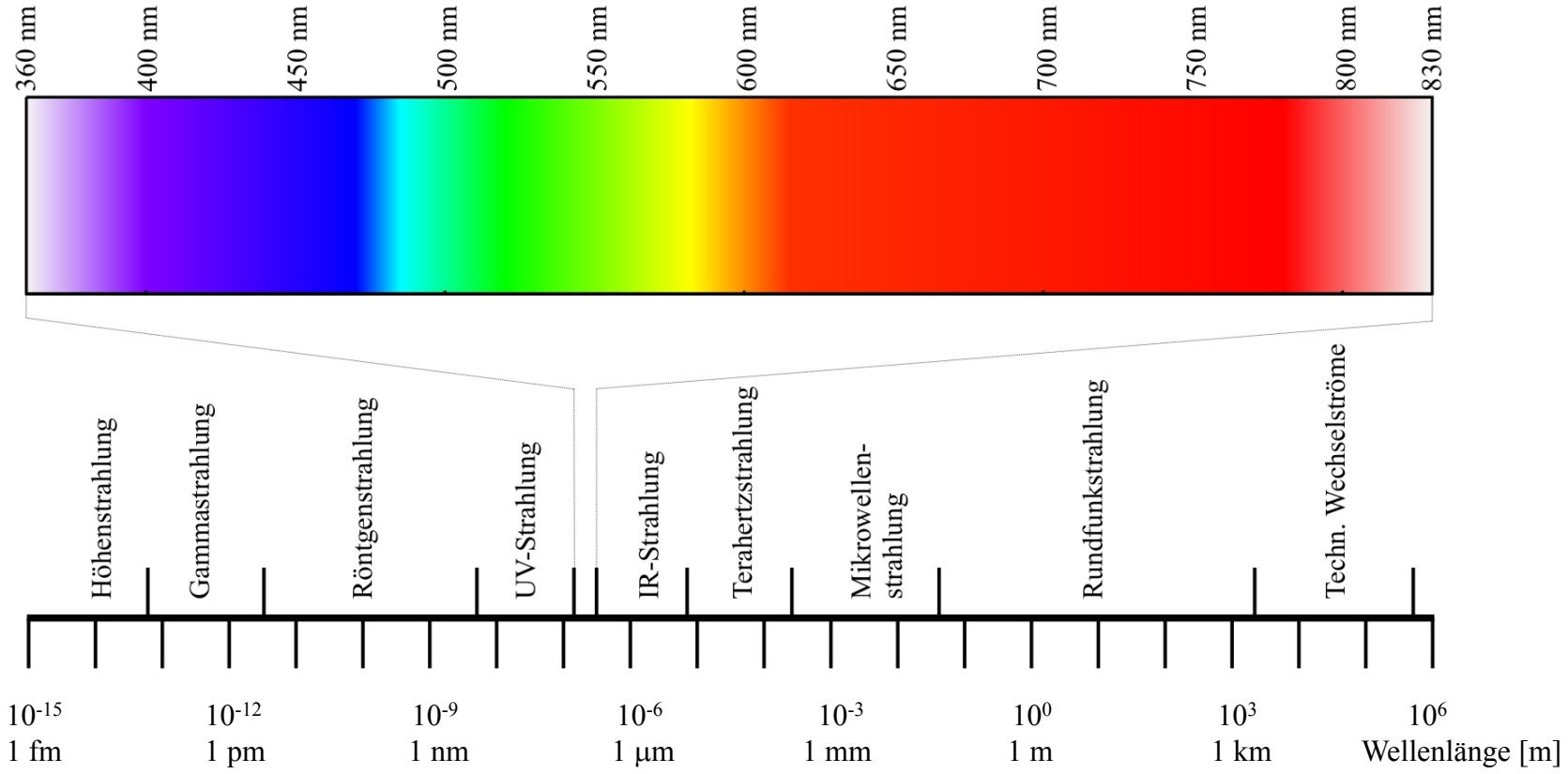
Messung von Licht.
Photometrie.

Was ist Licht?

Licht ist elektromagnetische Strahlung in dem Wellenlängenbereich, der mit dem menschlichen Auge sichtbar ist.

Die Photometrie beschäftigt sich mit optischen Messverfahren für den sichtbaren Spektralbereich.



Wofür sind genaue Lichtmessungen wichtig?

- Für die Entwicklung neuer und effizienter Lichtquellen:

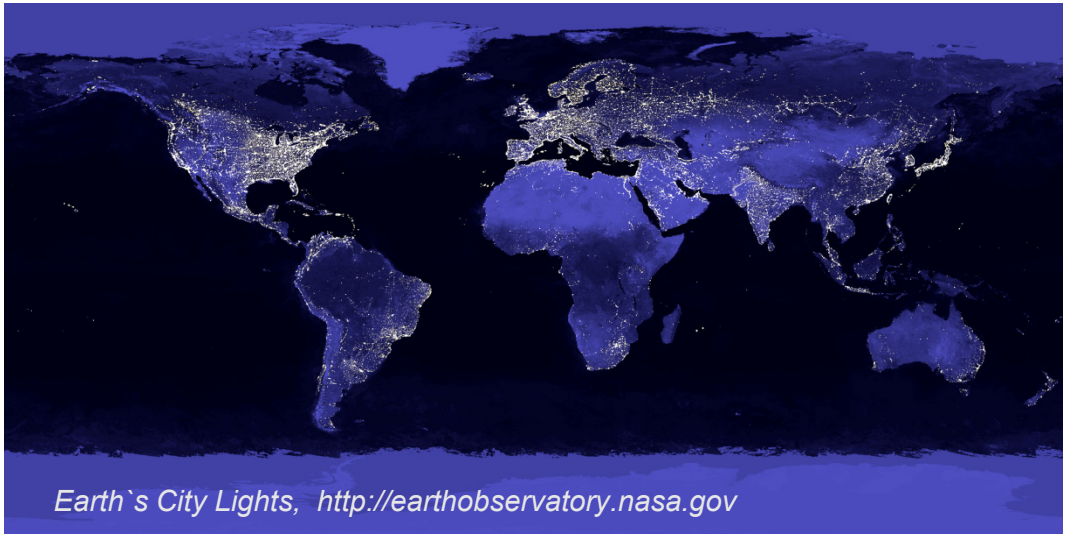
  viel Licht mit weniger Energie erzeugen.

