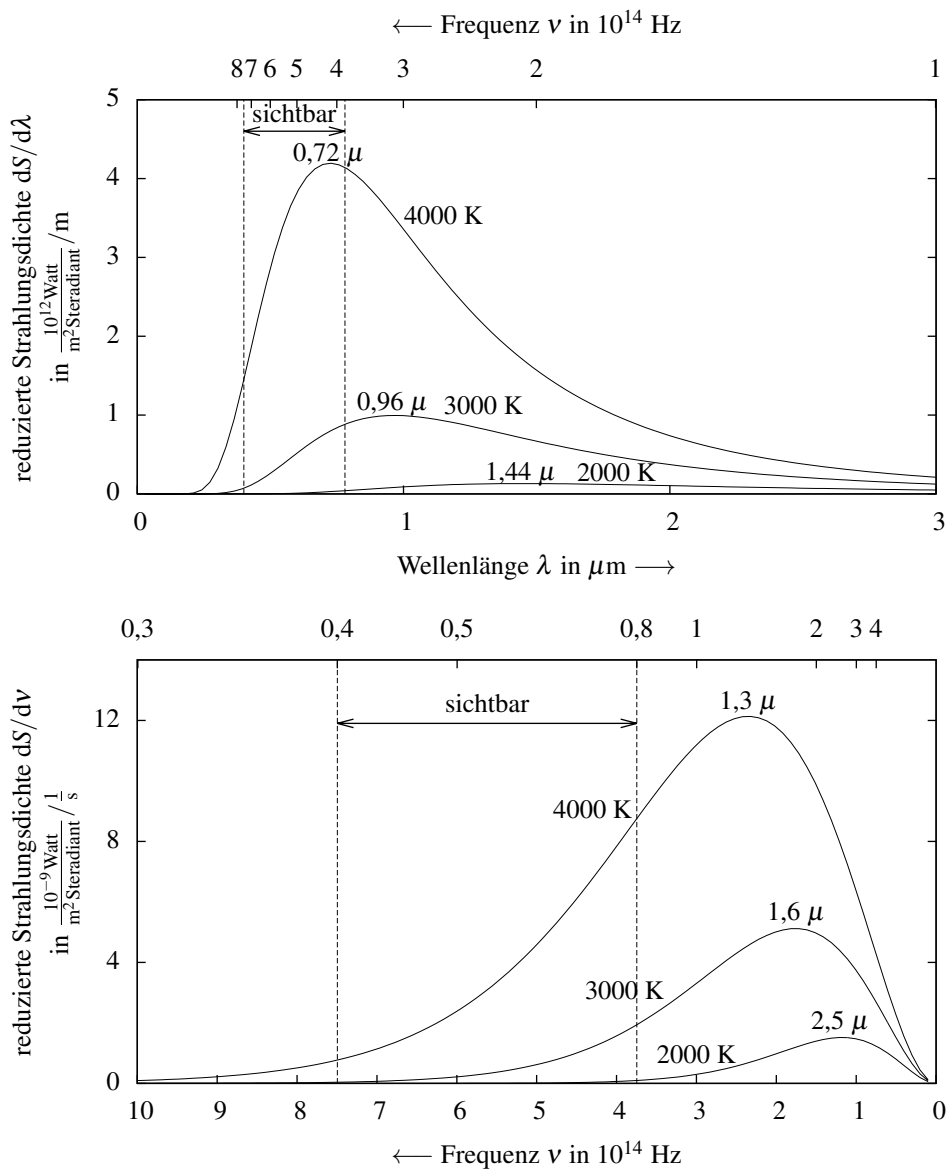
$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h\nu^3 d\nu}{c^3 (e^{h\nu/kT} - 1)}.$$

Im Zusammenhang mit Lichtquellen interessiert aber weniger die Energiedichte (bezogen auf das Volumen), als die spektrale Strahlungsdichte (bezogen auf die Fläche). Die Stromdichte einer Größe ist gleich dem Produkt aus der Dichte dieser Größe und der Geschwindigkeit der Strömung – in unserem Fall ist $c \cdot \rho(\nu, T) = 4\pi L(\nu, T)$, also folgt:

$$L(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{bzw.} \quad L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

In dieser Formel verdichten sich drei Säulen der Physik:

- die Elektrodynamik, repräsentiert durch die Lichtgeschwindigkeit c
- die Thermodynamik, repräsentiert durch die Boltzmann-Konstante k
- die Quantenmechanik, repräsentiert durch das Plancksche Wirkungsquantum h



