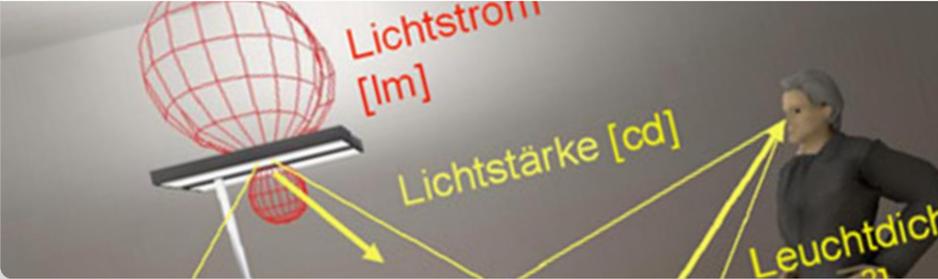


**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

## Optoelektronische Messtechnik

Vorlesung | 1  
Organisation | Optische Grundgrößen

LTI | Lichttechnisches Institut



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

www.kit.edu

## Allgemeine Informationen

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

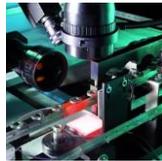
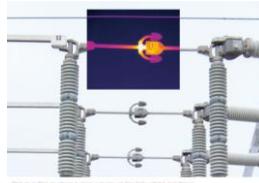
- Fragen
  - Ich bin jederzeit für Fragen offen
  - Daher gibt es keine spezielle Fragestunde
- Kontakt
  - Dr.-Ing. Klaus Trampert
  - Tel.: 0721 608 – 47065
  - Mail: [Klaus.Trampert@kit.edu](mailto:Klaus.Trampert@kit.edu)
  - Geb.Nr. 30.34 – Raum 224
  - Erreichbarkeit: Am Besten nach der Vorlesung oder per E-Mail.
  - Wenn per Email innerhalb von 2 Tagen keine Reaktion, dann bitte nachfassen.

5 21.04.2016 Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Anwendungsbeispiele

- Optoelektronische Messtechnik findet sich fast überall

- Digitalen Kameras
- Entfernungsmesser
- Prozessautomatisierung
- Beleuchtungsstärkemesser
- IR Thermographie
- Fieberthermometern



7 21.04.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Definition – optoelektronische Messtechnik



- Optoelektronik verknüpft die optische mit der elektronischen Welt

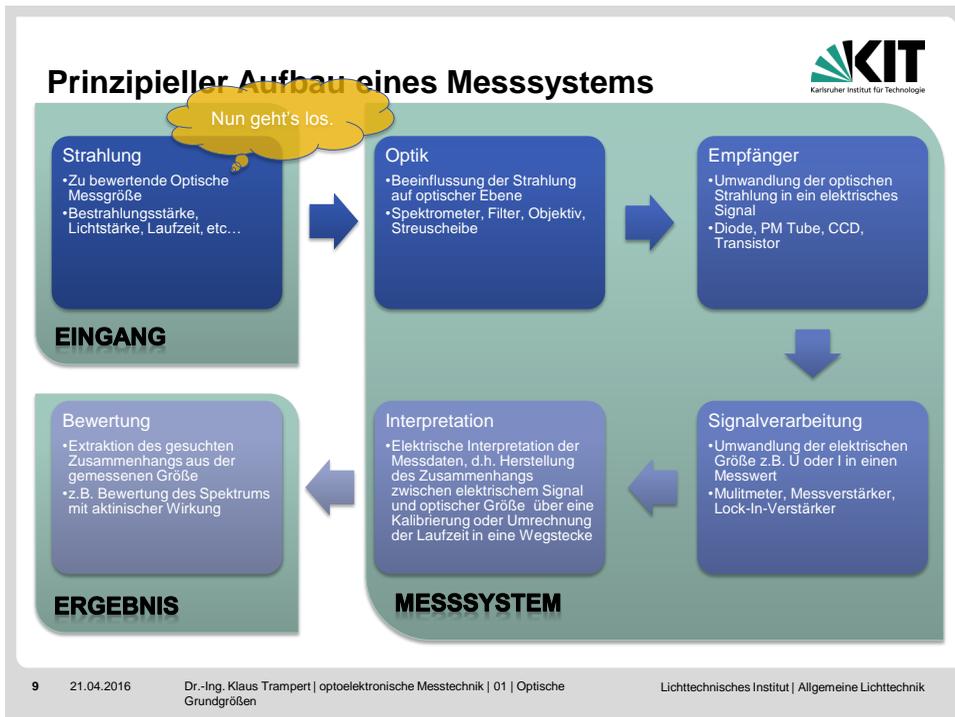
- Optoelektronische Messtechnik

- Anwendung optischer UND elektronischer Verfahren
- Direkte Messung optischer Größen
- Messung nicht optischer Größen mit optischen Methoden

8 21.04.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik



## Beschreibung von Licht





„Wie viel Licht darf's denn sein?“

Licht ist eine **vektorielle** Größe, d.h. sie hat eine Größe **und** eine Richtung

Zur Beschreibung einer lichttechnischen Größe benötigt man Informationen zu

- Größe (Menge)
- Zeitdauer
- Richtung

10    21.04.2016    Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen    Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Beschreibung einer Raumrichtung



- Mathematisch notwendige Größen
  - Angabe des Bezugssystems
  - Lage der interessierenden Raumrichtung relativ zum Bezugssystem

Was in der Mathematik einfach ist, ist im realen Leben nur schwer zu realisieren.

