

Licht? ... Licht!

Kurzer Überblick zur Geschichte der Lichttheorie

Licht ist mit Sicherheit das bestimmende Medium der menschlichen Wahrnehmung. Unsere Umgebung wird von uns vornehmlich optisch bewertet und eingeordnet; ein Großteil der Informationen, die wir aufnehmen, erreichen uns mit Hilfe des Lichts. Im gesamten Medienbereich wird Licht in vielfacher Weise eingesetzt, beurteilt oder moduliert. Die Erklärungen des Naturphänomens „Licht“ reichen weit zurück in die Vergangenheit. Erste Erklärungsversuche sind meist religiöser Art und finden sich in fast allen Religionen. Der Beginn einer naturwissenschaftlichen Betrachtung ist eng verknüpft mit dem Aufkommen einer mathematischen Naturbeobachtung.

So ist es auch nicht verwunderlich, dass sich erste naturwissenschaftliche Ansätze bereits 300 v. Chr. in den Schriften Euklids finden. Dieser griechische Mathematiker beschreibt Licht als Medium, „das vom Auge ausgeht“ und den Gesetzmäßigkeiten der Geometrie gehorcht. Dieser Ansatz mag uns heute zum einen falsch und zum anderen auch nicht weiter aufregend erscheinen, doch zeigt sich hier bereits eine Naturauffassung, die heute schon fast selbstverständlich erscheint. Die rein subjektive Wahrnehmung des einzelnen Individuums wird in ein „objektives“, quantifiziertes Beurteilungssystem eingeordnet. Diese Beurteilungssysteme sind weitgehend von der zur Verfügung stehenden mathematischen Ausdrucksformen bestimmt und unterliegen als solche einem starken historischen Wandel. Dieses Prinzip liegt praktisch allen naturwissenschaftlichen Beschreibungen zugrunde. Doch weiter in der Geschichte...

Mit dem Niedergang der antiken Hochkulturen kommt auch der Fortschritt in den Naturwissenschaften, zumindest in Europa, zum Erliegen. Dies ändert sich erst mit der Aufklärung, welche sehr viele bedeutende Naturforscher hervorbringt. 1675 veröffentlicht Isaak Newton (...ja das ist der, dem angeblich ein Apfel auf den Kopf gefallen ist!) seine Korpuskulartheorie des Lichts. Demnach besteht Licht aus einer Vielzahl „unwägbarer“ Teilchen, d.h. nach dieser Theorie hat Licht einen eindeutigen Teilchencharakter, der später dann auch durch den sog. Photoeffekt bestätigt wurde (nachzulesen in jedem besseren Physikbuch!).

Fast zur gleichen Zeit (1690) wurde vom Niederländer Christian Huygens postuliert, dass Licht eine reine Wellenerscheinung sei. Auch diese Theorie lässt sich merkwürdigerweise durch die hinter einem Gitter auftretenden Interferenzerscheinungen belegen. Dies ist natürlich, zumindest nach damaliger Auffassung, ein Widerspruch zu der Theorie Newtons. Trotzdem dominiert im 18. Jahrhundert die Theorie Newtons, während im 19. Jh. durch die Auswertung der Interferenz-, Polarisations- und Beugungserscheinungen die Wellentheorie an Boden gewinnt.

Diese beiden Vorstellungen, basieren beide doch auf Modellen der klassischen Mechanik, geraten 1900 durch die Entdeckungen Max Plancks in den Strudel der allgemeinen Grundlagendiskussion. Max Planck entdeckte, dass alle Energiezustände „gequantelt“ sind, d.h. es gibt eine kleinste Energieeinheit und alle anderen Energien sind ganzzahlige Vielfache dieser kleinsten Energiemenge (Plancksches Wirkungsquantum); die Quantenphysik war geboren und die Verwirrung darüber komplett, war man bis dato doch von einem linearen Verhalten ausgegangen.

Im makroskopischen Bereich ist diese „Quantelung“ nicht weiter beunruhigend; betrachtet man jedoch den molekularen Bereich, so wird der klassischen Mechanik und damit der traditionellen Naturbeschreibung die Grundlage entzogen.

