

Allgemeine Lichttechnik – Grundlagen

Licht ist Leben – seine Energie macht unser Dasein auf dem Planeten Erde überhaupt erst möglich.

Licht ist aber auch Philosophie und Kunst, weckt Emotionen und erzeugt Stimmungen.

Wie können wir dieses Phänomen erfassen? Kann man es erklären, beschreiben, messen?

Licht ist mit den Mitteln der theoretischen Physik schon relativ schwierig zu erklären. Geht es in die Praxis des qualitativen und quantitativen Erfassens, wird die Sache noch schwieriger. Mit jedem Fortschritt der Technik sind diese Probleme aber immer besser lösbar.

Kommt der subjektive Eindruck des Betrachters ins Spiel, kann ein und die selbe Faktenlage bzw. Beleuchtungssituation völlig unterschiedlich bewertet werden. Das macht die Sache zwar kompliziert, aber auch sehr interessant.

Gutes Licht – eine gute Beleuchtung – fällt nicht auf, aber wenn gutes Licht fehlt, stimmt die Atmosphäre nicht, man fühlt sich nicht wohl. Dieses Wissen ist intuitiv.

Die Konzeption einer guten Beleuchtung dagegen erfordert fundierte Kenntnisse der Lichttechnik. Die Grundlagen dazu sind in diesem Radium-Lichtbrief beschrieben.

Was ist Licht?

Licht ist der Wellenlängen- oder Frequenzbereich der elektromagnetischen Strahlung, der mit dem Auge wahrgenommen – sprich gesehen – werden kann.

Beziehung zwischen Wellenlänge (λ) und Frequenz (f):

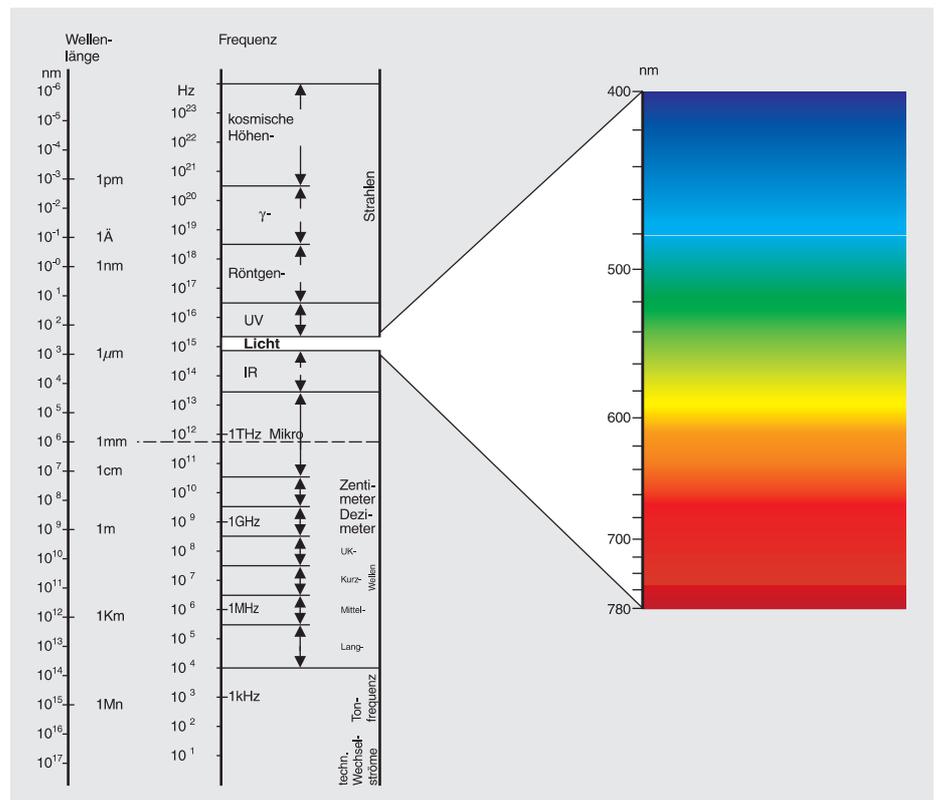
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c dieser Strahlung im Vakuum ist konstant und beträgt rund 300.000 km/s.

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:
 $c = 299\,792\,458$ m/s

Das Spektrum des sichtbaren, weißen Lichts wie z. B. Glühlampenlicht oder Tageslicht am Mittag eines sonnigen Tages setzt sich aus einzelnen farbigen (monochromatischen) Strahlungs-Anteilen zusammen. Diese sind bestimmten Wellenlängen zugeordnet, die von violett bei ca. 380 nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) bis dunkelrot bei 780 nm reichen.

Die im kurzwelligen Bereich anschließende Ultraviolett-Strahlung, sichtbares Licht und die langwellige Infrarot-Strahlung werden zusammenfassend als „optische Strahlung“ bezeichnet.



Elektromagnetische Strahlung

Licht ist nur ein Teil der in der Natur vorhandenen elektromagnetischen Strahlung

Wahrnehmung von Licht

Biologische Sensorik

Das Auge ist das Organ, mit dem höher entwickelte Lebewesen Licht wahrnehmen können. Dabei ist die Empfindlichkeit der Sensoren nicht gleichmäßig: Gleiche Strahlungsleistungen in unterschiedlichen Wellenlängen werden verschieden stark wahrgenommen.

So empfindet ein menschliches Auge grün-gelbes Licht als besonders hell, kurzwelliges blaues Licht mit gleicher Strahlungsleistung dagegen nur schwach.

Insekten dagegen sehen im langwelligeren UV- und dem daran anschließenden blauen Bereich besonders gut, gelb dagegen eher schlecht.

Des Weiteren unterscheidet sich die Augenempfindlichkeit individuell, es gibt jedoch Mittelwerte, an denen sich die Technik orientieren kann und muss.

Aufgrund dieser biologischen Komponente sind absolute Maßangaben im Bereich der Lichttechnik wesentlich schwieriger als das in der übrigen Physik der Fall ist.

Während man eine Länge in Metern oder Millimetern sehr genau angeben kann, also mit kleiner Toleranz, muss die Lichttechnik mit deutlich größeren Toleranzbereichen leben: Wie hell ist hell?

Auge und Sehprozess

Elektromagnetische Strahlung entsprechender Wellenlängen wird vom Menschen nur als Licht wahrgenommen, wenn eine ausreichende Strahlungsleistung auf der Netzhaut der Augen ankommt und dafür bereite Empfängerzellen (Rezeptoren) zur Verfügung stehen.

Da diese Augenempfindlichkeit für die verschiedenen Wellenlängenbereiche unterschiedlich ist, variiert der Helligkeitseindruck auch bei gleicher Strahlungsleistung.