- Was ist das Bezugssystem des Raumes?
- Was sind die drei Hauptachsen?

⇒ Andere Möglichkeiten zur Beschreibung?

11 21.04.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Fragen der Lichttechnik



- Hilfe in der Lichttechnik: Beschreibung mit bezogenen Größen

- Wie viel Licht kommt aus der Leuchte?
- Wie hell ist der Leuchtturm in meine Richtung?
- Wie viel Licht trifft auf den Tisch?
- Wie hell ist der Monitor?

12 21.04.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Wie viel Licht kommt aus der Leuchte?



- Angabe der gesamten Strahlungs-, bzw. Lichtmenge die durch eine Fläche tritt, ohne Angabe einer Richtung.
- Bezugsgröße: Vollraum
- Richtung: Vollraum
- Zeichen:  $\Phi$
- Strahlungsfluss [W]
- Lichtstrom / Lumen [lm]

## Strahlungsfluss $\Phi$



- Integration des Strahlungsflusses durch eine Bezugsfläche über den gesamten Vollraum

$$\begin{aligned}\Phi &= \iint_A E_e \cdot d\lambda \cdot dA \\ &= \iint_A I_e \cdot d\lambda \cdot d\varpi \\ &= [W]\end{aligned}$$

## Lichtstrom || Bestimmung



### ■ U-Kugel

- Optische Integration durch Reflexion
- Abhängig von der Kugeleigenschaft

### ■ Goniometer

- Mathematische Integration durch Abfahren einer Hülle
- Aufwändig

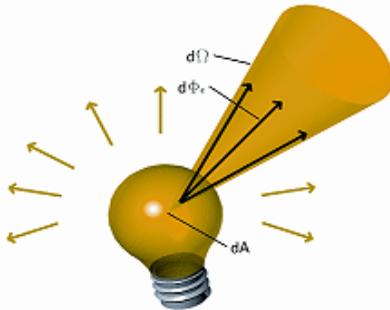
## Wie hell ist der Leuchtturm in meine Richtung?



### Lichtstärke / Strahlstärke

- Angabe der Lichtmenge aus einer **punktförmigen** Quelle in eine Raumrichtung.
- Im Normalfall hängt die Lichtstärke einer Quelle von der Richtung ab.
- Bezugsgröße: Raumwinkel
  - Siehe nächste Folie
- Richtungsangabe:
  - relativ zur Quelle
  - Lage der Quelle im Bezugssystem muss bekannt sein.
- Zeichen:  $I$
- Einheit: cd (Candela) bzw. W/sr

## Strahlstärke I



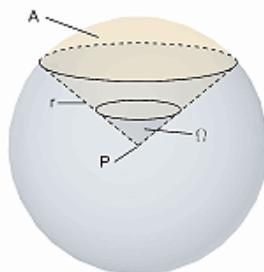
Die Strahlstärke  $I$  beschreibt die Strahlungsleistung, die von einer Quelle in eine bestimmte Raumrichtung emittiert wird.

Die in Richtung des Raumwinkelelements  $\Omega$  abgegebene Strahlungsleistung  $\Phi$  ist gegeben durch:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} = \left[ \frac{W}{sr} \right]$$

Im Normalfall hängt die Strahl- bzw. Lichtstärke von der Richtung ab.

## Raumwinkel

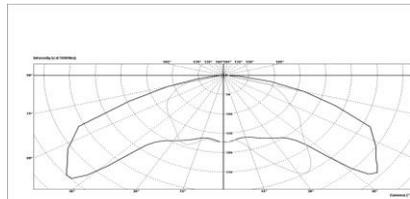


- Der Raumwinkel  $\omega$  beschreibt das Blickfeld eines Beobachters.
  - Winkeldefinition im Raum
- Winkel wird definiert von einer begrenzenden Fläche  $A$  und deren Abstandsquadrat zum Beobachter