Neue Aspekte in der Lichttheorie zeigen sich in den Schriften Albert Einsteins; aufbauend auf der Quantenphysik erklärt er im Rahmen seiner Relativitätstheorie, dass Licht sowohl Teilchen- als auch Wellencharakter annehmen kann; jedoch nie beides gleichzeitig (Dualismus des Lichts).

1927 erklärt der Chemiker Niels Bohr, die quantenphysikalische Entstehung des Lichts durch Elektronenübergänge in der äußeren Atomhülle. Im Gegensatz zu Einstein („Gott würfeln nicht!“) besitzt Licht in Bohrs Erklärungen gleichzeitig sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften (Komplementaritätsprinzip). Dieses Modell ist heute allgemein akzeptiert.

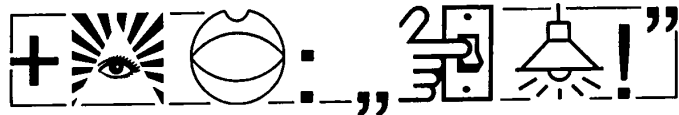
Vielen wird es seltsam erscheinen, dass ein solch unkonkretes Bild die moderne Physik bestimmen soll; sind wir es doch gewohnt, dass Naturwissenschaft eindeutig und beweisbar sein muss oder soll. Ist Licht nun Welle oder Teilchen?

Um diese auf der Quantenphysik beruhenden Theorien zu verstehen, muss man sich von vielem, was wir immer noch als „gesunden Menschenverstand“ bezeichnen, verabschieden.

Mit dieser Problematik konfrontiert antwortete Albert Einstein:

„Das, was wir als „gesunden Menschenverstand“ bezeichnen, ist nichts anderes als die Summe der in unserem bisherigen Leben gesammelten Vorurteile.“

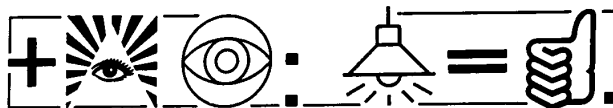
Und Gott sprach: Es werde Licht!



Und es ward Licht.



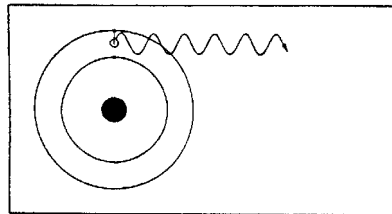
Und Gott sah, daß das Licht gut war.



Zur Physik des Lichts

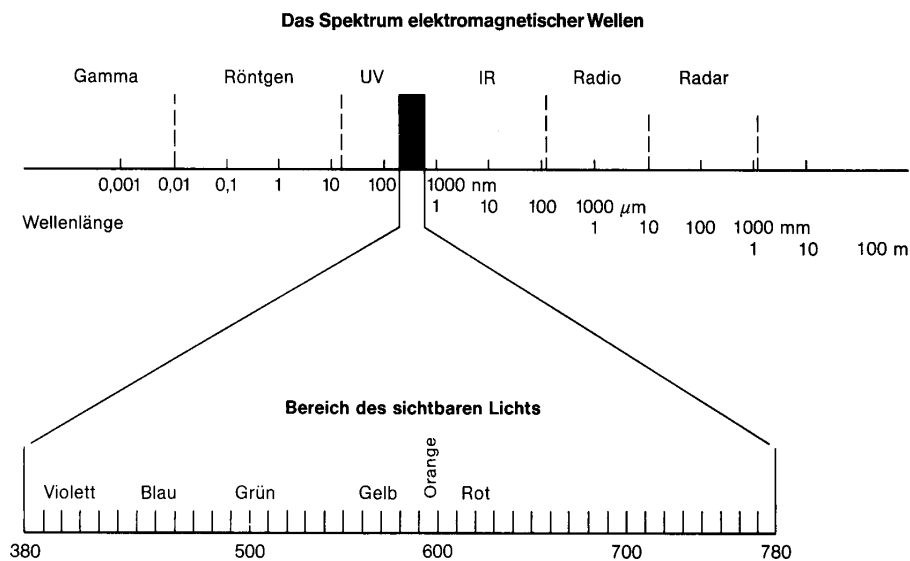
Wie schon beschrieben, basiert die heutige Interpretation der Naturerscheinung Licht zum einen auf der Quantenphysik und zum anderen auf den Interpretationen des Chemikers Niels Bohr. Demnach entsteht Licht durch Elektronenübergänge in den äußeren Atom- bzw. Molekülschichten. Durch Energieaufnahme (auch Lichteinstrahlung) kann ein Elektron auf ein höheres Energieniveau angehoben werden.