Im Durchschnitt ist bei guter Beleuchtung (Tag) das Auge helladaptiert, d. h. auf hohe Beleuchtungsstärken eingestellt. Bei diesem photopischen Sehen sind vor allem die 3 Zapfenarten auf der Netzhaut aktiv – sie bewirken als Rezeptoren für rot, grün und blau das Farbsehen. Dann folgt die Kurve der Augenempfindlichkeit der sogenannten $V(\lambda)$ -Funktion und hat bei ca. 555 nm ihr Maximum.

Dabei hat eigentlich jede Zapfenart ihre eigene Empfindlichkeitskurve:

rot $x(\lambda)$, grün $y(\lambda)$, blau $z(\lambda)$.

Die Mittelwertkurve $V(\lambda)$ entspricht in der Praxis mit hinreichender Genauigkeit der Grün-Kurve $y(\lambda)$.

Bei schwächerer Beleuchtung (Nacht) ist das Auge dunkeladaptiert. Beim skotopischen Sehen dominiert die hell-dunkel Wahrnehmung, die von den Stäbchen auf der Netzhaut ausgeführt wird.

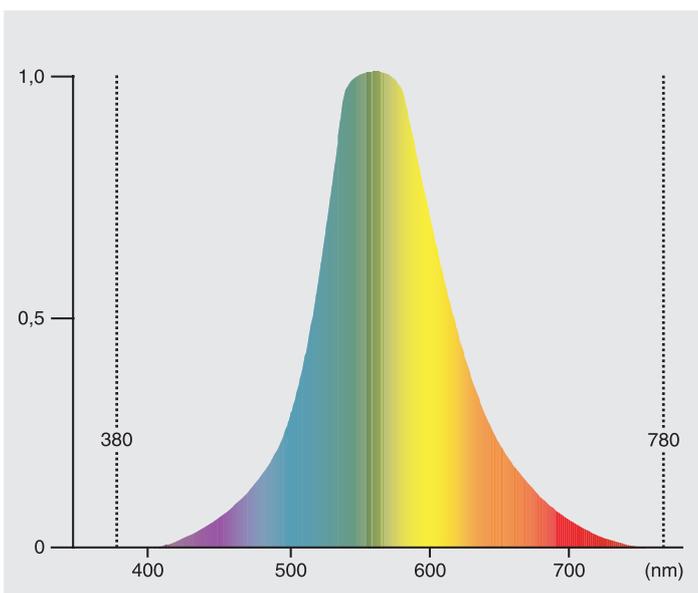
Die Augenempfindlichkeitskurve verschiebt sich als $V'(\lambda)$ in den kurzwelligeren Bereich und hat ihr Maximum dann bei ca. 507 nm. Im mesopischen Bereich (Dämmerung) zwischen Tages- und Nachtsehen orientiert sich das Auge nicht eindeutig, deshalb haben hier viele Menschen Seh-Schwierigkeiten.

Licht und Farbe

Das menschliche Auge bewertet einfallendes Licht nicht allein nach dem Helligkeitseindruck, sondern gleichzeitig immer auch nach Farben. Die Zapfen machen mit den Lichteindrücken eine Art additive Farbmischung, so dass feinste Abstufungen erkannt werden können.

Wenn man die Helligkeit nicht berücksichtigt, sind die x -, y - und z -Kurven die sogenannten Normspektralwertfunktionen einer Lichtquelle und ergeben immer den Summenwert 1. Deshalb reicht es dann aus, x - und y -Messwert einer Lichtquelle anzugeben, um ihre Farbe zu beschreiben. Diese Werte werden in der Normfarbtafel dargestellt.

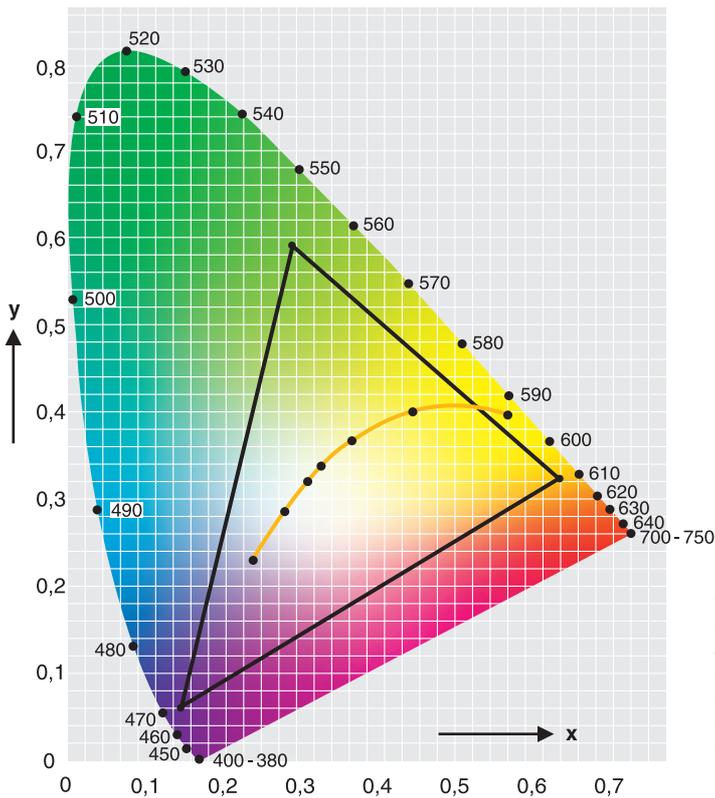
Nach den Gesetzen der additiven Farbmischung entsteht weißes Licht dann, wenn alle Farben zu gleichen Teilen enthalten sind. Deshalb ist der Weißpunkt in der Normfarbtafel bei $x = 0,333$ und $y = 0,333$.



Augenempfindlichkeitskurve

Das Auge nimmt gleiche Strahlungsstärken je nach Wellenlänge unterschiedlich stark wahr

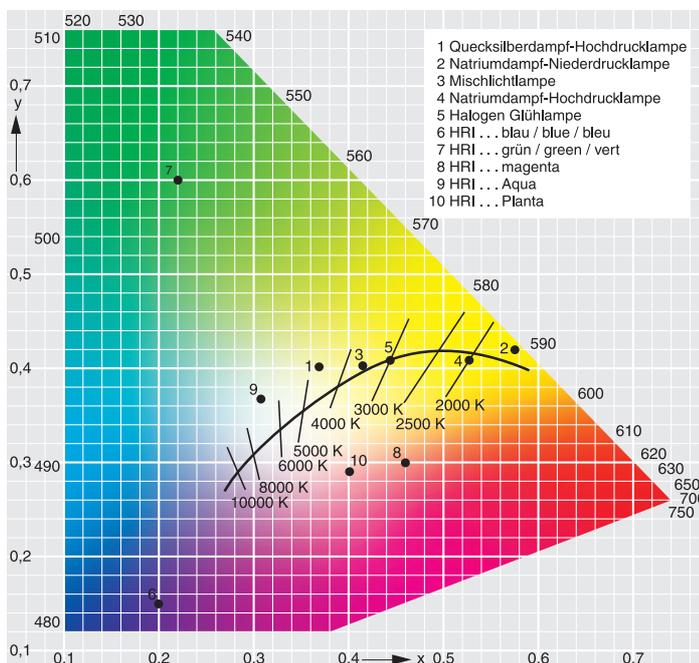
Lichtbrief



Die Farbtemperaturen – eine andere Art der Beschreibung von Lichtfarben – sind auf dem Planck'schen Kurvenzug und den Judd'schen Geraden zu finden. Auch für Lichtquellen, deren Farbort auf der Normfarbtafel zwar nicht auf,

aber relativ nahe an Planck liegt, kann eine sogenannte ähnlichste Farbtemperatur angegeben werden. Ihr Wert entspricht dem Punkt der Planck'schen Kurve, der den Farbkoordinaten der Lichtquelle am nächsten ist (minimaler Abstand).