  Der Stromverbrauch für künstliche Beleuchtung auf der Erde lag 2005 bei 2,65 Milliarden kWh, was etwa 19% der gesamten erzeugten elektrischen Energie entspricht. Eine Verbesserung der Effizienz der Beleuchtung kann daher zu deutlichen Erergieersparnissen führen.

Die künstliche Beleuchtung der Erde bei Nacht auf einem Satellitenbild.

Nach einer Studie der International Energy Agency (IEA) werden weltweit über 33 000 000 000 Lampen an Stromnetzen betrieben*.

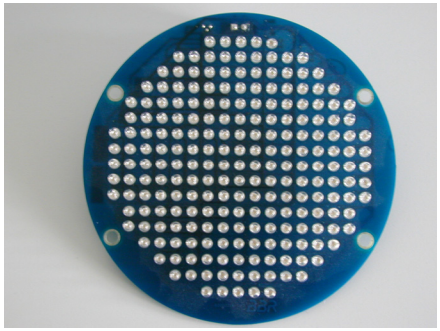
Nach spätestens 10 000 Brenn-stunden müssen diese ersetzt werden.



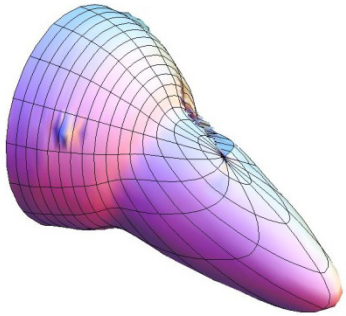
*IEA Annex 45: Energy Efficient Electric Lighting for Buildings, 2005.

Wofür sind genaue Lichtmessungen wichtig?

- Zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben für eine genügend helle bzw. gleichmäßige und energieeffiziente Beleuchtung. Die Minimalanforderungen an die Beleuchtung sind im öffentlichen Bereich (Luft- und Straßenverkehr, Arbeitsplätze usw.) in der Regel gesetzlich geregelt. Beispiele:
  - Lichtsignalanlagen („Verkehrsampeln“) müssen eine Minimallichtstärke besitzen, damit sie auch bei ungünstigen Lichtverhältnissen (tiefstehende Sonne o. ä.) gut zu sehen sind.
  - Der Arbeitnehmerschutz schreibt eine Beleuchtungsstärke von mindestens 500 Lux für Bildschirmarbeitsplätze vor.
- Kurz- und langjährige Überwachung von umweltrelevanten Parametern: Fernerkundung (engl. remote sensing) wird mittels reflektierter oder emittierter elektromagnetischer Strahlung, u.a. Licht, durchgeführt.



LED-Cluster als Signallichtquelle (grüne Ampel).

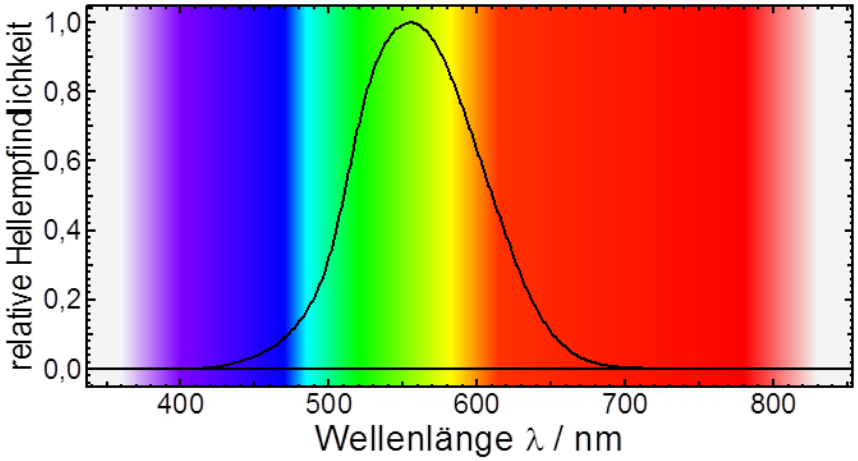


Die an der PTB gemessene räumliche Lichtstärkeverteilung zeigt, dass das Licht nach unten, Richtung Autofahrer gerichtet ist.

Die Hellempfindlichkeitsgrad

In der Lichtmessung muss man das menschliche Sehen und die menschliche Wahrnehmung auf standardisierte Art und Weise berücksichtigen.

Um die „Helligkeit“ einer Lichtquelle möglichst objektiv, also weitgehend unabhän-gig vom Sinneseindruck einer Einzelperson und den Umgebungsbedingungen vergleichen zu können, wurde 1924 von der Internationalen Beleuchtungs-kommission CIE (frz. Commission Internationale de l'Éclairage) der **Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$** eines **photometrischen Normalbeobachters** festgelegt.