[3]

3.2 Rayleigh-Jeanssche und Wiensche Strahlungsgesetz

Für die klassische Rechnung ($\bar{\epsilon} = kT$) oder bei der Näherung $e^x - 1 \approx x$ für $h\nu \rightarrow 0$ ergibt sich das Rayleigh-Jeanssche Strahlungsgesetz:

$$L(\nu, T) = \frac{2kT\nu^2}{c^2} \quad \text{bzw.} \quad L(\lambda, T) = \frac{2kTc}{\lambda^4}.$$

Diese Formel gilt zwar für kleine Frequenzen, wenn man aber –um die Gesamtleistung zu erhalten– über ν integriert, führt das bei großen Frequenzen $\rightarrow \infty$ offensichtlich zu Konflikten (Ultraviolett-Katastrophe).

Bei der Näherung $e^x - 1 \approx e^x$ für $h\nu \rightarrow \infty$ folgt das Wiensche Strahlungsgesetz:

$$L(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot e^{-h\nu/kT} \quad \text{bzw.} \quad L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot e^{-hc/kT\lambda}.$$

Es hat zwar ein Maximum, versagt aber für kleine Frequenzen.

Diese beiden Teilnäherungen waren schon vor dem Planckschen Strahlungsgesetz bekannt. Von diesen ausgehend, hatte Planck seine Strahlungsformel so aufgestellt, daß sie in den Grenzfällen mit diesen beiden Formeln übereinstimmt. Dann schloß er rückwärts und kam so zu der revolutionären These, daß die Lichtenergie quantisiert sei.

3.3 Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz

Integriert man über alle ν und Raumwinkel, erhält man für die Strahlungsleistung Φ das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz:

$$\boxed{\frac{d\Phi}{dA} = \sigma T^4} \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}.$$

3.4 Wiensche Verschiebungsgesetz

Man muß aber aufpassen, ob man die Planck-Kurve bezüglich ν oder λ betrachtet. Bei der Substitution wird aus

$$L(\nu, T)d\nu = \underbrace{L(\nu, T)}_{L(\lambda, T)} \frac{d\nu}{d\lambda} d\lambda.$$

$L(\nu, T)$ und $L(\lambda, T)$ sind also unterschiedliche Funktionen! Daher haben sie auch unterschiedliche Maxima. Bildet man die Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes ergibt sich nach Nullsetzen eine transzendente Gleichung. Löst man sie, erhält man das Strahlungsmaximum bei:

$$\boxed{\nu_m = (5,88 \cdot 10^{10} \text{ s K}) \cdot T \quad \text{bzw.} \quad \lambda_m = (2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m K})/T},$$

wobei

$$L(\nu_m, T) \sim \nu_m^3 \quad \text{bzw.} \quad L(\lambda_m, T) \sim \lambda_m^{-5}.$$

Zu einer soliden, physikalischen Halbbildung gehört die These: „Aufgrund der evolutionsgemäßen Anpassung liegt das Maximum der spektralen Empfindlichkeit unserer Augen im grünen Licht, wo auch das spektrale Strahlungsmaximum der Sonne liegt.“ Warum aber sind dann die Pflanzen grün? Warum reflektieren sie gerade das Maximum, anstatt es für ihre Photosynthesezwecke zu nutzen? Des Rätsels Lösung ist simpel: zwar liegt das Strahlungsmaximum der Sonne ($T \approx 5800 \text{ K}$) bezogen auf die Wellenlänge bei $\lambda \approx 500 \text{ nm}$

im Grünen. Aber bei der Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie ist die Resonanzfrequenz entscheidend. Trägt man die spektrale Emissionskurve statt über λ über ν ab, wird nicht nur die Kurve gespiegelt – da zu kleinen λ große ν gehören und umgekehrt – man muß auch mit $d\lambda/d\nu$ multiplizieren. Da große λ bis ∞ bei der Frequenz direkt am Anfang bei 0 bis kleine ν abgehandelt werden, muß – damit die Energiefläche trotzdem gleich bleibt – die Kurve höher werden, das Maximum verschiebt sich zu den kleineren ν . Bezüglich der Frequenz liegt das Strahlungsmaximum der Sonne bei $\nu \approx 340$ Thz, was $\lambda \approx 880$ nm entspricht. Das liegt nun aber im (Infra)roten. Wenn die Pflanzen das rote Licht absorbieren, bleibt die Komplementärfarbe – also Grün – übrig [1].

