

Fotometrie: Zahlenmäßige Beschreibung von Licht

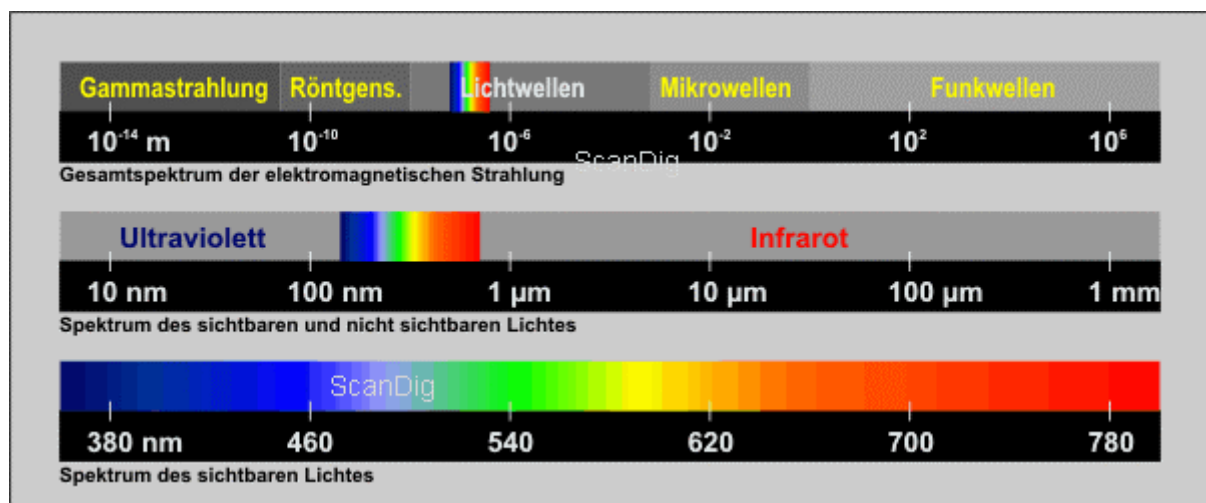
Wer sich zu Hause ein Heimkino einrichtet oder in einer Firma einen Präsentationsraum gestaltet und sich für diese Zwecke einen Beamer, einen Projektor oder eine große Leinwand kauft, wird mit Begriffen wie Lux, Lumen, Candela, Leuchtdichte, Leuchtstärke oder Helligkeit wahrlich erschlagen. Und selbst wer sich nur für seinen PC einen Flachbildschirm kauft, findet als Hauptauswahlkriterium die Angabe der Helligkeit in cd/m^2 .

Kaum jemand ist in der Lage, mit solchen Größen und Zahlen etwas anzufangen. Klar ist, je mehr ANSI-Lumen ein Beamer hat, desto heller leuchtet er. Klar ist auch, je mehr cd/m^2 ein TFT-Bildschirm hat, desto heller ist das Display. Aber was bedeuten diese Angaben wirklich? Was ist der genaue physikalische Hintergrund dieser Werte? Bei vielen Werten in der modernen Informationswelt kann man sich etwas darunter vorstellen, auch wenn man kein naturwissenschaftliches Studium hinter sich hat: Unter 7200 U/min bei einer Festplatte kann man sich genau so etwas vorstellen wie unter 3,8 GHz Taktfrequenz bei einem Prozessor. Auch eine Auflösung von 4000 dpi bei einem Scanner kann man sich gut veranschaulichen genauso wie die Zahl von 10 Megapixeln bei einer Digitalkamera. Aber unter Lux und Lumen kann sich der Normalverbraucher überhaupt nichts mehr vorstellen.

Diese Seite gibt eine Einführung in das Thema Fotometrie. Dabei handelt es sich um einen Teilbereich der Optik, die wiederum ein Teilbereich der Physik darstellt. Ziel dieser Seite ist es nicht, ein Physik-Kompendium über Fotometrie wiederzugeben sondern für Begriffe wie Lux, Lumen, Candela und Leuchtstärke den physikalischen Hintergrund sowie die Zusammenhänge untereinander zu erläutern. Auch für denjenigen, der sich keine Nachhilfestunde in Physik antun möchte, sind wichtige Zusammenhänge und Hintergründe ausführlich und anschaulich erläutert.