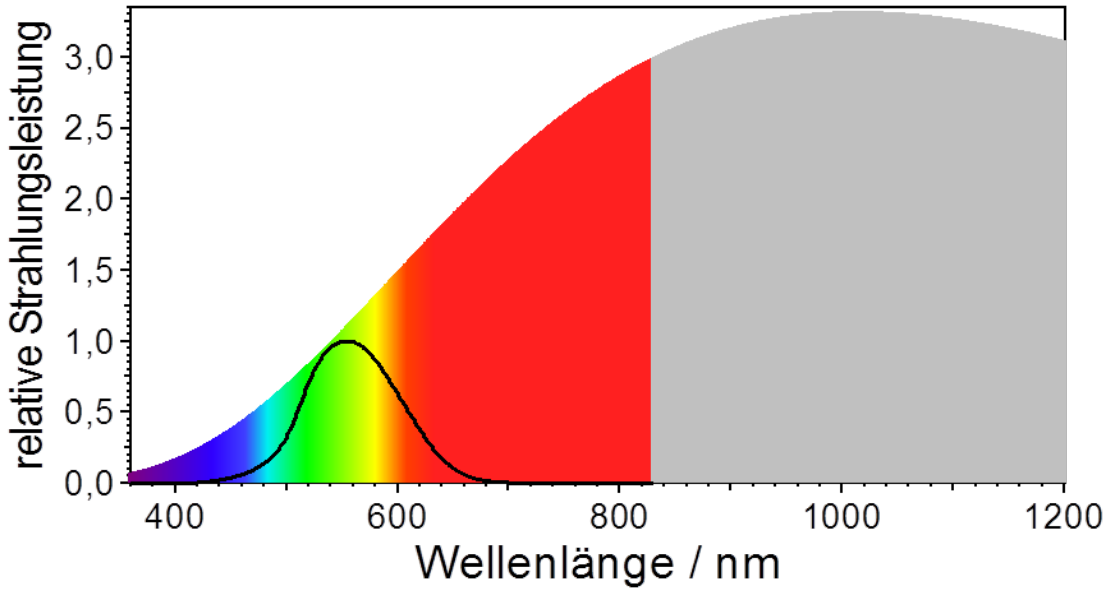
$V(\lambda)$-Hellempfindlichkeitsgrad

Dieser hypothetische Normalbeobachter beruht auf sinnesphysiologischen Licht-experimenten mit einer Gruppe von Menschen. Es wurde ein Vergleich der Helligkeit von Lichtern mit verschiedenen Farben im visuellen Spektralbereich zwischen 360 nm und 830 nm durchgefuhrt. Das Maximum der $V(\lambda)$-Kurve liegt bei 555 nm und ist auf 1 normiert.

Das menschliche Auge reagiert also am empfindlichsten auf grünes Licht.

Bedeutung der Hellempfindlichkeitsgradkurve

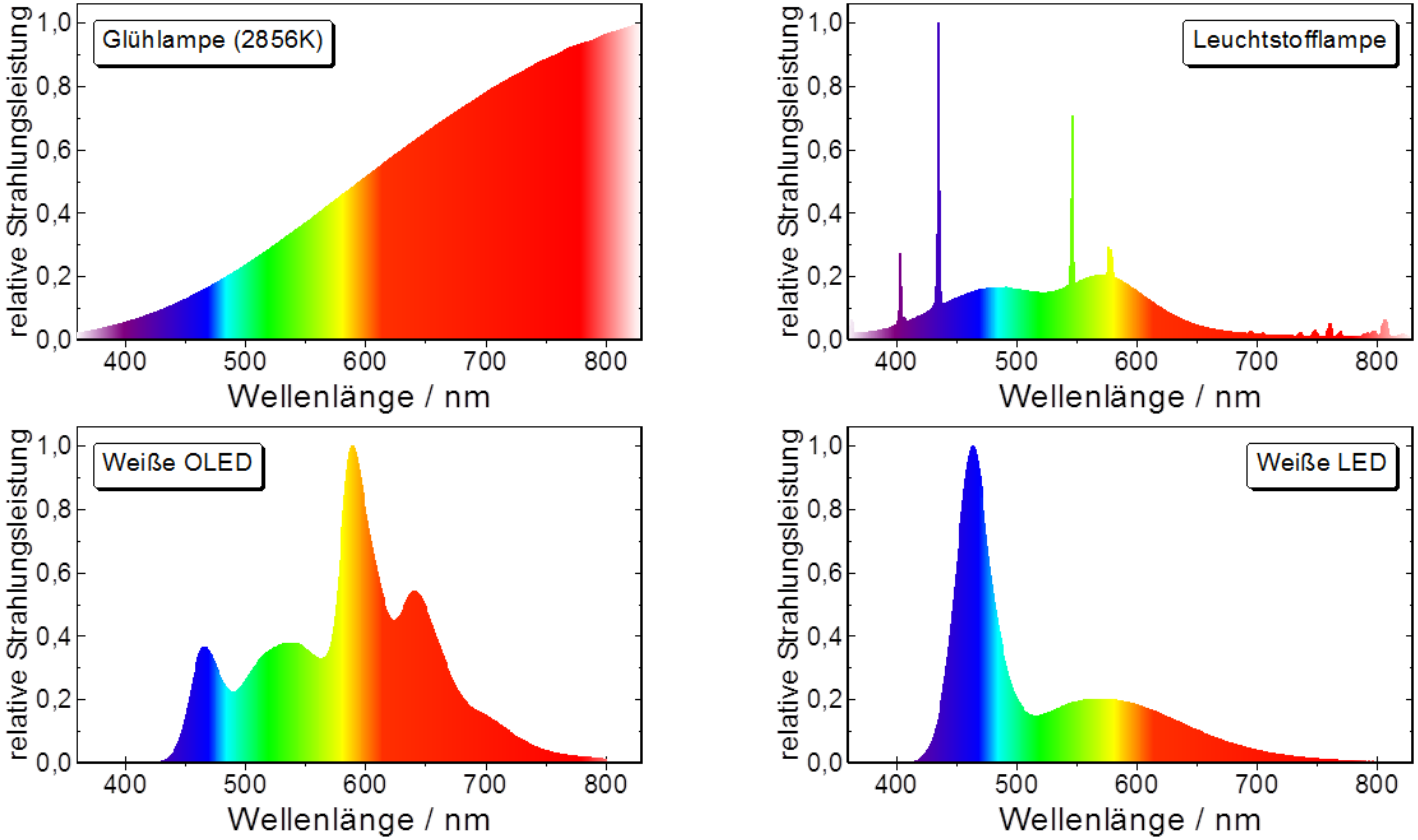
Das folgende Diagramm zeigt die spektrale Strahlungsleistung einer Glühlampe. Der sichtbare Spektralbereich ist mit Regenbogenfarben hinterlegt. Die emittierte Infrarotstrahlung ist grau dargestellt.