Ausschnitt Farbdreieck
 Lage typischer Lampenlichtfarben auf der Normfarbtafel



Licht und Materie

Reflexion–Absorption–Transmission

Um einen Gegenstand zu sehen, muss Licht auf ihn fallen, dieses Licht von ihm reflektiert werden und dann ins Auge gelangen. Lässt ein Gegenstand das Licht ganz oder teilweise durch – im Fachbegriff Transmission – erscheint dieser Gegenstand durchscheinend oder durchsichtig.

Nimmt der Gegenstand dagegen das Licht ganz oder teilweise auf – Absorption – erscheint er hell oder dunkel, je nachdem, wie viel Licht er absorbiert.

Die Grundeigenschaften Reflexion, Absorption und Transmission können sich mit verschiedenen Parametern ändern:

Materialstruktur und Aufbau:

Je durchlässiger ein Material für Strahlen ist, desto wahrscheinlicher ist Transmission (z. B. klares Glas gegenüber mattem)

Oberfläche:

Je glatter, desto wahrscheinlicher Reflexion (z. B. Spiegel)

Strahlungswinkel:

z. B. Totalreflexion an der Wasseroberfläche bei flachem Blickwinkel

Lichtspektrum:

siehe Farbwiedergabe

In der Lichtbranche leben und arbeiten wir täglich damit, z. B. bei der Lichtmessung (in der Ulbricht-Kugel) oder Lichtleitung (durch Glasfaser) und natürlich auch bei der Lichtplanung (Oberflächen in Räumen).

Farbwiedergabe

Farben sehen wie sie sind

Nicht nur das Licht an sich hat eine Farbe, mit Hilfe des Lichts sollen die Farben betrachteter Gegenstände sichtbar werden.

Dies ist nur möglich, wenn im Spektrum der Lichtquelle die entsprechenden Wellenlängen vorhanden sind. Deshalb sind für perfekte Farbwiedergabe nur Lichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum geeignet (Temperaturstrahler wie z. B. Glühlampen). In allen anderen Fällen kann das Auge die Farben nur verändert wahrnehmen.

Beispiel: Textilienkauf

Ein Kaufhaus ist ausschließlich mit 3-Banden Leuchtstofflampen beleuchtet. Eine hellgraue Hose und ein hellgrau gemustertes Hemd passen bei der Anprobe perfekt zueinander. Zu Hause kommt jedoch die Überraschung: Beim Auspacken im Tageslicht hat die Hose einen Stich ins Grüne und das Hemd ist tatsächlich bräunlich mit einem Stich ins Rote.

Messung und Farbwiedergabe-Index

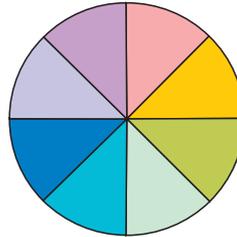
Die Farbwiedergabe einer Lichtquelle wird durch eine Vergleichsmessung bewertet. Dabei werden die zurückgestrahlten Spektren (= Remissionspektren) von 8 bestimmten Farben zweimal gemessen: einmal bei Beleuchtung durch eine Standardlichtquelle und einmal mit der zu prüfenden Lampe. Dabei sollen die Lichtfarben der beiden Lichtquellen möglichst ähnlich – am besten gleich – sein.

Diese Remissionsspektren werden dann in einem aufwändigen Rechenverfahren für jede einzelne Farbe verglichen. Sind sie identisch, ist der Farbwiedergabeindex Ra 100. Wird die Farbe sehr stark verändert, kann Ra sogar negativ werden.

Aus den Ra-Werten für die einzelnen Farben ergibt sich dann ein Gesamtwert für die zu prüfende Lampe. Die Farbwiedergabe von weiteren 6 Farben (manchmal auch 8) ist für einzelne Anwendungen zusätzlich von besonderem Interesse.

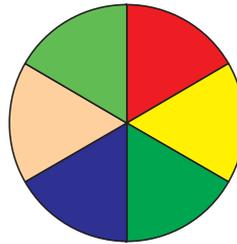
Farbwiedergabe R1-R8 Testfarben 1-8:

Altrosa
Senfgelb
Gelbgrün
Hellgrün
Türkisblau
Himmelblau
Asterviolett
Fliederviolett



Farbwiedergabe R9-R14 Testfarben 9-14:

Rot
Gelb
Grün
Blau
Hautfarbe
Blattgrün



Farbwiedergabe und Farbechtheit

Farbwiedergabe hat nichts mit Farbechtheit bzw. Vergilbung zu tun. Farbwiedergabe heißt ja, Farben so sehen zu können, wie sie wirklich sind. Farbechtheit dagegen heißt, die Farben bleiben trotz verschiedenster Umwelteinflüsse (Licht, Wärme, UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Chemikalien, etc.) so schön, wie sie immer waren und bleichen nicht aus.