Einführung in die Fotometrie

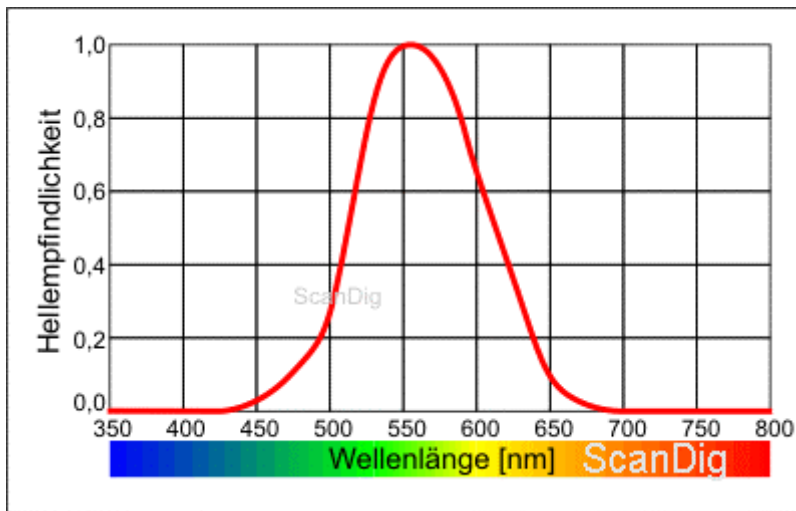
Auf unserer Seite über das Kapitel [Farbtemperatur](#) wird elektromagnetische Strahlung behandelt. Dabei werden Größen und Formeln gezeigt, die für das gesamte Strahlungsspektrum gelten. Die Fotometrie pickt sich aus dem riesigen Spektrum elektromagnetischer Strahlung nur den winzigen Bereich der sichtbaren Strahlung zwischen 380 nm und 780 nm heraus. Die folgende Grafik zeigt, wie klein der Bereich des sichtbaren Lichtes im breiten elektromagnetischen Spektrum ist.



Die elektromagnetische Strahlungsleistung im Bereich des sichtbaren Lichtes lässt sich mit sogenannten Fotometern messen. Die Fotometrie behandelt solche Messgrößen und

abgeleitete Größen nicht nur innerhalb des eingeschränkten Strahlungsspektrums, sondern sie setzt die Messwerte auch noch in Beziehung zum subjektiven Sinneseindruck des menschlichen Auges. Die Fotometrie bildet also die physiologische [Farbwahrnehmung](#) des menschlichen Auges messtechnisch nach.

Um zu verdeutlichen, inwieweit sich die menschliche Farbwahrnehmung messtechnisch erfassen lässt, machen wir ein kleines Experiment: Wir betrachten eine rote und eine grüne LED, die beide dieselbe Strahlungsleistung abgeben. Mit einem objektiven Messgerät würde man bei beiden Leuchtdioden die gleiche Strahlung messen, die beiden LEDs wären also gleichwertig. Dem menschlichen Auge erscheint die grüne LED jedoch um ein Vielfaches heller also die rote. Die Augenempfindlichkeit hängt also von der Wellenlänge des Lichtes ab.



Diese Abhängigkeit der Hellempfindlichkeit von der Wellenlänge ist in sogenannten Hellempfindlichkeitskurven von der CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) für einen Standard-Beobachter festgehalten. Es gibt mehrere solcher Kurven für verschiedene Lichtverhältnisse. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Kurve $V(\lambda)$ für Tageslicht. Wir erkennen ein Maximum bei ungefähr 550 nm, also bei grünem Licht. Bei rotem Licht ist die Hellempfindlichkeit um mehr als den Faktor 10 geringer; daher nehmen wir die rote LED (Wellenlänge ca. 650 nm) viel dunkler wahr als die grüne (Wellenlänge ca. 550 nm), obwohl sie physikalisch die gleiche Strahlungsleistung abgeben.

Strahlungsleistung, Lichtstrom und Lichtausbeute

Was passiert eigentlich, wenn man eine Lampe mit einer 100 W starken Glühbirne einschaltet? Ein Strommessgerät zeigt einem eine Stromstärke von 0,43 A an; bei einer Netzspannung von 230 V entspricht dies genau der Leistungsaufnahme von $P = 230 \text{ V} \times 0,43 \text{ A} = 100 \text{ W}$. Diese Energie steckt man also in die Lampe hinein und bezahlt den entsprechenden Stromverbrauch. Aber was erhält man dafür? Nun, man erhält 100 Watt starkes Licht - so zumindest sagt es der Volksmund und so steht es auf der Verpackung der Glühbirne drauf. Aber denkste! 100 Watt ist die Leistungsaufnahme und nicht die Leistungsabgabe.