$V(\lambda)$-Hellempfindlichkeitsgrad und spektrale Verteilung einer Glühlampe

- Strahlung im infraroten und ultravioletten Wellenlängenbereich wird vom Auge des Menschen nicht wahrgenommen. Dies ist die Ursache der schlechten Lichtausbeute von Glühlampen (sogenannte „Energieeffizienz“).
- Eine Glühlampe emittiert Strahlung lückenlos im gesamten sichtbaren Spektralbereich. Dadurch ist die Wiedergabe von allen Farben sehr gut.

Vergleich von Lichtquellen



Auf den Bildern sind die spektralen Zusammensetzungen des Lichts von drei Lampen gezeigt, deren Lichterzeugung auf verschiedenen Technologien basiert: Leuchtstofflampe (eine typische „energiesparsame“ Lampe), eine weiße LED (light-emitting diode) und eine weiße OLED (organische LED), die hauptsächlich als größere leuchtende Fläche zum Einsatz kommen könnte.

Obwohl jede von diesen Lichtquellen ein „weißes“ Licht emittiert, werden damit beleuchtete Farben unterschiedlich wiedergegeben, was das menschliche Wohlbefinden unterschiedlich beeinflussen kann.

Übersicht über photometrischen Größen

In der Photometrie werden mehrere Größen verwendet, womit z. B. Lichtquellen und deren Wirkung charakterisiert werden. Die wichtigsten sind in der Tabelle zusammengefügt.

Photometrische Größen	SI - Einheit	Bedeutung
Lichtstrom	Lumen (lm)	Ein Maß für die gesamte von einer Strahlungsquelle ausgesandte sichtbare Strahlung (dabei wird die Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigt). Unabhängig von der Größe der leuchtenden Fläche und von der Ausstrahlungsrichtung. Stellt eine sehr wichtige Angabe über Lichtquellen für die Beleuchtungsplannung dar.
Lichtstärke	Candela (cd)	Eine Lichtquelle gibt nicht in alle Richtungen den gleichen Lichtstrom ab. Die Lichtstärkeverteilung ist ein Maß für die räumliche Verteilung des Lichtstroms (Quotient aus Lichtstrom und Raumwinkel). Hängt nicht vom Abstand eines Beobachters ab. Zum Vergleich von Lichtquellen wird in zweidimensionalen oder dreidimensionalen Verteilungsdiagrammen dargestellt.
Beleuchtungsstärke	Lux (lx) = lm/m^2	Der Quotient aus dem einfallenden Lichtstrom pro Empfängerfläche, eine reine Empfängergröße, nimmt mit der Entfernung von der Lichtquelle ab. Die Beleuchtungsstärken sind bei unterschiedlichen Tätigkeiten in öffentlichem Bereich durch Normen vorgegeben.
Leuchtdichte	keine eigene Einheit (cd/m^2)	Entspricht am ehesten der menschlichen Wahrnehmung von Helligkeit einer Fläche. Wird angewendet um die Helligkeit von ausgedehnten, flächenhaften Lichtquellen zu beschreiben um die zu vergleichen.
Lichtausbeute	Lumen/Watt	Der Quotient aus dem von einer Lampe abgegebenen Lichtstrom und der von ihr aufgenommenen elektrischen Leistung. Dient zur Charaktierisierung von Lichtquellen aus der Sicht der Energiesparsamkeit (ohne Berucksichtigung von Farbwiedergabeeigenschaften).

Vergleich von Lichtquellen

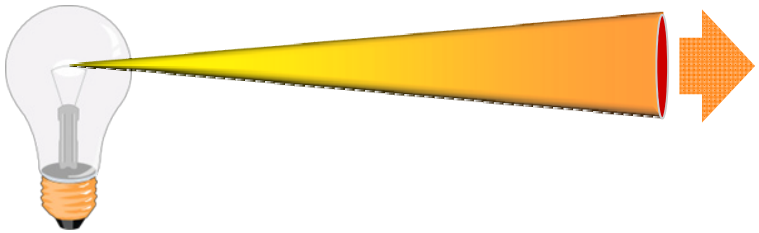
In der Tabelle werden verschiedene Lichtquellen (Folie 7) verglichen.
Obwohl hier die Glühlampe die schlechteste Lichtausbeute besitzt, ermöglicht ihr warmweißes Licht eine bessere Farbwiedergabe und ist „gemütlicher“ als das Licht einer Leuchtstofflampe.
Der Farbwiedergabeindex ist eine weitere photometrische Größe, die diese Eigenschaft beschreibt. Werte nahe 100 gelten als optimal.
Schmalbändige Strahlung in der Nähe des Maximums des Hellempfindlichkeitsgrads liefert zwar höchste Lichtausbeute der Leuchtstofflampen, deren Farbwiedergabeindex ist jedoch deutlich schlechter. Breitbandige Strahlung verbessert demgegenüber den Farbwiedergabeindex bei verringerter Lichtausbeute.