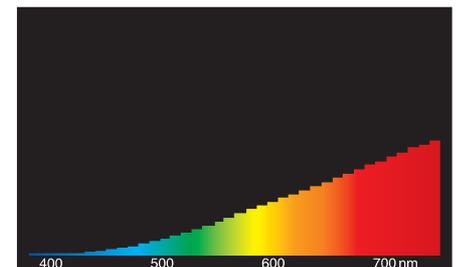
Lichterzeugung

Eigenschaften verschiedener Lichtquellen

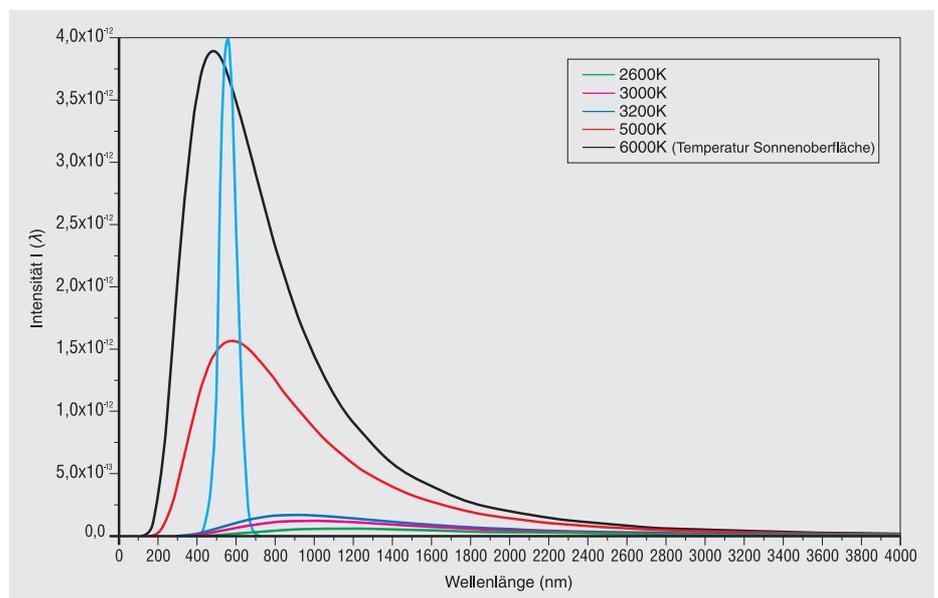
Temperaturstrahlung

Ein Temperaturstrahler wird so heiß, dass er Energie in Form von Licht abstrahlt, wie z. B. Feuer oder Glühlampen.

Temperaturstrahler haben ein kontinuierliches Spektrum, d. h. sie strahlen in allen Wellenlängen. Welche Wellenlängen stärker und welche weniger beteiligt sind, hängt nur von der Temperatur des Strahlers ab. Mit jeder Temperaturänderung des Körpers ändert sich also die Verteilung der Strahlungsanteile im Spektrum.



Spektrum Glühlampe
Spektrale Strahlungsverteilung von Glühlampen



Planck-Verteilungskurve
Planck-Verteilungskurve bei verschiedenen „Schwarzkörpertemperaturen“

Lichtbrief

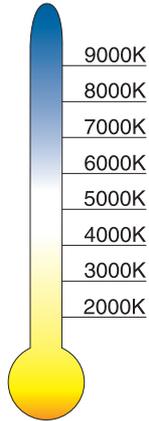
Planck formulierte aufgrund der Ergebnisse seiner Vorgänger (v. a. Wien'sches Verschiebungsgesetz) die physikalisch-theoretische Grundlage der Lichtfarben.

Und so kann die Farbtemperatur von Licht erklärt werden:

Man erhitzt einen schwarzen Körper, bis dieser sichtbare Strahlung – Licht – aussendet. Die jeweilige Temperatur dieses Körpers wird dann zur Beschreibung dieser Lichtfarbe verwendet.

Farbtemperaturen

Je heißer ein schwarzer Körper wird, umso weißer wird das von ihm abgestrahlte Licht.



Weil der Körper dafür heißer sein muss, haben die **kalten** (weißen) Lichtfarben höhere Farbtemperatur-Werte als die **warmen** (gelb-roten).

Also:

Je heißer ein Temperaturstrahler ist, desto weißer ist sein Licht.

Die Sonnenoberfläche z. B. ist im Durchschnitt ca. 6.000K heiß, bietet aber ein sehr angenehmes Licht für das menschliche Auge, weil ihr Strahlungsmaximum bei ca. 500 nm liegt. Da sich das Sonnenlicht aber ständig verändert (Aktivitäten auf der Sonnenoberfläche, Filter Erdatmosphäre), ist es für Mess- und Normungszwecke nicht nutzbar, die Sonne ist keine Standardlichtquelle.

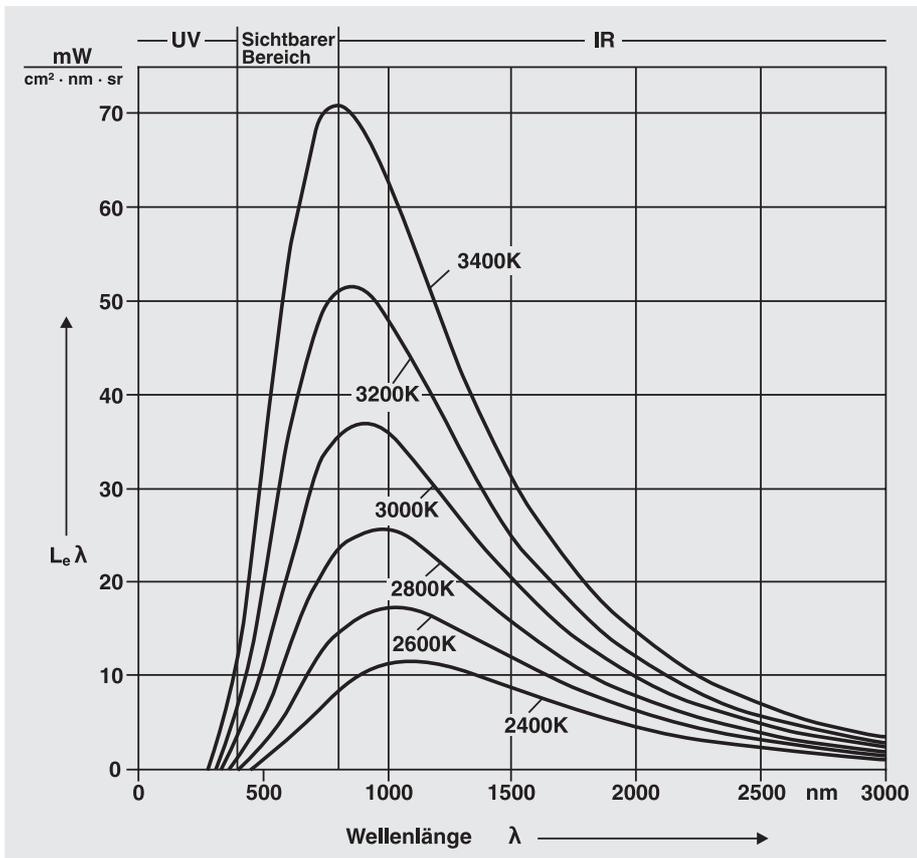
Leider ist eine der Sonne vergleichbare Standardlichtquelle nicht künstlich herstellbar, es gibt keine geeigneten Materialien bzw. stabilen chemischen Elemente dafür.

Zur Herstellung von Glühlampen-Wendel-Drähten wird bereits Wolfram genutzt, das Element mit dem höchsten Schmelzpunkt. Unter Ausschöpfung aller Möglichkeiten – auch z. B. mit Halogenprozessen – sind in der Praxis nur Glühlampen mit Farbtemperaturen bis ca. 3.400 K machbar.

Gasentladung

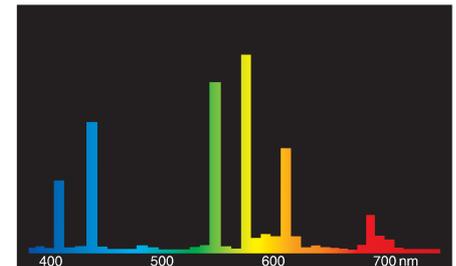
Alle chemischen Elemente können durch Energiezufuhr angeregt werden und geben beim Zurückfallen in den Ausgangszustand diese Energie in Form von Strahlung wieder ab. Die Zusammensetzung dieser Strahlung ist spezifisch für das jeweilige Element, z. B. strahlt Quecksilber (Hg) vor allem im UV-Bereich, andere Stoffe wie z. B. Natrium vor allem gelb.