Elektronenübergang in der Schale:



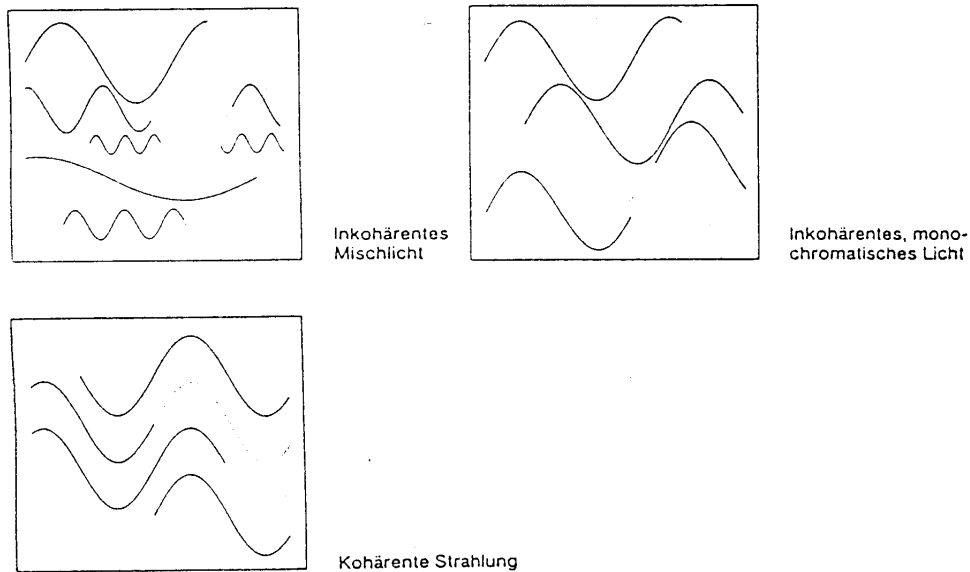
„Fällt“ dieses Elektron wiederum in einen niedrigeren Energiezustand, so gibt es die überschüssige Energie in Form einer elektromagnetischen Welle ab. Diese Welle, auch Photon, wird durch ihre Wellenlänge eindeutig bestimmt (\Rightarrow Lichtfarbe).

Elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge zwischen 380 und 780 nm sind für den Menschen wahrnehmbar. Hierbei muss man jedoch berücksichtigen, dass wir uns ständig in einem elektromagnetischen Wellenäther befinden, jedoch nur einen sehr kleinen Bereich davon aktiv wahrnehmen.



Diese Lichtwellen breiten sich mit konstanter Geschwindigkeit (ca. 300.000 km/s im Vakuum) gradlinig und ohne gegenseitige Beeinflussung aus. Licht besitzt keine Masse, zeigt aber in bestimmten Versuchen eindeutig Teilchencharakter (Photoeffekt), während andere Phänomene eine reine Wellennatur zu bestätigen scheinen (Interferenz, Beugung, Polarisation). Gewöhnlicherweise lässt sich einer Welle eindeutig eine bestimmte Wellenlänge und Amplitude zuordnen. Bei Licht gestaltet sich dies schwierig. Zwar ist die Einordnung mit Hilfe der Wellenlänge eindeutig, andererseits kann man einer elektromagnetischen Welle keine eindeutige Amplitude zuordnen. Bei Schallwellen, bzw. Materiewellen allgemein, ist die Amplitude ein Maß für die übertragene Energiemenge;