Aber nicht jede Strahlung findet ihre Ursache in der Temperaturstrahlung, es gibt auch kaltes Leuchten (Lumineszenz, z. B.: Fluoreszenz, Phosphoreszenz). Das Himmelsblau z. B. entsteht durch die Rayleigh-Streuung, die höhere Frequenzen mit ν^4 begünstigt. Wäre der Himmel ein thermischer Strahler, hätte er nach der Farbe eine Temperatur von 12 000 bis 27 000 K, was uns dann wohl doch zu warm wäre. Es gibt aber so heiße Sterne: Sirius 11 200 K, β Centauri 21 000 K [3]. Irdische, zivile, thermische Strahler haben aber meist eine niedrigere Temperatur, sodaß ihr Strahlungsmaximum im Infraroten liegt. So macht die Bezeichnung „Wärmestrahlung“ für Infrarotstrahlung Sinn, obwohl auch bei jeder anderen Strahlung Wärme entsteht, wenn sie absorbiert werden (wenn auch bei höheren Frequenzen zunächst Photoeffekt und Compton-Effekt auftreten können, ist das Endresultat meist doch Wärme).

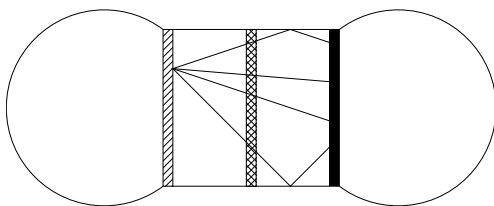
Gluttemperaturen [6]:

400 °C	Grauglut
525 °C	Dunkle Rotglut
1000 °C	Gelbglut
1200 °C	Beginn der Weißglut
1600 °C	Weißglut

4 Kirchhoffsche Gesetz [3]

Der Absorptionsgrad ist definiert als:

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallende Strahlungsleistung}}$$



Um das Emissionsverhalten für Körper mit α kleiner 1 zu ergründen, kann man ein Gedankenexperiment machen. Angenommen, zwei rechteckige Platten stehen sich gegenüber und haben jeweils mit einem Wärmereservoir thermischen Kontakt, die beide die gleiche Temperatur haben. Der

Raum zwischen den beiden Platten wird so durch vier Spiegel begrenzt, daß keine Strahlung entweichen kann – außerdem sind die Wärmereservoirs nach außen isoliert. Die Strahlung, die die eine Platte aussendet, kommt so zwangsläufig bei der anderen an. Der Wärme-strahlungsaustausch zwischen den beiden Platten muß ausgeglichen sein, würde sich die eine auf Kosten der anderen erwärmen, wäre dies ein Verstoß gegen den 2. Hauptsatz der Wärmelehre (Perpetuum mobile 2. Art). Angenommen, die eine Platte wäre völlig schwarz und die andere hätte den Absorptionsgrad α , also den Reflexionsgrad $(1 - \alpha)$, dann ergibt sich für die Strahlungsleistungen Φ der beiden Richtungen:

$$\Phi_{\alpha} + (1 - \alpha)\Phi_S = \Phi_S,$$

also

$$\Phi_{\alpha} = \alpha \Phi_S.$$

Dies sieht nun aus, wie eine simple Energiebilanz. Kirchhoff erkannte aber, daß dies auch differentiell, bezogen auf das Spektrum gilt. Schiebt man nämlich einen Spiegel zwischen die beiden Platten, der nur für einen kleinen Frequenzteil durchlässig ist, folgt:

$$\frac{d\Phi_{\alpha}}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda = \alpha(\lambda) \frac{d\Phi_S}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda,$$

also

$$\Phi'_{\alpha}(\lambda) = \alpha(\lambda) \Phi'_S(\lambda).$$

Der Emissionsgrad

$$\varepsilon = \frac{\text{emittierte Strahlungsleistung}}{\text{die Strahlungsleistung, die ein schwarzer Körper emittieren würde}} = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_S}$$

ist also gleich dem Absorptionsgrad: $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$.