Deshalb gilt, auch wenn es auf den ersten Blick unlogisch erscheint:



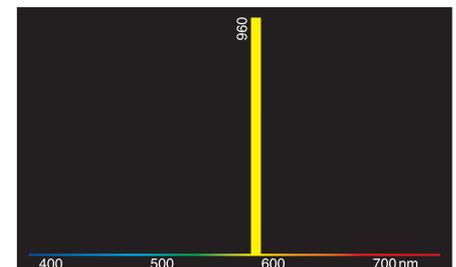
Isothermen der spektralen Strahldichtevertelung für Wolfram als Strahler

Darstellung der Strahlungsstärke von Wolframmaterial einer jeweils bestimmten Temperatur (Isotherme) bei den verschiedenen Wellenlängen



Spektrum Quecksilberdampf Lampe

Spektrale Strahlungsverteilung von Quecksilberdampflampen

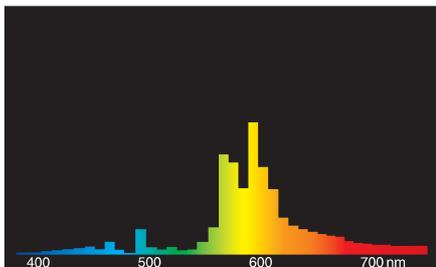


Spektrum Natriumdampf-Niederdrucklampe

Spektrale Strahlungsverteilung von Natriumdampf-Niederdrucklampen

Die Spektren dieser Lichtquellen sind diskontinuierlich, können wie z. B. bei Natriumdampf-Niederdrucklampen sogar monochromatisch vor allem in einer Wellenlänge sein.

Durch äußere Umstände kann das Spektrum weiter beeinflusst werden: z. B. bei Natrium-Hochdrucklampen wird durch den Druck im Brenner die Natrium-Linie verbreitert. Die Zugabe von Quecksilber sorgt für den nötigen Blau-Anteil.



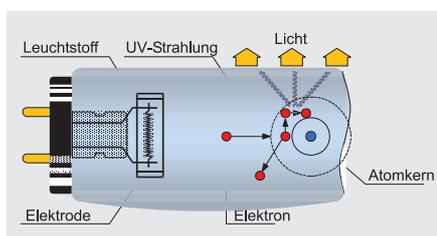
Spektrum Natriumdampf-Hochdrucklampe
Spektrale Strahlungsverteilung von Natriumdampf-Hochdrucklampen

Lumineszenzprozesse

Lumineszenz ist eine Beschreibung für alle Vorgänge, bei denen ein nicht leuchtender Stoff oder ein Körper aufgrund chemischer Reaktionen oder einer Aktivierung durch Licht selbst Strahlung abgibt. Am bekanntesten ist die Fluoreszenz:

Bestimmte Stoffe können leuchten, auch wenn sie selbst kein Licht erzeugen. Sie absorbieren kurzwellige Strahlung (meist UV) und wandeln diese in langwelligere Strahlung (sichtbares Licht) um.

Diese Art der Lumineszenz wird zur Lichterzeugung vor allem in Leuchtstofflampen genutzt. Eine unbeschichtete Leuchtstofflampe wäre (aufgrund des enthaltenen Quecksilbers) ein violett-bläulicher UV-Strahler, die innen auf dem Glaskolben aufgebraachte Leuchtstoffschicht wandelt diese Strahlung in sichtbares Licht um.



Funktionsprinzip Leuchtstofflampe

Die Art und Qualität des Leuchtstoffs entscheidet, welche Lichtfarbe und welche Anzahl Linien in der spektralen Verteilung das Licht der Lampe am Ende hat.

LASER

= Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Während eine Gasentladung – für jedes Gasatom einzeln – eine spontane Emission von Licht ist, wird beim Laser der lichterzeugende Stoff durch einen „optischen Pumpprozess“ so angeregt, dass ein sehr energiereicher Strahlungsfluss entsteht. Die Wellenlänge dieser Strahlung ist von der verwendeten Stoffkombination abhängig. Heute sind alle Farben möglich, selbst blau.

Die entstehende Strahlung hat extrem enge Strahlungswinkel und ist sehr gut fokussierbar. Dies führt zu sehr hohen Leistungsdichten, was wiederum Chance und Gefahr gleichzeitig ist: Man kann z. B. mit Laserstrahlen operieren, aber natürlich auch große Schäden verursachen.

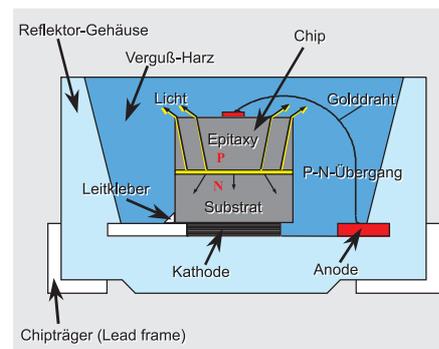
LED / OLED

Light Emitting Diode

Das Licht von LEDs wird in einem Halbleiter-Chip erzeugt: Ein pn-Übergang wird angeregt und sendet dadurch Licht mit großer Intensität aus, ähnlich der Laser-Strahlung.

Deshalb waren LEDs zunächst in der Strahlenschutz-Norm EN 60 825–1 wie Laser eingestuft. Aufgrund geringer Leistung bzw. Strahlungsstärke und genügend Material um den lichterzeugenden Chip sind LEDs jedoch immer innerhalb der von der Norm beschriebenen Grenzen und müssen daher nicht in die selbe Gefahren-Klassifizierung aufgenommen werden.

Da außerdem im Normalfall noch zusätzlich streuende Optiken im Einsatz sind, besteht keine Gefahr für das Auge. Jedenfalls nicht mehr, als bei anderen Lampen auch.



Aufbau einer LED

LEDs erzeugen – wie Laser – je nach der im pn-Übergang eingesetzten Stoffkombination monochromatisches Licht, also eine bestimmte Wellenlänge. Dabei wird eben das farbige Licht direkt erzeugt und muss nicht erst aufwändig herausgefiltert werden. Weißes Licht kann mit LEDs auf verschiedene Weise erzeugt werden: durch RGB-Farbmischung in einer sogenannten Multi-LED mit 3 farbigen Chips in einer LED oder durch Einsatz von Leuchtstoffen in der Vergussmasse um einen blauen Chip.

Um einigermaßen brauchbare Farbwiedergabewerte ($R_a > 70$) bei weißen LEDs mit Leuchtstoffen zu bekommen, werden meist gelboranger und gelb-grüner Leuchtstoff zusammen eingesetzt.