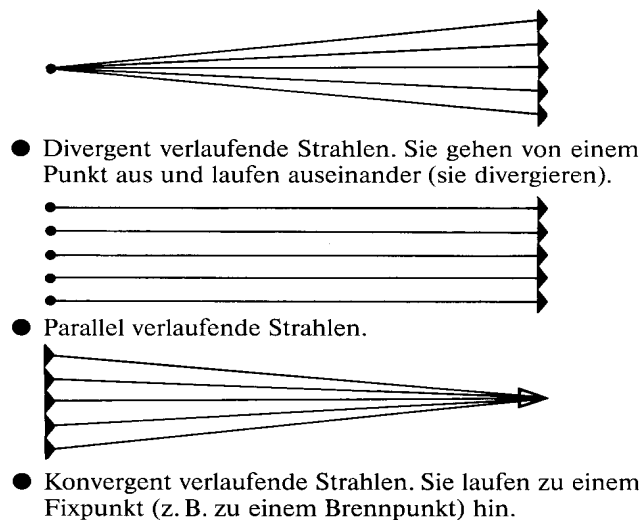
bezüglich des Lichts wird diese durch die Anzahl der Photonen bestimmt, die sich als Störungen im elektromagnetischen Äther fortbewegen.
Photonen gleicher Wellenlänge besitzen gleiche Energie. Hinsichtlich der Phasenverteilung der Photonen zueinander unterscheidet man drei verschiedene Zustände:



- inkohärentes Mischlicht: die Phasen sind versetzt zueinander, die Wellenlänge verschieden, z.B.: normales Tageslicht
- inkohärentes, monochromatisches Licht: wie oben, jedoch nur gleiche Wellenlängen, z.B.: einfarbiges Lampenlicht
- kohärentes Licht: einfarbiges, sich mit gleicher Phase ausbreitendes Licht z.B.: Laserlicht

(Anmerkung: Die durch die Gleichschwingung der Photonen erzeugte hohe Energie des Laserlichts wird erst beim Auftreffen auf einen absorbierenden Körper wirksam, also nicht in Luft oder auf einen Spiegel)

Die gradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen lässt sich ebenfalls in drei Grundzustände aufteilen, die in der Optik eine sehr wichtige Rolle spielen:



Lichtquellen / Licht und Materie

Emission

Lichtquellen emittieren Licht unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung.

Je nach **Art der Lichterzeugung** unterscheidet man unterschiedliche Lichtquellen; z.B.:

- Temperaturstrahler: Kerze, „Glühbirne“, Halogenlampen, ...
- Luminiszenzstrahler: Elektroluminiszenz: LED, Metalldampflampen, ...
Fluoreszenz: Leuchtstoffröhre, ...
[...]
- Laser (kohärent/monochromatisch)

Je nach **spektraler Zusammensetzung** Lichts unterscheidet man unterschiedliche **Farbtemperaturen**; sie werden angegeben in Kelvin [K]. Es wird der visuelle Farbeindruck definiert; je höher der Kelvin-Wert, desto höher ist der Blauanteil.

Der Temperaturwert bezieht sich hierbei auf die spektrale Strahlungsverteilung eines „schwarzen“ (Planck'schen) Strahlers mit entsprechender Temperatur.

Beispiele: Normlichtart A 2856 K (Glühlampenlicht)
(ISO 3664) Normlichtart D50 5000 K (Abmusterung von Drucken, Proofs)
 Normlichtart D65 6500 K (Farbmessung)
 Normlichtart C 6800 K

Bei der Bilderfassung (Kamera, Fotografie) wird die Farberfassung durch einen **Weißabgleich** auf die Farbtemperatur der Beleuchtung angepasst.

Refraktion (Lichtbrechung)

Beim Übergang vom optisch dünneren Medium (Luft) ins optisch dichtere Medium (Glas) wird das Licht gebrochen. Die Stärke der Brechung ist abhängig vom Brechungsindex des Glases: Stark brechende Gläser lenken den Lichtstrahl stärker ab als schwach brechende. Wenn der Lichtstrahl das Glas verlässt, erfolgt die Brechung genau umgekehrt. Außerdem wird an jeder Grenzfläche ein (relativ geringer) Teil des Lichtes reflektiert (s. u.)



Refraktion eines (monochromatischen) Lichtstrahls an einer planparallelen Platte.

Beugung

Die Beugung ist neben der Refraktion eine weitere Abweichung von der gradlinigen Erscheinungsform des Lichts. Lichtwellen werden nach dem Beugungsgesetz an Kanten und Spalten „gebeugt“; auch hier werden die einzelnen Wellenlängen unterschiedlich stark abgelenkt.