Dieser unscheinbare Zusammenhang ist aber real erfahrbar. So ist eine Knallgasexplosion eine heiße Angelegenheit, aber im Gegensatz zum Lärm ist sie optisch ziemlich unspektakulär. Die Verbrennung von Magnesium dagegen wird als Blitzlicht genutzt. Da Magnesiumoxid ein Festkörper ist, der Licht absorbiert, kann er es im heißen Zustand auch emittieren. Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser absorbieren kaum Licht, somit entsteht bei einer Knallgasexplosion wenig Licht.

Die Kerzenflamme ist nur auf dem ersten Blick ein Gegenbeispiel, denn Paraffin ist ein Kohlenwasserstoff, bei dessen unvollständiger Verbrennung Ruß entsteht. Die Kerzenflamme leuchtet, da die Rußteilchen zum Glühen gebracht werden. Bei einem Bunsenbrenner wird das Kohlenwasserstoffgas vor dem Verbrennen mit Luft gemischt und verbrennt dann vollständig mit wenig Lichtentwicklung. Dreht man die Luftzufuhr ab, beginnt die Flamme zu rußen und lodert hell auf [3].

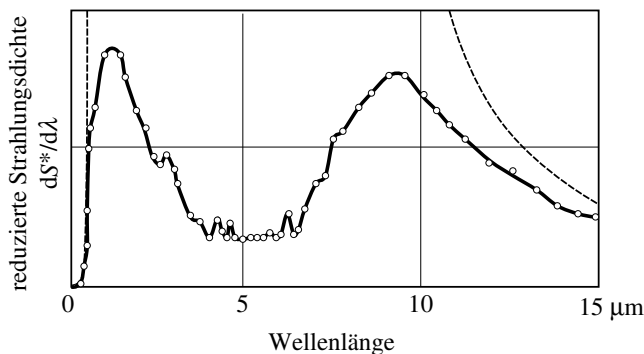


Abbildung 4: Reduzierte Strahlungsdichte, ausgezogene Kurve für den Auer-Strumpf, punktierte Kurve für den Schwarzen Körper gleicher Temperatur. [3]

maximum – das mit 5 μm im unsichtbaren Infraroten liegt – einen niedrigen Absorptionsgrad hat, aber im sichtbaren Bereich wieder möglichst schwarz ist. Dadurch wird der Wirkungsgrad wesentlich erhöht: um die Strahlungsenergie trotzdem loszuwerden, muß er stärker in den anderen Wellenlängen – also auch im sichtbaren Licht – strahlen und muß dafür heißer werden [3].

Schaut man durch das Guckloch eines Keramikbrennofens oder durch eine Klappe eines Hochofens, sieht man keine Einzelheiten. Gegenstände, die das Licht nicht absorbieren, reflektieren es, da sie angestrahlt werden. Gegenstände, die absorbieren, also auch nicht

In Gaslampen (heutzutage noch als Campinggaslampen im Gebrauch) werden Glühstrümpfe eingesetzt. Diese Auerstrümpfe bestehen aus Thoriumoxid mit 1 % Ceroxid. Im Gegensatz zur Kerze – wo der Ruß als schwarzer Strahler das gesamte Spektrum abstrahlt – wird der Glühstrumpf als Selektivstrahler mit einer Bunsenflamme erhitzt. Selektivstrahler deshalb, weil er im Strahlungs-

reflektieren, emittieren es selbst. Man kann also das dunkel verrostete Schrotteil nicht mehr erkennen, alles leuchtet einheitlich mit der typischen Schwarzkörper- bzw. Hohlraumstrahlung [3].

5 Candela und ihre Verwandten [2]

5.1 Hellempfindlichkeitskurven des Menschen [2]

Wir Menschen können nur eine Oktave vom Wellenlängenspektrum der elektromagnetischen Wellen sehen. Man hat zwei Hellempfindlichkeitskurven aufgenommen, da wir zwei unterschiedlich funktionierende Photosensoren besitzen. Für das Tagessehen – wo wir farbig sehen können – ermittelte man die Kurve $V(\lambda)$. Wenn es dunkler wird, sieht man keine Farben („Nachts sind alle Katzen grau“) mehr und erhält für das Nachtsehen $V'(\lambda)$. Die Kurven sind jeweils auf ihr Maximum normiert, wobei das Maximum beim Tagessehen mit $\lambda \approx 555$ nm im Grünen und für das Nachtsehen mit $\lambda \approx 510$ nm höherfrequenter im Blaugrünen liegt.