Wer sich schon mal an einer 100 W Birne die Finger verbrannt hat weiß, dass ein Großteil der aufgenommenen Energie in Form von Wärme abgegeben wird. Was im Winter ein angenehmer Nebeneffekt ist, stellt sich im Sommer natürlich als reine Energieverschwendung heraus. In der Tat heizt sich im Innern einer Glühbirne ein kleiner Wolfram-Draht auf Tausende von Grad auf; das Gas innerhalb des Glaskörpers verhindert ein Durchschmoren des Glühdrates. Der Wolfram-Draht gibt die aufgenommene Leistung in Form von Strahlung wieder ab. Auf der Seite [Farbtemperatur](#) haben wir

Strahlungsspektren verschiedener Körper untersucht. Charakteristisch für ein solches Strahlungsspektrum ist, dass sich die Strahlung über einen weiten Bereich erstreckt. Der Bereich des sichtbaren Lichts ist nur ein kleiner Ausschnitt aus dem riesigen Strahlungsspektrum, das eine leuchtende Glühbirne von sich abgibt.

$$\Phi_v = \eta \cdot P$$

Dieses sichtbare Spektrum ist aber gerade derjenige Bereich, der uns bei der Beurteilung einer Glühbirne interessiert. Diejenige Strahlungsleistung, die eine Glühbirne im Bereich des sichtbaren Lichts abgibt, wird als **Lichtstrom Φ_v** bezeichnet. Die Maßeinheit für den Lichtstrom ist **Lumen [lm]**. Das Verhältnis aus Lichtstrom und Leistungsaufnahme wird als Lichtausbeute bezeichnet. Die Lichtausbeute ist also quasi der Wirkungsgrad einer Lichtquelle. Bei unserer 100 W Glühbirne ist die Lichtausbeute gerade mal 15 lm/W. Bei einer Leistungsaufnahme von 100 W erhalten wir also gerade mal einen Lichtstrom von 1500 lumen. Der Rest geht in Form von nicht sichtbarer Strahlung und Wärmestrahlung verloren.

Was bedeutet nun der Begriff Lichtstrom? Und warum wird als Einheit Lumen und nicht Watt verwendet? Watt ist eine physikalische Größe und bedeutet Arbeit pro Zeit, d.h. eine Stromquelle liefert mir einen gewissen Energiefluss und leistet für mich eine bestimmte Arbeit in einer bestimmten Zeit. Ähnlich kann man sich den Begriff Lichtstrom erklären: Eine gewisse Menge Licht wird in einer gewissen Zeit ausgestrahlt; solange die Glühlampe leuchtet, hält der Lichtstrom an. Während Watt eine physikalische Einheit ist, ist Lumen eine physiologische Größe.

Lichtquelle	Lichtstrom
Leuchtdiode	0,01 lm
Glühlampe 60 W	600 lm
Glühlampe 100 W	1500 lm
Leuchtstoffröhre 40 W	2300 lm
Quecksilberdampf Lampe 100 W	4500 lm

Um den Unterschied zu verstehen erinnern wir uns zurück an die rote und grüne Leuchtdiode, die uns trotz gleicher Strahlungsleistung unterschiedlich hell vorkommen. Der Grund liegt darin, dass die energetische Strahlungsleistung (bei beiden gleich) mit dem Hellempfindlichkeitsgrad (siehe Kurvendiagramm oben) bei der jeweiligen Wellenlänge multipliziert wird, um den Lichtstrom zu erhalten. Bei einer Glühlampe, die weißes Licht im Bereich zwischen 380 und 780 nm abgibt, muss für jede einzelne Frequenz eine Multiplikation mit der Hellempfindlichkeit erfolgen, um schließlich nach abschließender Summation den Lichtstrom zu erhalten. Da aber das Hellempfindlichkeitsdiagramm auf Beobachtungen mit zahlreichen Testpersonen basiert, ist der Lichtstrom und damit auch die Einheit Lumen eine empirische, physiologische Größe.

In der Fotometrie wird Licht also nicht nach seiner physikalischen Leistung oder Energie bewertet, sondern es wird die physiologische Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges zugrunde gelegt. Der Lichtstrom Φ_v einer Lichtquelle ist eine Leistungsgröße (Watt) und wird in der empirischen, physiologischen Einheit Lumen [lm] angegeben.

Zum Abschluss dieses Unterkapitels sei das oben gesagte noch anhand zweier Formeln präzisiert. Der Lichtstrom Φ_v berechnet sich für eine monochromatische Lichtquelle, also Licht mit nur einer einzigen Wellenlänge λ , als Produkt aus dem maximalen fotometrischen Strahlungsäquivalent K_m , der physikalischen Strahlungsleistung Φ_e und dem für die jeweilige Wellenlänge λ zugehörigen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$, der aus obigem Kurvendiagramm abgelesen werden kann.

$$\Phi_v = K_m \cdot \Phi_s \cdot V(\lambda)$$

Das fotometrische Strahlungsäquivalent K_m gibt die theoretisch maximal mögliche Lichtausbeute für eine Lichtquelle an. Sein Wert beträgt 683 Lumen/Watt. Bei einer Wellenlänge von 555 nm ist der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ genau 1 (siehe Grafik oben). Dies bedeutet, dass eine monochromatische Lichtquelle, die mit $\lambda = 555$ nm (grün) mit der physikalischen Strahlungsleistung von 1 W strahlt, einen Lichtstrom von 683 lm erzeugen kann.