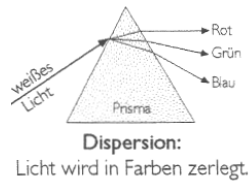
(Bsp.: Interferenzmuster am Doppelspalt)

Dispersion

Die Stärke der Brechung ist weiterhin abhängig von der Wellenlänge des Lichts:

Kurzwelliges (blaues) Licht wird stärker gebrochen als langwelliges (rotes).

Weißes Licht wird beim Durchgang durch ein Prisma deshalb in seine farbigen Bestandteile zerlegt (dispergiert). Dies geschieht auch bei Linsen (> chromatische Aberration).



Dispersion durch Refraktion: Kurzwelliges Licht wird stärker gebrochen als langwelliges. Die Stärke der Dispersion ist wesentlich von der Zusammensetzung des Glases abhängig.

Vorsicht: Die Zerlegung des Lichts hat nichts gemeinsam mit Dispersionsfarben, die wir zum Beispiel zum Anstreichen von Wänden verwenden. Distorsion klingt ganz ähnlich, bedeutet aber Verzeichnung.

Reflexion

An einem Spiegel wird ein das auftreffende Lichts (fast) vollständig reflektiert, das heißt gerichtet zurückgestrahlt. In diesen Fällen gilt das Reflexionsgesetz: Einfallswinkel (α) ist gleich Ausfallswinkel (β).

Bei sehr glatten Materialien treten ebenfalls Reflexionen auf. Die Stärke der Spiegelung ist abhängig von der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit und dem Einfallswinkel des Lichts. Spiegelungen kann man deshalb nur innerhalb eines bestimmten Winkelbereichs erkennen: Bewegt man sich, so verändert sich auch die Stärke der Spiegelung.

Je größer der Einfallswinkel (Winkel zum Lot auf die Fläche!), desto höher wird der Reflexionsgrad. Ab einem bestimmten Grenzwinkel kann eine Totalreflexion auftreten.

Remission

Der überwiegende Teil des auf Materie auftreffenden Lichts wird gestreut (diffus) zurückgestrahlt. Deshalb kann man Körper von beliebigen Standorten aus sehen: An mehr oder weniger rauen Oberflächen wird das Licht nach allen Seiten gestrahlt (remittiert).



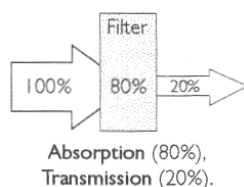
Fast alle Körper, die wir wahrnehmen remittieren Licht. Die konkrete Oberflächenbeschaffenheit bestimmt das Verhältnis zwischen Remission und Reflexion (> „Glanzgrad“)

Absorption

Kein Körper strahlt das auftreffende Licht vollständig zurück - weder gerichtet noch diffus. Ein Teil dieses Lichts wird immer 'verschluckt' (absorbiert). Diese Lichtenergie wird in Wärme umgewandelt. Absorbiert ein Körper die Spektralfarben gleichmäßig, so erscheint er uns unbunt, also weiß, grau oder schwarz. Absorbiert er aber das auftreffende weiße Licht ungleichmäßig, so remittiert er auch die Lichtanteile unterschiedlich stark und erscheint uns deshalb farbig.

Transmission

Durchsichtige Körper transmittieren einen Teil des auftreffenden Lichts. Der restliche Anteil wird absorbiert.



Materie - auch das transparenteste Glas - absorbiert immer einen Teil des auftreffenden Lichts. Im Gegensatz zu Farbfiltern ist bei Linsen die Absorption sehr gering, die Transmission dagegen sehr hoch.

Vorsicht Rechtschreibung!

reflektieren - Reflexion
remittieren - Remission

absorbieren - Absorption
emittieren - Emission

transmittieren - Transmission

Lichttechnische Größen und deren Zusammenhänge

Raumwinkel Ω [sr]

Verhältnis der Oberfläche einer Kugel zum Quadrat des Radius, mit der Einheit Steradian [sr]. Hiermit schafft man sich ein Maß zur räumlichen Beurteilung der Abstrahlung einer Lichtquelle.