Die Vorteile von LEDs liegen auf der Hand: kleinste Bauformen mit sehr geringen elektrischen Anschlussleistungen bei langer Lebensdauer machen den Einsatz auch an schwieriger Stelle attraktiv. Keine Betriebsgeräusche, kein Flackern, keine UV- oder IR-Strahlung stören. Lediglich ungeeignete Umgebungsbedingungen wie Feuchtigkeit oder hohe Temperaturen führen zum Ausfall.

LEDs / OLEDs werden z. T. euphorisch als „Lichtquelle der Zukunft“ gefeiert, Fachleute bleiben skeptisch. Denn Aufwand und Kosten für eine Allgemeinbeleuchtung mit LEDs sind zurzeit noch unverhältnismäßig hoch.

Organic LED

Die Forschung arbeitet sehr intensiv daran, LEDs auch aus organischem Material herzustellen: Riesenmoleküle und Polymere können ähnliche Eigenschaften erreichen wie die komplexen Metallverbindungen in traditionellen LEDs.

Die Vorteile sind klar: Alles bleibt umweltfreundlich und bestimmte Anwendungen werden überhaupt erst möglich (z. B. leuchtende Folien durch mehrschichtige Dünnschichtgebilde).

Kleine Displays – in einfarbig oder multi-color – sind kein Problem mehr, bei größeren Flächen gibt es u.U. Schwierigkeiten mit der Wärmeabfuhr und dadurch Leistungseinbußen.

Halogenprozesse

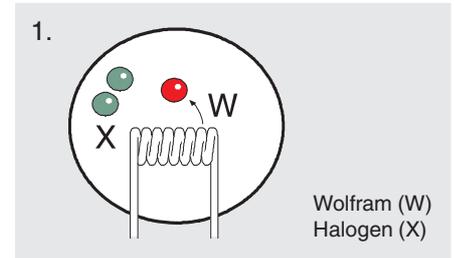
Auch wenn die weite Verbreitung von Halogenlampen die Vermutung nahe legt, Halogene könnten direkt etwas mit der Lichterzeugung zu tun haben, ist dem nicht so.

Halogene (Gruppe VII im Periodensystem der chemischen Elemente – Fluor, Chlor, Brom, Jod) sind unterstützende Stoffe, die die Lichterzeugung beeinflussen. Sie ermöglichen Stofftransporte, z.B. Wolframatomme bei Glühlampen und den Wendelektroden von Entladungslampen im sogenannten Halogen-Kreisprozess. Dadurch wird bei ausreichender Temperatur (Wendel $\geq 2700^\circ\text{C}$, Lampenkolben $\geq 200^\circ\text{C}$) Schwärzung verhindert und die Lichtausbeute erhöht.

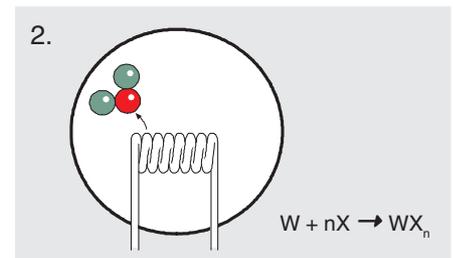
Im Detail bedeutet dies: Die von der Wolfram-Wendel abgedampften Atome werden in der Nähe der „kalten“ Kolbenwand bei ca. 300°C von den Halogenmolekülen „eingefangen“.

Der Komplex wandert durch das Lampenvolumen, bis er zufällig in die Nähe einer „kühleren“ Stelle der Wendel mit ca. 2000°C kommt. Die Verbindung löst sich und das Atom lagert sich wieder an die Wendel an. Da diese „kühleren“ Stellen meist im Enden-Bereich der Wendel zu finden sind, findet also doch ein gewisser Materialtransport statt. Deshalb führen Fehlerstellen im Wolframdraht schnell zu „hot spots“, heißen Punkten, von denen nur noch Material abtransportiert wird, und der Lampenausfall ist vorprogrammiert.

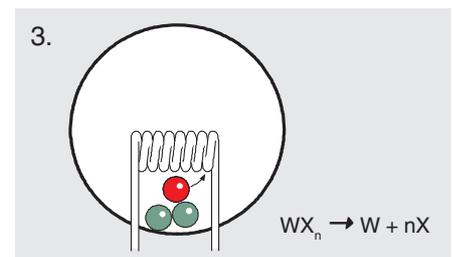
Halogen-Kreisprozess



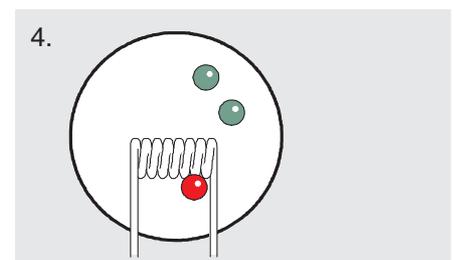
Ein Wolframatom löst sich von der Wendel



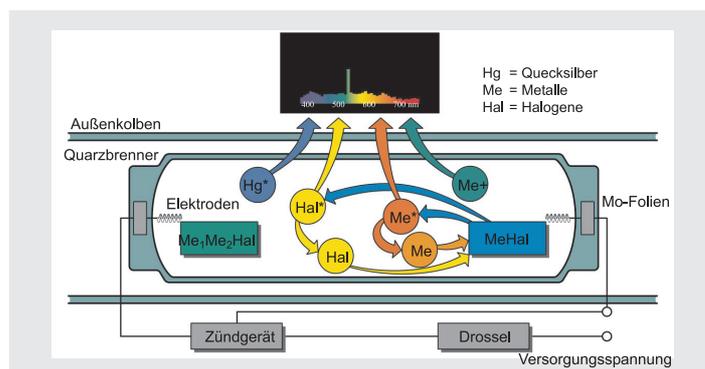
Das Wolframatom wird vom Halogengas eingefangen und komplex gebunden



Das Wolframatom wird vom Halogengas an der Wendel wieder abgegeben



Wolfram ist wieder auf der Wendel und Halogengas frei im Lampenvolumen



Funktion von Halogenmetall-dampflampen

Normlichtarten

Farbtemperaturen der Normlichtarten

Da die Farbtemperatur des Tageslichts sowohl bezüglich des Aufenthaltsorts auf der Erde als auch im Tagesverlauf (3.000 – 9.000 K/ blau) schwankt, erschien es sinnvoll, bestimmte Eckwerte für Normung und Messungen in DIN 5031 bzw. 5033 festzulegen.

Als mittleres Tageslicht wurde D_{65} bestimmt, für reproduktive Zwecke (z. B. Farbdias) wird D_{55} benutzt, es gibt noch D_{75} und gelegentlich sieht man auch noch C (veraltet). Für Glühlampenlicht ist die Normlichtart A, die sich vom Planck'schen Strahler ableitet.