Die Helligkeitskurven sind individuell bei jedem Menschen verschieden, da sie von vielen Faktoren abhängen. Nicht nur die Empfindlichkeit der Photosensoren ist entscheidend, auch das Absorptionsverhalten von Brille, Hornhaut, Linse und Glaskörper haben Einfluß. Muß z. B. wegen grauen Stars die trüb gewordene Linse des Auges entfernt werden, können diese Menschen Licht bis 300 nm sehen – also das UV-A [5]! Die Helligkeitskurven wurden auf den „Normmenschen“ geeicht – ein Durchschnittsmensch. Allerdings ist dieser Normmensch nicht normal. Bei einem normalsichtigen Menschen liegt das Tagesempfindlichkeitsmaximum bei etwa 565 nm, da aber 10 % der Männer farbfahlsichtig sind, ergibt sich für die Durchschnittskurve ein Maximum bei 555 nm [3]. Die Helligkeitskurven sind also eine Konvention, bei dessen Definition eine gewisse Willkür herrscht. Die Frage, bei welchen Wellenlängen denn nun genau das sichtbare Licht anfängt bzw. aufhört, ist bei der glockenartigen Kurve sinnlos – daher ergeben sich auch unterschiedliche „etwa“-Angaben.

Die physikalischen Strahlungsgrößen hängen über diese Helligkeitskurven mit den physiologischen Licht/Leuchtgrößen zusammen. Die jeweiligen *Strahlungsgrößen* X_e erhält man aus den *spektralen Strahlungsgrößen* $X_{e\lambda}$ einfach, indem man über das Spektrum integriert:

$$X_e = \int_l^\infty X_{e\lambda}(\lambda) d\lambda,$$

Bei den physiologischen Lichtgrößen wirken die Helligkeitskurven als Wichtungsfunktion:

$$\begin{aligned} X_v &= K_m \int_0^\infty X_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad \text{mit} \quad K_m = 683 \text{ lm/W}, \\ X'_v &= K'_m \int_0^\infty X_{e\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \quad \text{mit} \quad K'_m = 1725 \text{ lm/W}. \end{aligned}$$

Allerdings sind die Lichtgrößen des Tagessehens wichtiger, sodaß man die des Nachtsehens häufig ignoriert.

5.2 Gegenüberstellung der jeweiligen Strahlungs- und Lichtgrößen [2]

Die **Strahlungsleistung** Φ wird natürlich in Watt gemessen, die dazugehörige Lichtgröße heißt Lichtstrom und wird in Lumen (lm) berechnet. Lumen ist also ein spektral vom Auge bewertetes Watt.

Die Lichtausbeute η ist der Quotient aus abgestrahltem Lichtstrom und der zur Erzeugung aufgenommen (elektrischen) Leistung:

$$\eta = \frac{K_m}{P} \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda.$$

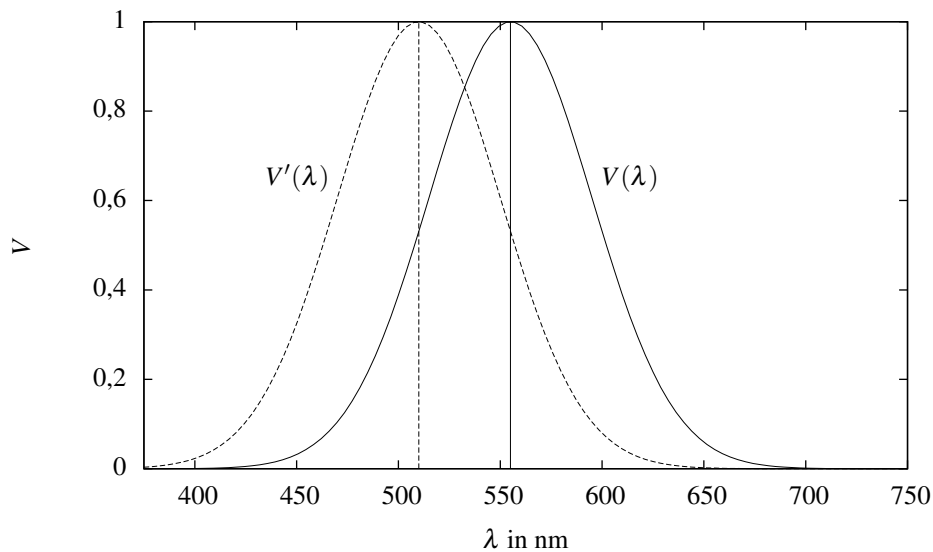


Abbildung 5: [2]