Beispiel: Eine Lampe, die direkt an einer Wand befestigt ist, strahlt, lässt man die auf die Wand auftreffende Strahlung außer Acht; nur in den „halben“ Raum direkt ab. Will man dies mit dem Maß Steradian ausdrücken, so beschreibt man diesen Halbraum mit Hilfe einer Kugeloberfläche mit dem Radius 1. Die gesamte Kugeloberfläche beträgt 4π , die Hälfte somit 2π (siehe auch unten).

Kugelfläche: $F_k = 4\pi \cdot r^2$ Kugelsegment: $F_s = \Omega \cdot r^2$

Raumwinkel: $\Omega = \frac{F_s}{r^2} = 4\pi \frac{F_s}{F_k}$ d.h. bei $r = 1$ ist $\Omega_{\max} = 4\pi = 12,56$ sr

Lichtstärke I [cd]

Die von einer Lichtquelle ausgehende Leuchtkraft wird durch die Lichtstärke I beschrieben. Die Einheit ist Candela [cd].

(Diese Einheit entspricht 1/60 der Lichtenergie, die von 1cm² von bis zum Schmelzpunkt erhitztem Platin abgestrahlt wird, früher wurde auch eine sog. Hefnerkerze. (aus Stearin mit 1cm Durchmesser) zur Beurteilung der Lichtstärke benutzt.). Je höher die Lichtstärke I, desto mehr Energie wird abgestrahlt, desto „heller“ erscheint uns die Lichtquelle.

Lichtstrom Φ [lm] und Lichtmenge Q [lm·s]

Die von einer Lichtquelle ausgehende Leistung bezogen auf den Raumwinkel und Zeit wird als Lichtstrom bezeichnet. Die Lichtmenge Q ist die in einer bestimmten Zeit abgestrahlte Energie. Der Lichtstrom ist somit im Vergleich zur Lichtstärke einer Lichtquelle kein Maß für die Lichtquelle selbst, sondern für die abgegebene Leistung.

Eine Lichtquelle mit konstanter Lichtstärke I erzeugt einen konstanten Lichtstrom Q. Zur Beurteilung der Lichtmenge Q wird die in einer bestimmten Zeit angegebene Energie gemessen.

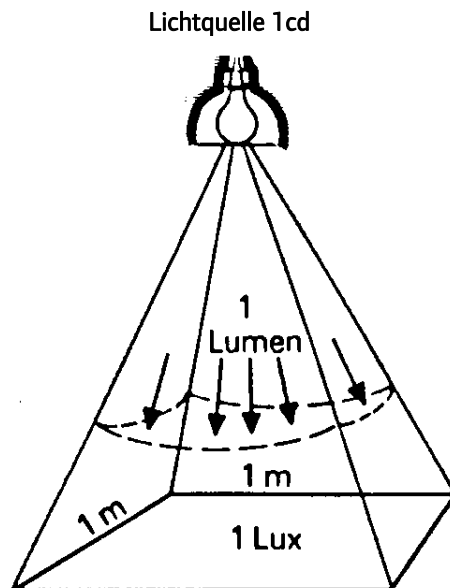
Die Einheit des Lichtstroms ist ein Lumen [lm] ($1\text{lm} = 1\text{cd}\cdot\text{sr}$);
die der Lichtmenge Lumen-Sekunde [lm·s].

Beleuchtungsstärke E [lx] und Belichtung H [lx·s]

Die Beleuchtungsstärke E wird durch das Verhältnis zwischen aufgestrahlter Energie (Lichtstrom) und beleuchteter Fläche A beschrieben oder: Je höher die Beleuchtungsstärke E, desto höher die aufgestrahlte Energie, desto heller erscheint die Fläche. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist Lux [lx]. ($1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2 = 1(\text{cd}\cdot\text{sr})/\text{m}^2$)

Zur Beschreibung der Belichtung H setzt man die Beleuchtungsstärke E ins Verhältnis zur Belichtungszeit t. Die Belichtung H ist das Produkt aus Beleuchtungsstärke E und Belichtungsdauer t. Die Einheit ist 1 Luxsekunde [lx·s].

Die Belichtung wird also durch zwei Faktoren beeinflusst; einerseits durch den auf die zu beurteilende Fläche auftreffende Lichtstrom (Beleuchtungsstärke) und andererseits durch die Dauer der Bestrahlung.