In der Produktentwicklung werden die Beleuchtungseigenschaften von Lampen für die gewünschten Sehaufgaben optimiert.

Lampentyp (Nennleistung W)	Typischer Lichtstromwert (lm)	Lichtausbeute (lm/W)	Farbwiedergabe index
Glühlampe (60 W)	~700 lm	~12	~100
Halogenglühlampe (60 W)	~1000 lm	~17	~100
Kompaktleuchtstofflampe „Energiesparlampe“ (14 W)	~800 lm	~57	45…90
LED-Lampe (12 W)	~800 lm	~67	60…95
Leuchtstofflampe T5 (35 W)	~3000 lm	~86	50…90
50cm² OLED (0,6W)	~15 lm	~25	70…95

Die Lichtstärke

Die Lichtstärke I_v ist die Strahlungsleistung einer Lichtquelle pro Raumwinkeleinheit, gewichtet mit der spektralen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$.



Die Einheit der Lichtstärke ist die Candela (lat.: Kerze) mit dem Zeichen cd.

In der Photometrie werden besondere Einheiten verwendet, die alle von der Candela abgeleitet werden. Sie ist eine der sieben Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems SI.

Die Einheit Candela wurde 1979 in der 16. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) wie folgt definiert:

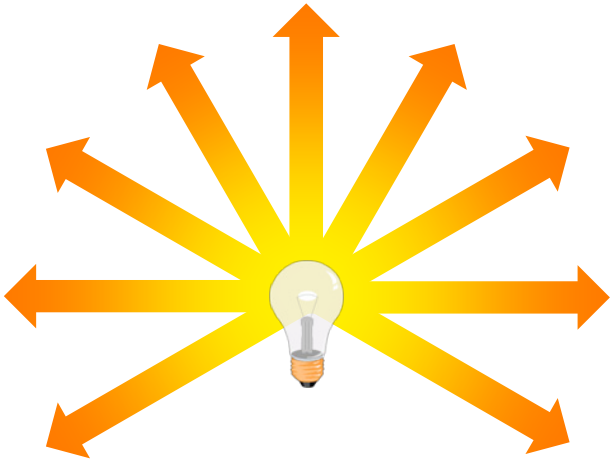
„Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 · 10^{12} Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt durch Steradiant beträgt.“

Die Candela ist eine photometrische Einheit, die die Hellempfindung des menschlichen Auges berücksichtigt. Sie ist durch die Definition über die Strahlstärke mit den SI-Basiseinheiten Meter, Kilogramm und Sekunde verknüpft.

Der Lichtstrom

Die volkswirtschaftlich wichtigste photometrische Größe ist der Lichtstrom Φ_v mit der Einheit Lumen (lm). Der Lichtstrom einer Lichtquelle gibt an, wie viel Licht diese in alle Richtungen des umgebenden Raumes emittiert.

Beim Austausch einer 60 W Glühlampe durch eine12 W Energiesparlampe, die beide einen Lichtstrom von etwa 700 lm haben, wird der Raum etwa gleich hell beleuchtet .

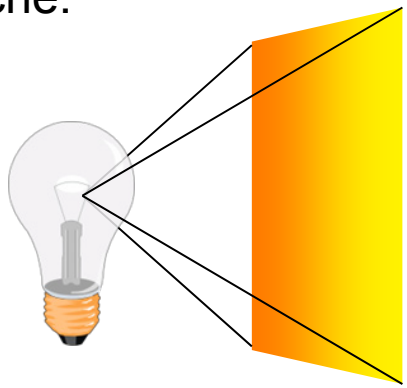


Der Lichtstrom einer Lampe kann aus vielen Einzelmessungen der Lichtstärke oder Beleuchtungsstärke (Folie 16) an unterschiedlichen Positionen bestimmt werden. Wesentlich einfacher und schneller ist der Vergleich verschiedener Lampen in einer Ulbricht-Kugel (Folie 17). Dafür muss allerdings von zumindest einer Lampe der Lichtstrom bekannt sein (Substitutionsmethode).

Die Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke E_v ist die messtechnisch herausragende photometrische Größe. Sie wird in der Einheit Lux (lx) angegeben.

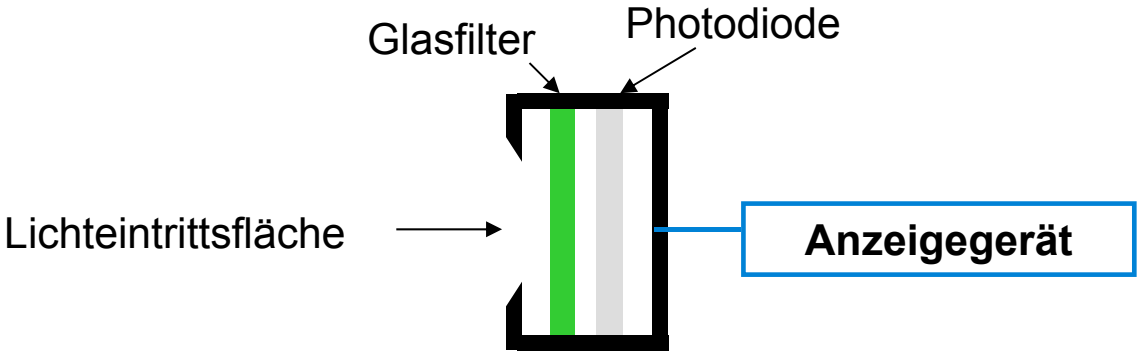
Die Beleuchtungsstärke ist der Quotient aus dem einfallenden Lichtstrom und der beleuchteten Fläche.