Der visuelle Nutzeffekt V ist der Quotient aus der gemäß der Helligkeitskurve bewerteten Strahlungsleistung zur Gesamtstrahlungsleistung:

$$V = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}.$$

Es ist allerdings Vorsicht angebracht, es gibt z. B. auch den optischen Nutzeffekt O :

$$O = \frac{\int_{780\text{nm}}^{380\text{nm}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}.$$

Nicht nur, daß die Integralgrenzen recht willkürlich sind, ich halte ihn auch sonst für recht nutzlos: was nützt eine kräftige Emissionslinie kurz vor dem Ende der Sichtbarkeit, die man kaum sieht?

Eine Lampe mit 100%igem Wirkungsgrad würde, wenn sie im Helligkeitsmaximum monochromatisch grünes Licht abstrahlt, 683 Lumen pro Watt produzieren. Bei jeder anderen Frequenz oder bei einem Frequenzgemisch ist die Helligkeit natürlich kleiner als im spektralen Helligkeitsmaximum – bei der Sonne ergibt sich ein visueller Nutzeffekt von etwa 14 %. Eine weiße 65-W-Leuchtstoffröhre hat z. B. 5100 Lumen, eine 100-W-Glühbirne 1400 Lumen [4].

Bei einem Scheinwerfer erhöhen die Parabolspiegel- und Linsensysteme nicht die Strahlungsleistung – die ist durch die Glühbirne gegeben. Man bündelt das Licht aber in eine Richtung. Erhöht wird dadurch die **Strahlungsstärke** I , das ist die Strahlungsleistung/Raumwinkel. Die Einheit der **Lichtstärke** ist das Candela ($\text{cd} = \text{lm/sr}$). Ein Punktstrahler mit einem Candela hat also 4π Lumen, allerdings sind echte Punktstrahler selten. Die Sonne z. B. ist kugelsymmetrisch und strahlt die Lichtstärke richtungsunabhängig aus, hat also eine kugelsymmetrische Strahlcharakteristik. Eine Glühbirne nicht! Es ist ein Unterschied, ob wir frontal auf die Wendel schauen oder von der Seite.

Die Bestrahlungsstärke E ist die Lichtleistung/Fläche. Die Beleuchtungsstärke wird in Lux ($\text{lx} = \text{lm/m}^2$), die Dunkelbeleuchtungsstärke in Nox ($\text{nx} = 10^{-3} \cdot \text{lm/m}^2$) gemessen [3].

Beispiele [7]:

Mondschein	0,2 Lux
dunkler Gang	20 Lux
Treppenhaus	120 Lux
Wohnzimmer	200 Lux
Buch lesen	500 Lux
Uhrmacher	3000 Lux
Sonnenlicht	bis 70 000 Lux

Die spektrale Strahlungsdichte $L(\nu)$ wurde ja schon behandelt, die **Strahlungsdichte** L ist die Lichtstärke pro Fläche:

$$L = \frac{dI}{\cos \vartheta dA}.$$

Damit wird die **Leuchtdichte** also davon unabhängig, ob man frontal auf eine ebene Fläche schaut oder schräg und von welcher Entfernung. Sie sagt z. B. etwas darüber aus, ob man durch eine Lichtquelle geblendet wird oder nicht. Die Leuchtdichte wurde in Stilb ($sb = \text{cd}/\text{cm}^2$), die Dunkelleuchtdichte in Skot ($sk = 10^{-7}/\pi \cdot \text{cd}/\text{cm}^2$) gemessen. Angenommen, eine ebene Fläche von 1 cm^2 leuchtet als Lambert-Strahler mit einem Stilb, dann hat sie π Lumen, denn

$$\int_{\text{Halbkugel}} \cos \vartheta d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \pi.$$

Beispiele [7]:

Kerze	1 Stilb
Leuchtstoffröhre	1 Stilb
mattierte Glühbirne	2 Stilb
Na-Straßenlaterne	5 Stilb
Glühbirnendraht	200–2000 Stilb
Sonne	150 000 Stilb

Noch einmal in der Zusammenfassung:

Symbol	Strahlungsgröße	Einheit	Lichtgröße	Einheit
Φ	Strahlungsleistung	W	Lichtstrom	$\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$
$I = d\Phi/d\Omega$	Strahlungsstärke	W/sr	Lichtstärke	cd
$E = d\Phi/dA$	Bestrahlungsstärke	W/m ²	Beleuchtungsstärke	$\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$
$L = dI/(\cos \vartheta dA)$	Strahlungsdichte	W/(sr · m ²)	Leuchtdichte	$\text{sb} = \text{cd}/\text{m}^2$