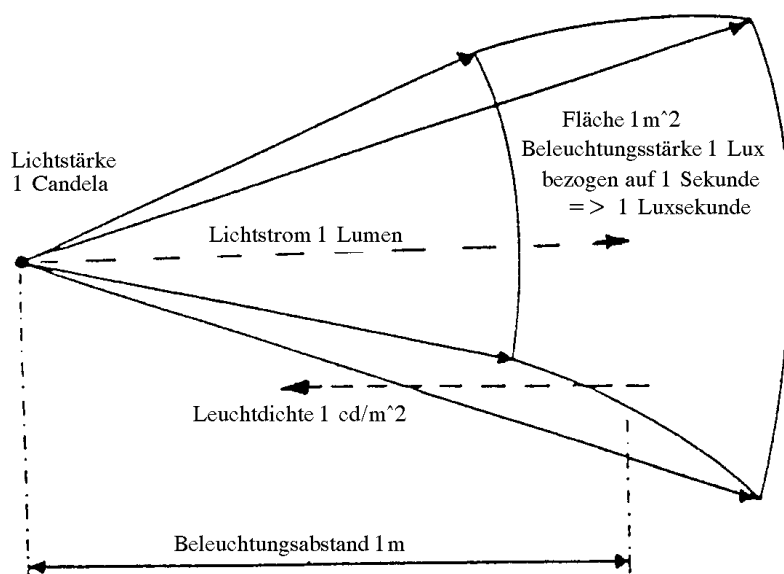


Eine Lichtquelle der Stärke 1 cd erzeugt in 1m Entfernung eine Beleuchtungsstärke von 1 lx.

Leuchtdichte B [sb]

Während die Beleuchtungsstärke, die auf einen Körper auftreffende Strahlung beschreibt, wird der von einer Fläche zurückgeworfene Lichtstrom als Leuchtdichte B bezeichnet. Die Größe „Lichtstärke“ bezieht sich nur auf Lichtquellen, während die Leuchtdichte ein Maß für die Helligkeit bestrahlter Körper ist. Unsere Wahrnehmung kennt diese Unterscheidung nicht. Ein schwarzes Blatt Papier hat also bei gleicher Beleuchtung eine geringere Leuchtdichte als ein weißes Blatt Papier, jedoch keines der Blätter wird mit dem Begriff Lichtstärke charakterisiert. Die Einheit der Leuchtdichte ist 1 Candela pro m^2 [cd/m^2] oder 1 Stilb [sb] = $10^{-4} cd/m^2$.

Übersicht: Lichttechnische Größen:



Wirkungsgrad einer Lichtquelle [lm/W]

Zur Beurteilung der Lichtausbeute einer Lichtquelle untersucht man das Verhältnis zwischen erzeugtem Lichtstrom und dazu aufgewendeter Energie. Die Einheit der Lichtausbeute ist 1 Lumen pro Watt [lm/W]

Lichtstärke, Abstand, Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke nimmt proportional zum Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle ab, d.h. die von einer punktförmigen Lichtquelle abgegebene Energie verteilt sich gleichmäßig über eine Kugeloberfläche mit der Lichtquelle als Mittelpunkt. Vergrößert man nun den Radius dieser Kugel, so verteilt sich die gleiche Energie über eine Fläche, die proportional zum Quadrat des Radius zunimmt. Mit Zunahme der beleuchteten Fläche nimmt im gleichen Maße die Beleuchtungsstärke ab. Bei der Verdoppelung des Lampenabstands reduziert sich die Beleuchtungsstärke auf ein Viertel des Ursprungswertes.

Es folgt für die Beleuchtungsstärke E :
$$E = \frac{I}{r^2}$$

Lambert'sches Gesetz

Die Beleuchtungsstärke ist neben der Strahlungsintensität und -distanz auch vom Einfallswinkel α der Lichtstrahlen abhängig, d.h. je „schräger“ die Lichtstrahlen auf eine Fläche treffen, desto geringer ist die Beleuchtungsstärke. Ihren maximalen Wert erreicht sie wenn die Strahlen senkrecht auftreffen ($\cos 0^\circ = 1$, $\cos 90^\circ = 0$).

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