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

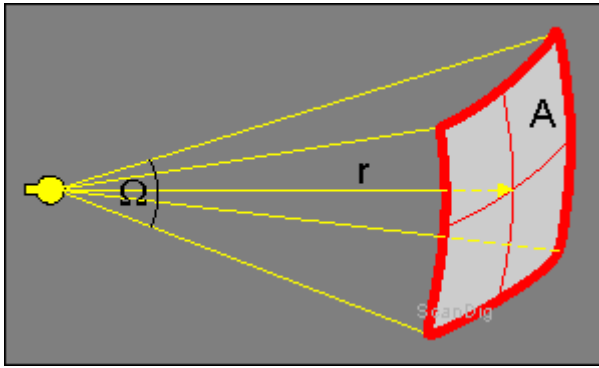
Monochromatisches Licht kommt in der Natur gar nicht vor und ist im Labor nur mit Hilfe eines Lasers erzeugbar. In der Natur kommt polychromatisches Licht vor, also Mischlicht mit einem breiten Spektrum von Wellenlängen. Für solches buntes Licht muss die physikalische Strahlungsleistung für jede einzelne Wellenlänge mit dem zugehörigen Hellempfindlichkeitsgrad multipliziert werden, um den tatsächlichen Lichtstrom zu berechnen. Mathematisch wird dies durch eine Integration über den Bereich des sichtbaren Lichts zwischen 380 nm und 780 nm dargestellt (siehe nebenstehende Formel).

Zum Abschluss dieses Kapitels sei noch erwähnt, dass die meisten Strahler den größten Teil ihrer Strahlungsleistung nicht im sichtbaren Wellenlängenbereich sondern im Infrarotbereich abgeben. Solche Strahlung kann zum Beispiel mit Infrarotkameras (auch als Wärmekameras bezeichnet) sichtbar gemacht werden. Und aus diesem Grunde auch ist die Lichtausbeute von Lichtquellen äußerst bescheiden. Unsere 100 W Glühlampe aus dem einführenden Beispiel wandelt also nur ungefähr 16% der aufgenommenen elektrischen Leistung in nutzbares Licht um.

Lichtstärke, Candela und Steradian

Im vorigen Kapitel haben wir mit dem Lichtstrom Φ_v eine Leistungsgröße für eine Lichtquelle gefunden, mit der wir ausdrücken können, wieviel Energie eine Lichtquelle pro Zeit im sichtbaren Wellenlängenbereich abstrahlt. Doch selbst mit dem Lichtstrom können wir als Charakteristikum für eine Lichtquelle ziemlich wenig anfangen; was sagt uns ein Zahlenwert von 1500 Lumen für eine normale Glühbirne schon aus? Und überhaupt, es spielt doch eine entscheidende Rolle, ob wir die Glühbirne von unten, von der Seite oder gar von hinten betrachten, nicht? Also müssen wir noch irgendwie berücksichtigen, dass eine Lichtquelle in unterschiedliche Richtungen verschiedenartig abstrahlt. Aber wie definieren wir die Richtung? Wir müssen einen kurzen Ausflug in die Mathematik machen.

Wenn wir auf einer ebenen Landkarte eine Richtung angeben, nutzen wir einfache Angaben wie Norden oder Osten oder auch detailliertere Angaben wie 30° östliche Richtung. Wir geben die Richtung also als ebenen Winkel an, wobei eine volle Kreisumdrehung 360° bedeutet. Im sogenannten ebenen Bogenmaß entspricht eine volle Umdrehung dem Kreisumfang von $U = 2 \pi r$ bzw. dem Winkel von 2π rad; der Vollwinkel ist also 2π . Zu einem Kreisbogen s im Abstand r vom Kreiszentrum berechnen wir den zugehörigen Bogenmaßwinkel gemäß $\alpha = s / r$.



$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

Nun strahlt unsere Glühlampe jedoch nicht in der Ebene sondern im Raum. Wir müssen also statt Ebenenwinkel Raumwinkel betrachten. Einen Raumwinkel berechnet man analog zum ebenen Winkel gemäß $\Omega = A / r^2$. Die Einheit für einen Raumwinkel ist Steradian. Die nebenstehende Abbildung veranschaulicht einen Raumwinkel Ω . Analog zum Ebenenwinkel, wo der Vollkreis 2π rad beträgt, ist beim Raumwinkel der Vollwinkel (die gesamte Kugel) 4π sr. Nehmen wir als Beispiel einen Raumwinkel der Größe 1 sr. In der nebenstehenden Zeichnung entspricht dies einem Öffnungswinkel von ca. 65° . Bei einem Kugeldurchmesser von $r = 1$ m schneidet dieser Raumwinkel eine Fläche von $A = 1$ m² aus der Kugeloberfläche aus. Für diejenigen, dem die letzten beiden Abschnitte zu viel Mathematik waren, halten wir kurz fest:

Der Raumwinkel Ω berechnet sich aus der Fläche eines Kugeloberflächen-Segment geteilt durch dem Quadrat des Radius der Kugel. Er wird in Steradian [sr] angegeben.