Die Farbtemperatur-Werte lauten:

$$D_{65} = 6.504 \text{ K}$$

$$D_{55} = 5.500 \text{ K}$$

$$D_{75} = 7.500 \text{ K}$$

$$C = 6.774 \text{ K}$$

$$A = 2.855,6 \text{ K}$$

Des weiteren sind bekannt Normlichtart **B** (Sonnenlicht), **G** (Vakuum-Glühlampen), **P** (Petroleum- und Kerzenlicht) und **XE** (Xenonlampen).

Größen und Einheiten in der Lichttechnik

Beschreibung und Messung von Licht

Lichtstrom Φ

Die bewertete Strahlungsleistung (Helligkeitseindruck) einer Lichtquelle insgesamt, d.h. in alle Richtungen, wird als Lichtstrom bezeichnet. Seine Einheit ist das Lumen, lm.

Um den Helligkeitseindruck im menschlichen Auge wahrheitsgetreu nachzubilden, muss die reine spektrale Strahlungsleistung einer Lichtquelle mit den Faktoren der Augempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ bewertet, d. h. multipliziert werden. Dafür wird außerdem das photometrische Strahlungsäquivalent K_m benötigt, das für das Maximum der $V(\lambda)$ -Kurve definiert ist. Ein monochromatischer Strahler mit der Wellenlänge 555 nm mit 1 W Strahlungsleistung hat also per Definition 683 lm.

$$\text{Oder anders:} \\ K_m = 683 \text{ lm/W}$$

Wird diese Rechengröße für das Nachtsehen durch $V'(\lambda)$ bewertet angegeben, beträgt sie 1699 lm/W.

Für alle Lichtquellen, die nicht vorwiegend in eine Richtung strahlen, wird die Strahlungsleistung in lm angegeben (vgl. Lichtstärke).

Lichtausbeute

Die Lichtausbeute ist ein Maß für die Effizienz von Lichtquellen. Sie gibt an, wie viel Licht aus der aufgewandten Energie erzeugt wird. Ihre Einheit ist Lumen pro Watt lm/W.

Lichtmenge Q

Lichtmenge ist die Bezeichnung für die bewertete Strahlungsenergie in lmh oder lms, also die Strahlungsleistung im Laufe der Zeit.

$$Q = \Phi \cdot t$$

Diese Größe ist für Blitzlampen wichtig, außerdem hilft sie bei der Energiebewertung von geplanten Lichanlagen.

Lichtstärke I

Die Strahlungsleistung einer Lichtquelle in eine bestimmte Richtung unter einem Raumwinkel Ω wird als Lichtstärke bezeichnet. Ihre Einheit ist Candela, cd.

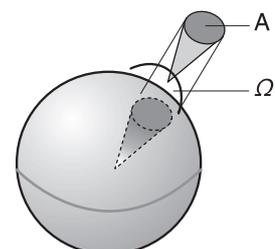
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

oder näherungsweise:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Dabei ist der Raumwinkel so vorstellbar: Ein kreisförmiges Stück wird aus der gebogenen Oberfläche einer Kugel ausgeschnitten. Der Ausschnittkegel bis zum Mittelpunkt der Kugel ist als „Eistüte“ vorstellbar. Die Seitenflächen dieses Kegels umschließen den Raumwinkel, er ist also die „Spitze der Eistüte“. Sein Wert in Steradian (sr) ergibt sich aus dem Quotienten des ausgeschnittenen Oberflächenstücks und dem Quadrat des Kugelradius:

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

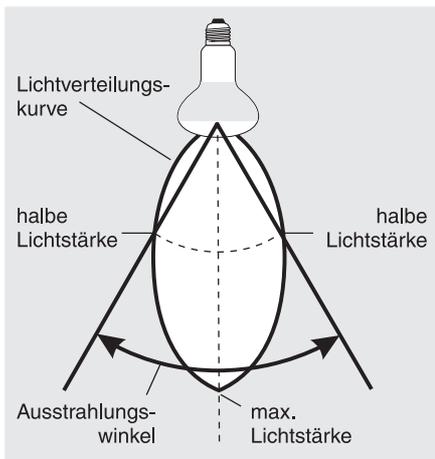


Definition Raumwinkel

Lichtbrief

Für alle Lichtquellen, die bevorzugt in eine Richtung strahlen (z. B. Reflektorlampen) wird die Strahlungsleistung in cd angegeben.

Die gemessenen Strahlungsverteilungen von Lichtquellen – besonders für Lampe in der Leuchte – werden in Polardiagrammen dargestellt, den sogenannten Lichtverteilungskurven.



Lichtverteilungskurve
Darstellung der LVK einer Reflektorlampe

Beleuchtungsstärke E

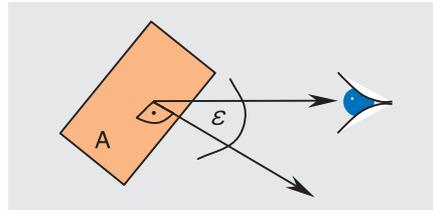
Während Lichtstrom und Lichtstärke die Strahlungsleistung angeben, die von einer Lichtquelle ausgeht, sagt die Beleuchtungsstärke aus, welche Strahlungsleistung bei einem bestimmten Empfänger ankommt. Ihre Einheit ist das Lux, lx.

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

Das gilt im Normalfall, da meist von einer ausreichend gleichmäßigen Lichtstromverteilung ausgegangen werden kann.

Ist die betrachtete Fläche zur Blickrichtung geneigt, muss der Neigungswinkel ε berücksichtigt werden:

$$E = \frac{\Phi}{A} \cdot \cos \varepsilon$$



Erklärung Beleuchtungsstärke

Deshalb ist bei der Beleuchtungsstärke entscheidend, welche Fläche in welcher Ebene betrachtet wird. Vor allem bei Lichtplanungen muss sehr genau berücksichtigt werden, ob die horizontale Beleuchtungsstärke E_h (auf Tischen z. B. im Büro) besonders wichtig ist, die vertikale E_v (z. B. an den Wänden einer Galerie) oder die zylindrische E_z (für gutes, vertikales Sichtfeld rundum). In den entsprechenden Planungs-Programmen wird dann jeweils auch eine mittlere, eine minimale und eine maximale Beleuchtungsstärke ermittelt, um eine Vorstellung von der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung zu bekommen.

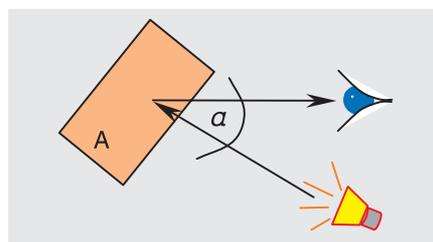
Beispiele für Werte von Beleuchtungsstärken:

Sommertag	60.000-100.000 lx
Trüber Wintertag	3.000 lx
Arbeitsplatz	500 lx
Vollmondnacht	0,25 lx
Neumondnacht	0,01 lx

Leuchtdichte L

Der Helligkeitseindruck, den eine bestimmte Fläche macht, wird als Leuchtdichte bezeichnet. Ihre Einheit ist cd/m^2 oder cd/cm^2 .