Es gilt daher: $$1\ \mathrm{lx} = 1\,\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{m}^2}$$

Zur Messung der Beleuchtungsstärke werden Photometer bzw. Luxmeter verwendet. Der wichtigste Bestandteil ist eine Photodiode, deren spektrale Empfindlichkeit mit Hilfe eines speziellen Glasfilters an die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ angepasst ist.

Rechts: Schema eines Photometers.

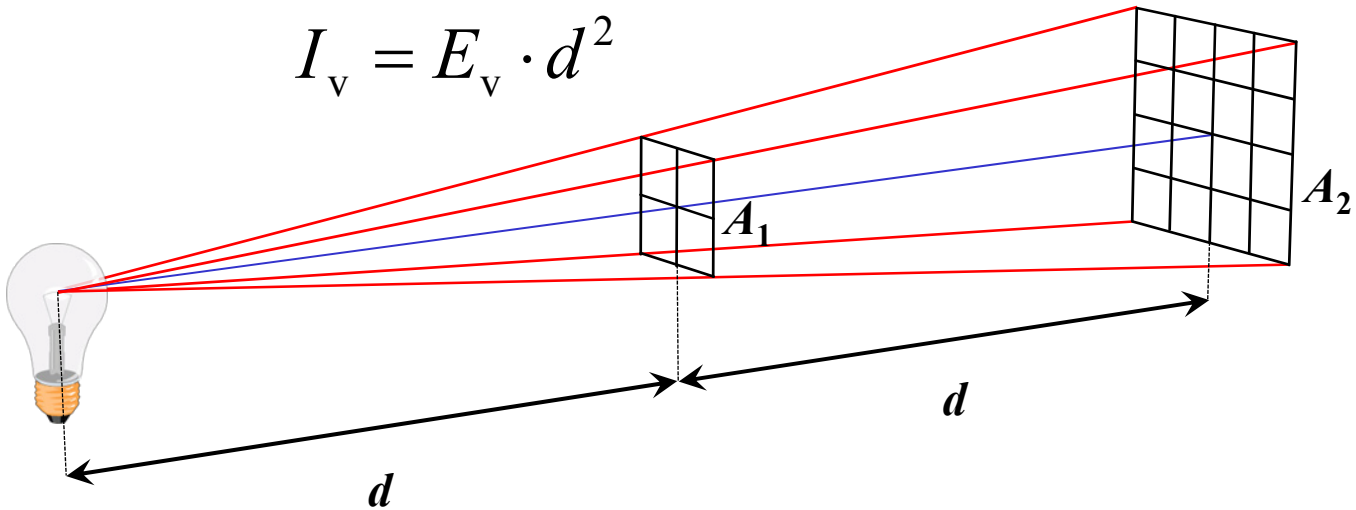


Das photometrische Abstandsgesetz

Die Lichtstärke I_v ist eine Eigenschaft der Lichtquelle und hängt nicht vom Abstand eines Beobachters ab. Sie beschreibt den Teil des Lichtstroms, der in eine bestimmte Richtung pro Raumwinkeleinheit emittiert wird.

Die Beleuchtungsstärke E_v einer Fläche nimmt dagegen mit zunehmendem Abstand zur Lichtquelle ab. Für eine Punktlichtquelle wird dieser Zusammenhang durch das photometrische Abstandsgesetz beschrieben:

$$I_v = E_v \cdot d^2$$



In der Abbildung ist schematisch eine Fläche A_1 eingezeichnet, die sich im Abstand d von einer Punktlichtquelle befindet. Der Quotient aus dem einfallenden Lichtstrom Φ_v und der Fläche von A_1 entspricht der mittleren Beleuchtungsstärke.

Wenn der Abstand auf $2d$ verdoppelt wird, verteilt sich der gleiche Lichtstrom auf die vierfache Fläche – die mittlere Beleuchtungsstärke der Fläche A_2 ist somit entsprechend dem photometrischen Abstandsgesetz nur noch ¼ so groß.

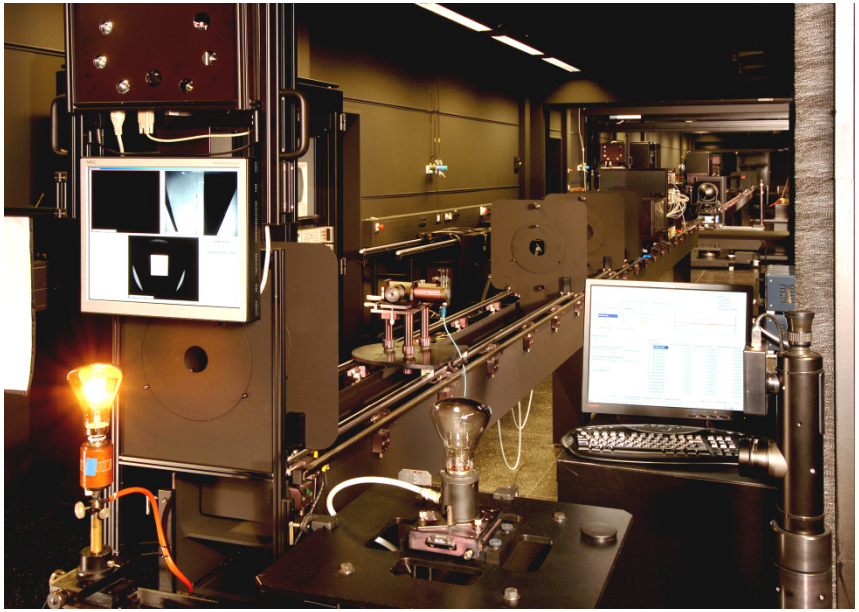
Lichtstärkekalibrierungen in der PTB

Der Abstand zwischen einzelnen Flächenelementen der Lichtquelle und des Photometers ist aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Lichtquelle nicht immer gleich groß.