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega}$$

Dieser kleine Ausflug in die Welt der Mathematik war notwendig, um den Begriff des Raumwinkels zu erklären und zu veranschaulichen. Damit können wir endlich den wichtigen Begriff der Lichtstärke einführen: Die Lichtstärke I_v berechnet sich als Quotient aus dem Lichtstrom Φ_v und dem von ihm durchstrahlten Raumwinkel Ω , also wieviel Lichtenergie pro Zeit in einen gewissen Winkelbereich von der Lichtquelle abgestrahlt wird. Die Einheit der Lichtstärke ergibt sich aus dem Quotienten zu lm/sr (Lumen/Steradian). Für diese wichtige Größe gibt es eine eigene Einheit namens Candela mit der Abkürzung cd. Halten wir dieses wichtige Ergebnis zuerst einmal fest, ehe wir uns die Lichtstärke veranschaulichen:

Die Lichtstärke I_v einer Lichtquelle berechnet sich aus dem Lichtstrom, der in einen bestimmten Raumwinkel abgestrahlt wird. Die Einheit der Lichtstärke ist Candela [cd = lm/sr]. Die Lichtstärke ist unabhängig vom Abstand zur Leuchtquelle; sie hängt nur vom betrachteten Raumwinkel ab.

Kommen wir nochmals zurück auf unser Beispiel mit der 100 W Glühlampe, für die wir im vorigen Kapitel einen Lichtstrom von ungefähr 1500 lm ermittelt haben. Diesen Energiestrom von 1500 lumen strahlt die Glühbirne als Gesamtes in alle Richtungen ab; alle Richtungen bedeutet jedoch, wie wir im vorletzten Absatz hergeleitet haben, einen Raumwinkel von 4π sr. Wir berechnen für diese Glühbirne also eine Lichtstärke von $I_v = 1500 \text{ lm} / 4\pi \text{ sr} = 120 \text{ cd}$. Zum Vergleich: Eine kleine Kerze erzeugt eine Lichtstärke von ungefähr 1 cd.

Bei der Berechnung der Lichtstärke für unsere Glühbirne sind wir davon ausgegangen, dass sich der gesamte Lichtstrom gleichmäßig in alle Richtungen verteilt. In der Praxis strahlt eine Glühbirne jedoch unterschiedlich stark in seine Richtungen. So strahlt die

100 W Glühbirne sicher mit mehr als 150 cd direkt nach unten, während sie zur Seite mit weniger als 100 cd leuchtet. In sogenannten Lichtverteilungskurven wird grafisch veranschaulicht, wie ein Strahler in unterschiedliche Richtungen strahlt. Durch Reflektoren kann die Lichtverteilung bewusst gesteuert werden (siehe Lampen-Gehäuse).

Zum Abschluss dieses Kapitels sei noch erwähnt, dass auch die Lichtstärke eine fotometrische Größe ist, also physiologische Eigenschaften des Beobachters enthält. Bereits der zur Berechnung der Lichtstärke verwendete Lichtstrom Φ_v berücksichtigt die physiologischen Eigenschaften des menschlichen Auges. Hinzu kommt, dass Lichtquellen vom Menschen unterschiedlich beurteilt werden: Eine gleich starke Lichtquelle wird vom Menschen als stärker empfunden, wenn sie winzig klein ist als wenn sie eine große Leuchtfläche besitzt.

Beleuchtungsstärke, Lux

Im vorigen Kapitel haben wir uns mit der Lichtstärke einer Lichtquelle befasst. Mit der Lichtstärke können wir die Stärke einer Lichtquelle beschreiben, indem wir zahlenmäßig angeben, wieviel Lichtstrahlung pro Sekunde in einen bestimmten Raumwinkel abgestrahlt wird. Nun interessiert uns aber oftmals nicht nur die Stärke der Lichtquelle sondern deren Auswirkung auf eine bestimmte Situation. Im Büro interessiert mich nicht die Lichtstärke der Leuchtstoffröhre über mir sondern vielmehr ob mein Arbeitsplatz richtig ausgeleuchtet ist. Und in meinem Heimkino interessiert mich auch nicht so sehr die Lichtstärke meines Beamers als viel mehr, ob genügend Licht auf der Leinwand ankommt. Wir kommen jetzt also vom Sender (Lichtquelle) zum Empfänger.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A}$$