5.3 Candela als Basiseinheit [2]

Die Basiseinheiten des SI-Systems sind:

- das Meter
- die Sekunde
- das Kilogramm
- das Ampere
- das Kelvin
- das Mol
- die Candela

Daß die anthropozentrische Candela zu den Basiseinheiten gezählt wird, hat wohl rein historische Gründe. Schließlich ist die spektrale Helligkeitskurve $V(\lambda)$ individuell verschieden und wurde willkürlich auf den Normmenschen geeicht, der nirgendwo existiert. Genausogut hätte man das Phon (der Logarithmus der vom menschlichen Ohr bewerteten Schallintensität) zur Basiseinheit erheben können.

Die Candela (lateinisch für Kerze) wurde 1940 definiert als die Lichtstärke, die von einem schwarzen Strahler mit $1/60 \text{ cm}^2$ bei der Temperatur von schmelzendem Platin unter dem Druck von einer Atmosphäre ausgeht. Das $1/60$ hängt wohl damit zusammen, daß man in dem Bereich der älteren Lichtstärkeeinheiten liegen wollte (Hefner-Kerze und internationale Kerze). Von der Wahl des Platinschmelzpunktes erhoffte man, eine experimentell gut einstellbare Temperatur gewählt zu haben. Um eine konstante Temperatur von 100°C zu erhalten, arbeitet man in der Küche mit einem Wasserbad, da die Temperatur ab Einsetzen des Wasserkochens konstant gehalten wird. Nach dem gleichen Prinzip bleibt die Temperatur einer Platinschmelze – ab Beginn des Schmelzens bis zu dem Zeitpunkt, wo alles geschmolzen ist – konstant bei der Platinschmelztemperatur. Allerdings gab es zwei Probleme: einerseits gibt keine völlig schwarzen Strahler, andererseits senkt jede Verunreinigung des Platins dessen Schmelzpunkt. Das ist bei einer T^4 -Abhängigkeit der Strahlungsdichte unangenehm. Trotz großem Aufwands war die Candela so nur auf einige Promille genau realisierbar – im Gegensatz zu den anderen fünf Basiseinheiten.

Seit 1979 ist sie neu definiert worden. Es läuft eigentlich auf eine Definition des Lumens hinaus: $1 \text{ lm} = 1/683 \text{ W}$ bei monochromatischem Licht mit 540 THz . Das entspricht $\lambda \approx 555 \text{ nm}$, wo wir ja bekanntlich das Maximum der Hellempfindlichkeit haben. Es wurde über die Frequenz definiert, da sie im Gegensatz von der Wellenlänge vom Medium unabhängig ist. Somit wurde die Candela mehr oder weniger auf die anderen Basiseinheiten zurückgeführt. Gelingen ist, daß nach der alten Definition statt 683 etwa 673 Lumen ein Watt ergeben hätten. Die Candela liefert also als Basiseinheit ein Fundament, auf das man bauen kann! Aber man hat wohl Hemmungen, der Candela endgültig den Rang einer Basiseinheit zu nehmen.

Literatur

- [1] Gerthsen/Kneser/Vogel: *Physik*, Springer-Verlag, 16. Aufl.: S. 538, 541, 543, 560
- [2] Bergmann/Schäfer: *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Walter de Gruyter, Band III, 8. Aufl.: S. 642, 675, 678
- [3] Pohl: *Optik und Atomphysik*, Springer-Verlag, 13. Aufl.: S. 255, 256, 258, 259, 261, 296
- [4] Bahr: *Elektrotechnik und Elektronik*, Philips Lehrbriefe, Band 2, 6. Aufl.: S. 414, 418
- [5] Hecht: *Optik*, Addison-Wesley, 2. Aufl.: S. 72
- [6] Lexikon: *Brockhaus der Naturwissenschaften und der Technik*, 7. Aufl.: S. 306
- [7] Heel/Velzel: *Was ist Licht*, Kindlers Universitäts Bibliothek, 1. Aufl.: S. 162, 168

Die Herleitung des Planckschen Strahlungsgesetzes stammt aus Greiner, Joos, Mene/Simon und Gerthsen/Kneser/Vogel.