Daher ist die Anwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes immer mit einem Fehler behaftet, der sich bei steigendem Abstand d verkleinert. Bei sehr großen Abständen wirken reale Lichtquellen und Empfänger als punktförmig, wie z.B. Sterne am Nachthimmel. In der Praxis werden so große Abstände gewählt, das der durch die räumliche Ausdehnung der Lichtquelle verursachte Fehler kleiner 1% wird.

In der PTB wird ein 42 m langes optisches Photometerbanksystem benutzt (Foto rechts), um die Lichtstärke der Lichtquellen mit sehr geringer Messunsicherheit zu bestimmen.

Auf dem Foto leuchtet am Ausgangspunkt der Photometerbank eine Lichtstärkenormallampe.



Beleuchtungsstärkekalibrierungen in der PTB

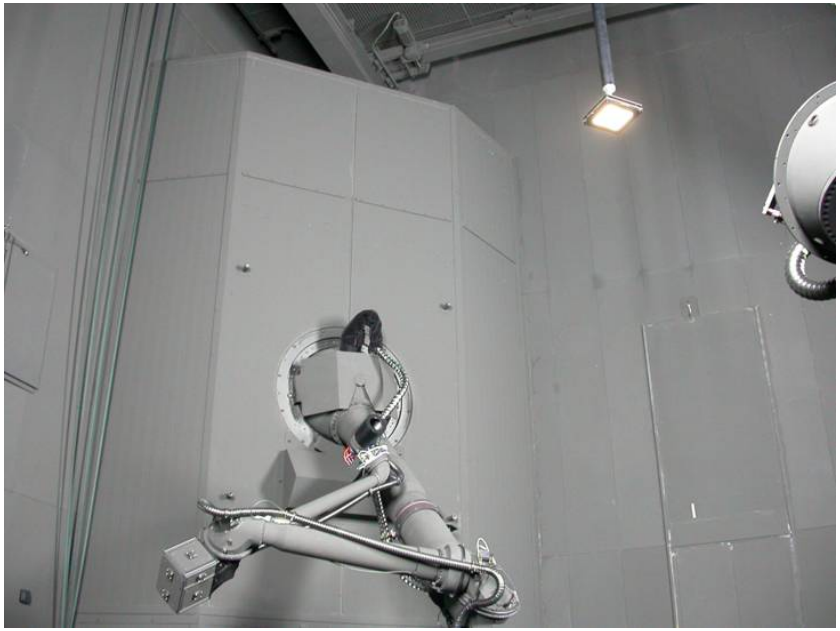
Auf der Photometerbank werden in einem mobilen Bankwagen mehrere Photometer und Luxmeter, die sich auf einem Drehtisch befinden, in unterschiedlichem Abstand zur Messung benutzt.

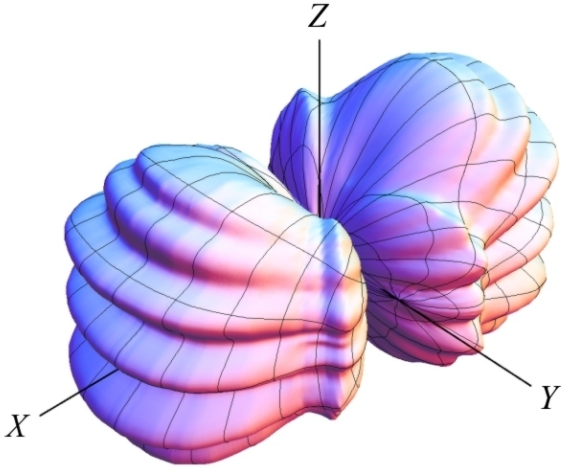
Jedes Photometer kann bei Bedarf zur Lichtquelle gedreht werden, die sich links oder rechts am Ende der optischen Bank befindet. Streulichtblenden sorgen dafür, das der Empfänger nur direkt von der Lampe beleuchtet wird.

Durch Einsatz verschiedener Lampen und Messabstände können in der PTB Beleuchtungsstärken zwischen 100 000 lx (heller Sonnentag) und 0,001 lx (sternklarer Nachthimmel bei Neumond) realisiert werden.

Lichtstromkalibrierungen in der PTB

Auf dem Bild ist ein Teil eines Robotergoniophotometers der PTB zu sehen. Die Lichtquelle wird von einem Roboterarm in der Raummitte gehalten. Zwei weitere Roboterarme halten jeweils Photometer, die während der Messung immer zur Lampe ausgerichtet sind. Diese Arme bewegen sich in einem variablen Abstand von bis zu 3 m spiralförmig um die Lichtquelle herum und messen üblicherweise an mehr als 360 000 Positionen die Beleuchtungsstärke. Eine solche Messung dauert etwa 30 Minuten und ermöglicht die Berechnung des Lichtstroms aller gebräuchlichen Lichtquellen mit sehr kleinen Messunsicherheiten.
Zusätzlich kann mit den Messdaten eine räumliche Lichtstärkeverteilung bestimmt werden (Foto unten, ein Beispiel für eine Glühlampe).