Ein Empfänger ist im Kino oder zu Hause im Wohnzimmer die Leinwand, im Büro ist der Schreibtisch der Empfänger, und im Treppenhaus sind die Stufen der Treppe der Empfänger. Um zu beschreiben, wie ein Lichtempfänger beleuchtet wird, interessiert also, welcher Lichtstrom auf den Empfänger trifft. Mathematisch ist dies der Quotient aus Lichtstrom Φ_v und der Empfängeroberfläche A . Dieser Quotient wird als Beleuchtungsstärke (in der Radiometrie Bestrahlungsstärke) bezeichnet. Seine Einheit ist Lux (Abkürzung lx) und berechnet sich aus lm / m^2 . Halten wir dieses Ergebnis kurz fest:

Die Beleuchtungsstärke E_v eines Licht-Empfängers berechnet sich aus dem Lichtstrom, der auf eine bestimmte Empfänger-Fläche trifft. Seine Größe wird in Lux [$\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$] angegeben. Die Beleuchtungsstärke ist eine reine Empfängergröße und dient als Maß für die Helligkeit.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} = \frac{I_v \cdot \Omega}{A} = \frac{I_v}{r^2}$$

Umgangssprachlich ist die Beleuchtungsstärke ein Maß für die Helligkeit an einem bestimmten Ort. Bildlich gesprochen gibt die Beleuchtungsstärke also an, wieviel Licht tatsächlich an einem bestimmten Fleck eintrifft. Unter der Einheit Lux kann man sich zwar wenig vorstellen; wenn man jedoch einige Beispielwerte aus der nebenstehenden Tabelle herausliest und sich diese merkt, dann kann man ungefähr einschätzen, wie hell 100 lx oder 500 lx sind. Wer sich merkt, dass nachts eine Straße mit ungefähr 10 Lux beleuchtet wird, während man sich in Räumen je nach Aufgabe einige Hundert Lux an Beleuchtungsstärke schafft, kann leicht einschätzen, was zum Beispiel 150 lx bedeuten.

Mittagssonnenlicht im Sommer	100.000 Lux
Bedeckter Himmel im Sommer	10.000 Lux
Regenwetter mit dunklen Gewitterwolken	1000 Lux
Bürobeleuchtung	500 Lux
Wohnzimmerbeleuchtung	200 Lux
Treppenhausbeleuchtung	100 Lux
Straßenbeleuchtung	10 Lux
Dämmerlicht nach Sonnenuntergang	1 Lux
Mitternacht bei Vollmond	0,2 Lux
Mondloser Sternenhimmel bei Nacht	0,0005 Lux

Auf einen sehr wichtigen Zusammenhang möchte ich zum Abschluss des Kapitels noch eingehen: Setzt man in der Formel für die Beleuchtungsstärke für den Lichtstrom das Produkt aus Lichtstärke und Raumwinkel ein, und setzt man dann wiederum für den Raumwinkel den Quotienten aus Fläche und dem Quadrat des Abstandes ein, so erhält man als einfache Formel für die Beleuchtungsstärke einen Quotienten aus der Lichtstärke und dem Quadrat des Abstandes zum Empfänger. Diese Herleitung ist in oben abgebildeter Formel noch einmal gezeigt. Als Ergebnis erhalten wir, dass bei einer konstanten Lichtstärke I_v einer Leuchtquelle die Beleuchtungsstärke einer Empfängerfläche mit dem Quadrat des Abstandes r zur Lichtquelle abnimmt. Halten wir dieses wichtige Ergebnis nochmals fest:

Die Beleuchtungsstärke eines Empfängers nimmt mit dem Quadrat des Abstandes zur Lichtquelle ab.

Beispiele: Eine Deckenlampe, die aus 2 m Höhe eine Schreibtischfläche mit 400 lx ausleuchtet, liefert nur noch 100 lx, wenn die Lampe in einem Studio in 4 m Höhe aufgehängt wird. Ein Beamer, der eine Wohnzimmerleinwand in 5 m Entfernung mit 150 lx ausleuchtet, reduziert die Beleuchtungsstärke der Leinwand auf nur noch gute 100 lx, wenn er zwei Meter weiter hinten im Raum aufgestellt wird.

Leuchtdichte

Im vorletzten Kapitel haben wir mit dem Begriff der Lichtstärke eine wichtige Größe zur Beurteilung einer Lichtquelle kennengelernt. Mit Hilfe der Lichtstärke können wir für eine Lichtquelle in der Maßeinheit Candela angeben, wie stark diese Lichtquelle leuchtet. Im vorigen Kapitel haben wir außerdem mit dem Begriff der Beleuchtungsstärke eine wichtige Größe zur Beurteilung der Lichtverhältnisse in einem Raum oder an einem bestimmten Fleck kennengelernt. Damit können wir in der Größe Lux angeben, wie hell es an einem bestimmten beleuchteten Ort ist.