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



Erklärung Leuchtdichte

Wird die Fläche nicht senkrecht gesehen, muss der Abweichungswinkel α berücksichtigt werden:

$$L = \frac{I}{A} \cdot \cos \alpha$$

Je höher die Leuchtdichte eines Gegenstandes ist, z. B. einer Lampe, umso heller erscheint er und desto eher kann er blenden.

Photometrisches Entfernungsgesetz

Je weiter ein Gegenstand von einer Lichtquelle entfernt ist, desto schwächer wird seine Beleuchtungsstärke. Genauer: Seine Beleuchtungsstärke nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab.

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha$$

Belichtung H

In der Fotografie kommt es auf die Gesamtlichtmenge an, die in einer bestimmten Zeit auf die lichtempfindliche Fläche – den Film – fällt.

$$H = E \cdot t = \frac{Q}{A}$$

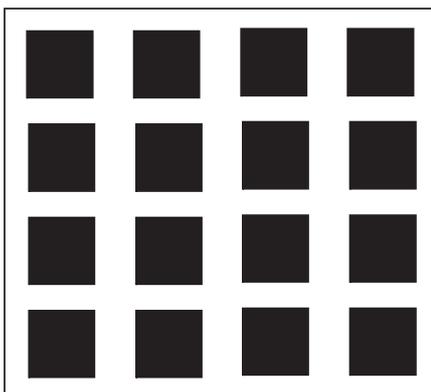
Licht und Gefühl

Licht brauchen wir zum Sehen. Aber es hat auch sehr viel mit Gefühl und Wohlfühlen zu tun: Lichtfarben und Beleuchtungssituationen beeinflussen das Befinden, meist eher subjektiv-individuell als tatsächlich direkt mess- und nachweisbar. Anerkannte Erkenntnisse stammen daher meist aus sehr aufwändigen statistischen Untersuchungen.

Warme Farben (warmweiß, Glühlampenlicht) werden von den meisten Menschen bei Beleuchtungsstärken über 2.000 lx nicht nur aufgrund der dann sehr hohen Wärmebelastung als nicht mehr angenehm empfunden.

Kalte Farben (Tageslicht, Hellweiß) werden bei Beleuchtungsstärken unter 1.000 lx als eher ungenießbar empfunden. Deshalb sollte in Innenräumen die Farbtemperatur des Lichts unter 5.500 K gewählt oder von vornherein Beleuchtungsstärken größer 1.000 lx geplant werden.

Helligkeitsempfinden hängt zwar immer mit der Leuchtdichte zusammen, kann aber vom Auge nicht absolut gemessen werden. D. h. das Auge vergleicht immer zwischen vorhandenen Punkten und Flächen und versucht dabei auch bei harten Kontrasten einen gewissen Ausgleich zu schaffen.



Optische Täuschung

Optische Täuschung: An den weißen Kreuzungsstellen „sieht“ das Auge dunkle Flecken

Lichtwirkung auf den Menschen

Biologische Wirkungen

Licht steuert die Aktivität und nimmt Einfluss auf unser ganzes Leben.

Vor allem die Haut als Flächenorgan ist der gesamten Strahlung mit UV und IR ausgesetzt. UV-Strahlung ist auch nötig, um bestimmte Prozesse wie die Vitamin D₃-Bildung im Körper auszulösen. Zu hohe Dosen jedoch können erhebliche Schäden hervorrufen. Sonnenbrand oder Hornhautentzündung sind da nur wenige Beispiele.

Der Mensch als tagaktives Wesen ist bei höheren Beleuchtungsstärken aktiver und macht weniger Fehler, auch wenn die Aufgabe an sich nicht von der Sehleistung abhängig ist. Diese erhöhte Aktivität ist sogar z. B. an der Blutzusammensetzung messbar, es sind mehr weiße Blutkörperchen vorhanden.

Insgesamt ist die Konzentration einfach besser, daher sind dann auch weniger Unfälle zu erwarten. Deshalb ist besonders in Bezug auf Arbeitssicherheit und im Straßenverkehr auf gute Beleuchtung zu achten.

Lichtbedarf

Jeder Mensch hat individuelle Ansprüche an die Beleuchtung.

So ist es statistisch erwiesen, dass ältere Menschen bei guter Beleuchtung (ca. 1.000 lx) in etwa gleich gut arbeiten wie junge. Ist die Beleuchtung dagegen schwach, machen die älteren deutlich mehr Fehler.

Außerdem ist es sinnvoll, Lichtregel- und Steueranlagen so zu planen, dass dem Anwender eine manuelle Einflussmöglichkeit bleibt.

Störungen durch Licht

Licht und Lichtquellen können nicht nur wichtige Hilfsmittel zum Sehen sein, sondern auch erheblich stören, z. B. als Lichtimmissionen oder durch Blendung.

Außerdem kann erhöhte Wärmebelastung – vor allem bei Glühlampen – auftreten, die dann durch aufwändige Klimatechnik wieder weggeschafft werden muss.

Lichtimmissionen – also unerwünschte Helligkeit in den Dunkelstunden z. B. durch Straßenbeleuchtung in Innenräumen – sind meist lediglich lästig, empfindliche Personen können sich dadurch aber erheblich gestört fühlen.

Abhilfe kann jedoch mit geeigneten Maßnahmen relativ einfach geschaffen werden:

- stark beleuchtete Gebäude nachts abdunkeln
- Beleuchtung konstant und gleichmäßig lassen, ohne dynamisches Licht wie Spruchbänder oder animierte bunte Bilder
- Leuchtenstandorte verändern
- Leuchtenart anpassen: Höhe, Neigung, Lichtverteilung

Blendung ist dagegen ein großes Problem, nicht nur sehr unangenehm sondern auch leistungshemmend.

Streulicht, Glanz, Spiegeleffekte – also gerichtete Reflexion – können zu einem lokal sehr starken Lichteinfall ins Auge führen, so dass es quasi gegen das Licht sehen muss. Im Straßenverkehr oder bei gefährlichen Tätigkeiten in der Arbeitswelt kann Blendung daher ein erhebliches Sicherheitsrisiko sein. Im Normalfall ist es „nur“ sehr anstrengend. Schnelle Ermüdung und Augenprobleme sind dann die Folge.

Je diffuser Licht reflektiert wird (z. B. von einer weißen Wand), desto weniger wird es als Blendung wahrgenommen.

Weitere Störungen können auftreten z. B. durch zu harte Schatten bei großen Beleuchtungsstärken oder Frequenzprobleme bei Entladungslampen, die dann stroboskopische Effekte zur Folge haben.

Kein Mensch muss schlechte Beleuchtung und schlechtes Licht akzeptieren, es gibt immer eine Möglichkeit etwas zu ändern. Professionelle und unabhängige Lichtplanung, gute Lampen und Leuchten sind Gewähr für eine angenehme Atmosphäre.