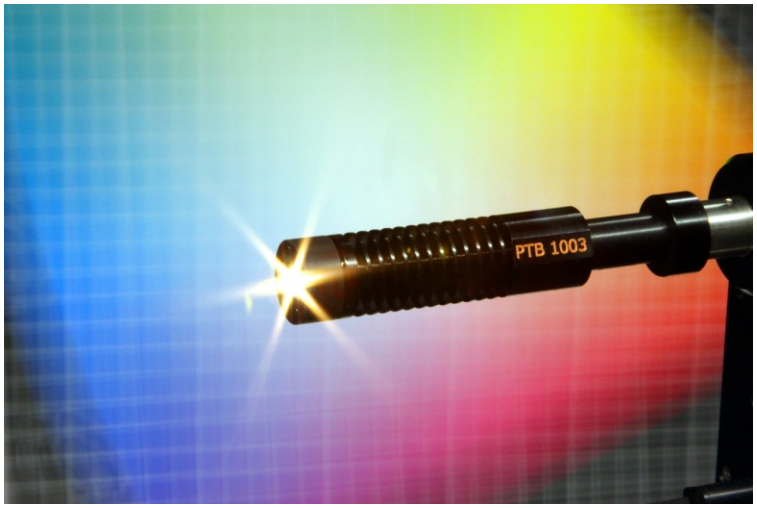
In der PTB werden goniophotometrische Lichtstromkalibrierungen für eine Vielzahl unterschiedlicher Lichtquellen wie Glüh- und Leuchtstofflampen sowie LEDs und OLEDs durchgeführt.

Lichtstromkalibrierungen in der PTB

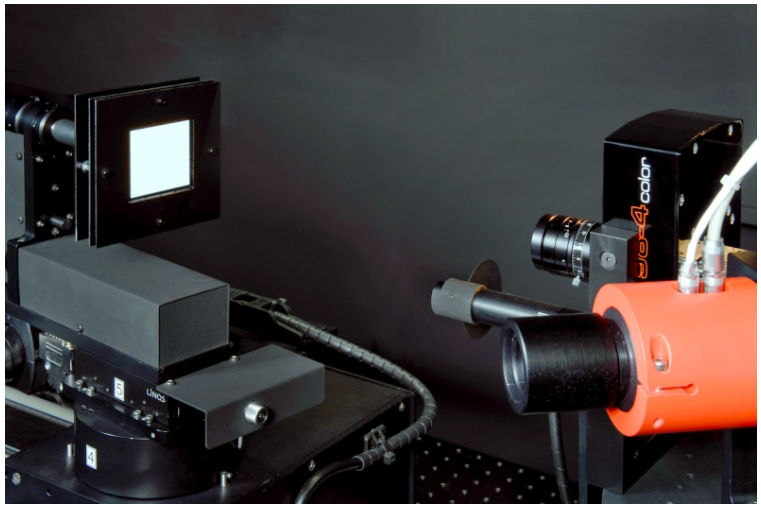
In der Praxis wird der Lichtstrom oft mit Hilfe einer integrierenden Kugel (Ulbricht-Kugel: Fotos unten) gemessen. Hierbei wird eine Lichtquelle in das Zentrum einer Hohlkugel mit diffus reflektierender Innen-wand gebracht. Hier wird jeder Lichtstrahl sehr häufig hin und her reflektiert, so dass im Idealfall bei geschlossener Kugel die gesamte Innenwand eine einheitliche Beleuchtungsstärke besitzt, die mit einem Photometer gemessen wird. Dieser Messwert ist proportional zum Lichtstrom der Lampe. Daher kann der Absolutwert des Lichtstroms einfach durch Vergleich mit einer Lampe mit bekanntem Lichtstrom bestimmt werden. Dieses Substitutionsmessverfahren funktioniert äußerst zuverlässig beim Vergleich sehr ähnlicher Lampen. Informationen über die räumliche Lichtstärkeverteilung können mit dieser Methode nicht erhalten werden.

Normung und Standardisierung im Bereich Photometrie

- Im Rahmen von Dienstleistungen kalibriert die PTB unterschiedliche photo-metrische Messgeräte und Lampentypen mit sehr geringer Messunsicherheit.
- PTB entwickelt neue, auf das SI-System rückgeführte Messverfahren für moderne Lichtquellen wie LEDs oder organische Leuchtdioden (OLEDs).
- Sie arbeitet in nationalen und internationalen Institutionen und Standardisierungsgremien wie z. B. CIE (International Commission on Illumination), DIN (Deutsches Institut für Normung), IEEE (Institute of Electrical and Elecronics Engineers) mit. Die Arbeit auf diesem Gebiet schafft die Voraussetzungen für weltweit vergleichbare Messwerte, die auf den SI-Einheiten basieren.



PTB Hochleistungs-LED-Normal.



Goniophotometer beim Vermessung einer weißen OLED.

Weiterführende Literatur: Photometrie

Mehr Informationen unter: www.ptb.de

- Themenrundgänge: „PTB als Hüterin der Einheiten“: Candela
  http://www.ptb.de/cms/themenrundgaenge/hueterindereinheiten/das-si/candela.html
- Abteilung 4 Optik, Fachbereich 4.1 „Photometrie und angewandte Radiometrie“
  http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4/fb-41/ag-412.html
- PTB Mitteilungen 2.2007 „Das internationale Einheitensystem (SI)“
  http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/mitteilungen/2007/PTB-Mitteilungen_2007_Heft_2.pdf

maßstäbe ist ein kostenloses wissenschaftsjournalistisches Magazin der PTB:
http://www.ptb.de/cms/publikationen/unterseiten/publikationendownload0.html

- maßstäbe Heft 01 – „Dimensionen der Einheiten“
  http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/masstaebe/Hefte_Komplett_PDF/mst01.pdf
- maßstäbe Heft 03 – „Zum Licht“
  http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/masstaebe/Hefte_Komplett_PDF/mst03.pdf

Andere Quellen:

- Photometrie Applet – Hier werden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen photometrischen Größen Lichtstärke, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke grafisch veranschaulicht:
  http://www.stromsparlampen.eu/fotometrie_applet.html

Kontakt

Foto: Wächtergruppe von Friedrich-Wilhelm Voswinkel (1982) am Eingang der PTB, Braunschweig.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
http://www.ptb.de

Abteilung 4 - Optik,
Sekretariat: Tel.: (05 31) 592-40 11
E-Mail: Abteilung4@ptb.de