Was uns jetzt noch fehlt ist ein Maß, wie wir die Helligkeit einer Lichtquelle angeben können. Die uns bereits bekannte Lichtstärke gibt zwar an, wie stark eine Leuchtquelle in den Raum ausstrahlt, allerdings können wir damit nicht deren Helligkeit bestimmen. Ein Beispiel soll dies klar machen: Eine Glühbirne, die die gleiche Lichtstärke hat wie eine 2 m lange Leuchtstoffröhre, erscheint uns viel greller im Vergleich zur Leuchtstoffröhre. Ich verwende bewusst den Begriff greller und nicht heller, denn daran wird klar, wie wir Menschen die Helligkeit einer Lichtquelle wahrnehmen: Je kleiner die Fläche einer Lichtquelle mit einer bestimmten Leuchtstärke ist desto stärker erscheint sie uns. Eine winzige Taschenlampe, die bei Dunkelheit ein harmloses Dämmerlicht im Raum erzeugt, erscheint uns beim Blick auf das Glühlämpchen heller als die großflächige Deckenlampe, die den ganzen Raum zum Tage macht.

Fassen wir diese praktische Veranschaulichung in einer Formel zusammen, dann bilden wir aus dem Quotienten aus der Leuchtstärke einer Lichtquelle I_v und der Fläche der Lichtquelle A einen neuen Begriff namens Leuchtdichte L .

$$L = \frac{I_v}{A}$$

Die Leuchtdichte gibt also an, welche Menge an sichtbarem Licht (das ist der Lichtstrom) von einer bestimmten Oberfläche aus (die Fläche der Lichtquelle) in einer bestimmten Richtung ausgestrahlt wird. Dabei kann es sich um eine echte oder eine scheinbare Oberfläche handeln. Blicken wir auf ein weißes Blatt Papier, dann haben wir es mit einer echten ebenen Fläche zu tun; blicken wir dagegen in die Sonne, haben wir es mit einer scheinbaren Kreisfläche zu tun, obwohl wir natürlich wissen, dass die Sonne die Form einer Kugel hat. Dieses sehr wichtige Ergebnis möchte ich festhalten:

Die Leuchtdichte (englisch luminance) L einer Lichtquelle gibt an, welche Lichtstärke I_v von einer bestimmten Fläche aus in den Raum abgestrahlt wird. Die Leuchtdichte wird in der Einheit cd/m^2 angegeben. Die Leuchtdichte gibt an, wie hell wir eine bestimmte Lichtquelle empfinden.

Die Leuchtdichte ist also ein ganz wichtiger Begriff in der Fotometrie. Denn damit haben wir eine Größe, mit der wir zahlenmäßig beschreiben können, wie hell wir eine Lichtquelle empfinden. Eine Lichtquelle empfinden wir als umso heller (greller), je höher der ausgestrahlte Lichtstrom oder je kleiner die strahlende Fläche ist.

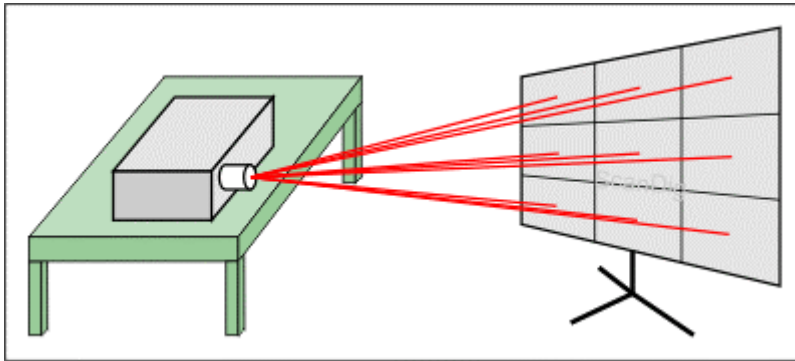
Lichtquelle	Leuchtdichte
Sonne am Mittag	1.600.000.000 cd/m^2
100 W Glühlampe klar	10.000.000 cd/m^2
Sonne am Horizont	5.000.000 cd/m^2
100 W Glühlampe matt	200.000 cd/m^2
Blauer Himmel	10.000 cd/m^2
Kerzenflamme	5.000 cd/m^2
Mond	2.500 cd/m^2
Nachthimmel	0,001 cd/m^2

Die nebenstehende Tabelle zeigt einige Werte für Leuchtdichten bestimmter Lichtquellen. Man liest zahlenmäßig ab, wie hell die Sonne am Nachmittag leuchtet; wie stark sie uns blenden kann, wenn man in die winzige Sonnenscheibe am Mittagshimmel direkt hinein blickt, ist jedermann bekannt. Auch wissen wir aus Erfahrung, dass wir am Abend leichter und länger in die Sonne blicken können als am Nachmittag; die deutlich niedrigere Leuchtdichte in der Tabelle macht uns das zahlenmäßig klar. Hingegen blendet uns eine 100 Watt Glühlampe viel stärker, wenn wir aus nächster Nähe frontal in sie hineinblicken. Und wir wissen auch aus Erfahrung, dass uns eine matte Glühbirne als dunkler vorkommt als eine klare, auch wenn sie beide 100 Watt elektrischer Leistung aufnehmen.

Auch die Helligkeit von TFT-Bildschirmen oder TFT-Fernsehapparaten wird in cd/m^2 angegeben. Die Angabe 1100 cd/m^2 bedeutet bei einem Flachbildfernseher also, dass 1 m^2 Schirmfläche mit 1100 Candela in den Raum strahlt.

ANSI-Lumen

In den vorigen Unterkapiteln haben wir eigentlich genügend fotometrische Größen kennengelernt, um eine Lichtquelle bzw. eine Belichtungssituation zahlenmäßig zu beschreiben. Und dennoch wäre es schwierig, damit die Eigenschaften eines Beamers oder Projektors zu beschreiben. Mit dem Lichtstrom könnten wir zwar klar festschreiben, welche Leistung von der Lampe des Beamers abgestrahlt wird, aber damit ist noch lange nicht gesagt, dass dieser Lichtstrom auch auf einer Leinwand ankommt und nicht als Streulicht im Gehäuseinnern oder außerhalb verloren geht. Mit der Lichtstärke könnten wir beschreiben, welcher Lichtstrom das Beamer-Objektiv innerhalb eines bestimmten Raumwinkels verlässt; aber wie soll man damit einen Beamer mit einstellbarem Zoom quantifizieren? Die Beleuchtungsstärke ist zwar das, was uns interessiert, nämlich wie viel Lichtstrom auf unserer Leinwand ankommt, aber damit müsste der Abstand der Leinwand fest vorgegeben werden.



Um dennoch die Qualität mehrerer Beamers miteinander vergleichen zu können, gibt es ein normiertes Messverfahren nach ANSI (American National Standard Institute), das genau vorschreibt, wie die Abbildungsleistung eines Beamers zu messen ist. Dazu wird das Bild eines Beamers auf eine 1 m² große Leinwand projiziert, die in 9 gleich große Felder aufgeteilt ist (siehe nebenstehendes Bild). In jeder Feldmitte wird mit Hilfe eines Luxmeters die Beleuchtungsstärke gemessen. Aus den 9 Messwerten wird ein Mittelwert gebildet und dieser Lux-Wert mit der Fläche von 1 m² multipliziert. Daraus erhält man den Lichtstrom Φ_v , der von dem Beamer auf die Leinwand ausgestrahlt wird.

Letztendlich geben wir also die Lichtqualität eines Beamers doch als Lichtstrom an, jedoch nicht als Lichtstrom, der als Ganzes von der Lampe ausgeht, sondern als ANSI-Lumen-Lichtstrom, der auf einer Leinwand gleichmäßig gemessen wird. Diese Vorgehensweise hat den Hauptvorteil, dass nur derjenige Lichtstrom in die Güteaussage einfließt, der tatsächlich auf einer Leinwand ankommt. Außerdem werden durch die verteilte Messung unterschiedliche Projektionsverfahren berücksichtigt: Ein schlechter Projektor, der in der Bildmitte einen großen hellen Fleck erzeugt und eine schwache Randausleuchtung hat, schneidet nicht besser ab als ein Beamer, der die gesamte Leinwand wie gewünscht gleichmäßig ausleuchtet. Halten wir also fest:

Bei modernen Beamern und Projektoren wird die Lichtstärke in ANSI-Lumen angegeben. Über ein genormtes Verfahren wird die Beleuchtungsstärke auf einer Leinwand mit 9 Feldern gemessen. Dadurch werden unterschiedliche Projektionsmethoden und Lampenarten miteinander vergleichbar.

Zusammenfassung

Abschließend fasse ich nochmals die wichtigsten Größen der Fotometrie mit den zugehörigen Einheiten in einer Tabelle zusammen. Wer nach ausführlicher Lektüre dieser Seite die Begriffe Lichtstrom, Lichtstärke und Beleuchtungsstärke erklären kann und Lux-Werte für einige Lichtsituationen beziffern kann, darf stolz von sich behaupten, über fotometrische Grundkenntnisse zu verfügen.

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
Lichtstrom	Lumen [lm]	Pro Sekunde abgestrahlte Leistung im Wellenbereich des sichtbaren Lichts
Lichtstärke	Candela [cd]	= Lichtstrom, der in einem bestimmten Raumwinkel ausgestrahlt wird
Beleuchtungsstärke	Lux [lx] = lm / m ²	/ Lichtstrom, der auf einer bestimmten Fläche auf einem Empfänger auftrifft
Leuchtdichte	cd/m ²	Lichtstrom, der von einer bestimmten Fläche ausgestrahlt wird
ANSI-Lumen	Lumen [lm]	Lichtgröße eines Beamers in Richtung Leinwand, der über ein genormtes Verfahren gemessen wird