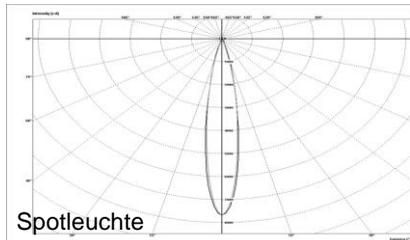
$$\omega = \frac{A}{r^2}$$

- Der Raumwinkel  $\omega$ 
  - ist dimensionslos
  - hat die Einheit Steradian (sr)
- Der Vollraum entspricht der Kugeloberfläche  $4\pi r^2$ 
  - $\omega = 4\pi r^2 / r^2 = 4\pi \text{ sr} = 12.57 \text{ sr}$

## Lichtstärkeverteilungskurve LVK



Straßenleuchte



Spotleuchte

- Die Lichtstärke  $I$  einer Leuchte ist i.R. richtungsabhängig.
- Die Lichtstärkeverteilung gilt für eine punktförmige Quelle im Fernfeld.
- Die Lichtstärkeverteilung (LVK) beschreibt die geometrische Lichtverteilung der Leuchte unabhängig vom Abstand.
- In dem Polardiagramm einer LVK werden die Schnitte durch die Symmetrieachsen gezeichnet.
- LVK sind die Basisdaten für Lichtberechnungen
  - Europa = Eulumdat \*.ldt
  - USA = IES \*.ies

## Ursprung der Candela



### ■ Candela

- lateinisch für *Kerze*
- Maß für die Lichtstärke
- Einheit cd
- Eine der SI Basis Einheiten
- Realisierung als Hefnerkerze
- 1 Hefnerkerze = 0,908 cd
- Definition von 1890 bis 1948

*Sie ist definiert durch die Lichtstärke, die eine von dem Physiker Friedrich von Hefner-Alteneck entworfene Amylacetatlampe, die Hefnerlampe, bei 40 mm Flammenhöhe und 8 mm Dochtdurchmesser in horizontaler Richtung abstrahlt.*

Quelle: ptb | Herr Lindner; wikipedia

## Definition der Lichtstärke I [cd]



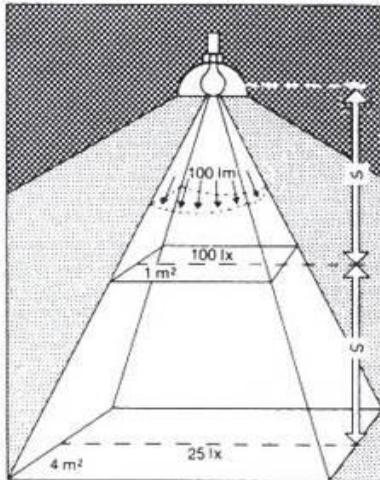
- Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung  $(1/683)$  Watt durch Steradian beträgt.
- Kennwerte
  - $540 \cdot 10^{12}$  Hz  $\approx$  555 nm
  - $V(555\text{nm}) \equiv 1$
  - Km  $\equiv$  683 lm/W

## Wie viel Licht trifft auf den Tisch?



- Angabe einer Lichtmenge bezogen auf eine Fläche.
- Bezugsgröße: Fläche
  - Fläche muss nicht eben sein. Üblich sind Ebene, (Halb-)Zylinder, Kugel
- Richtung: Normale der Fläche.
  - Achtung, die Lage der Fläche im Raum muss bekannt sein. Hier z.B. Tischhöhe und Richtung (horizontal)
- Zeichen E
- Bestrahlungsstärke [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- Beleuchtungsstärke [lux]

## Bestrahlungsstärke E

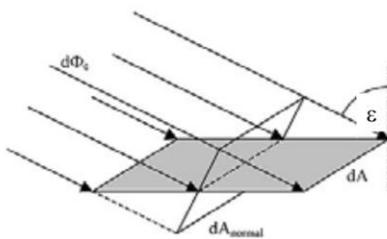


- Die Bestrahlungsstärke E beschreibt den Strahlungsfluss  $\Phi$  aus dem gesamten Raum durch eine bestimmte Fläche A

$$E = \frac{\Phi}{A} = \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

- Fläche ist zu definieren in
  - Größe
  - Form
  - Lage

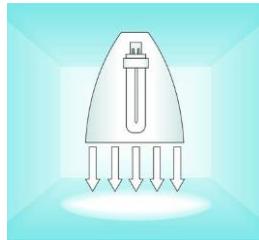
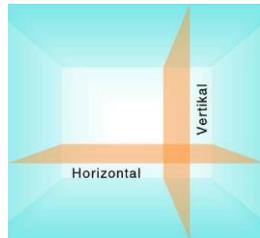
## Projizierte Fläche



- E ist die Lichtmenge welche auf eine Fläche A trifft.
- Die vom Licht „gesehene Fläche“  $A_{\text{Projiziert}}$  ist gleich der projizierten Fläche  $A \cdot \cos \varepsilon$
- $\varepsilon$  ist der Winkel zwischen der „Lichtrichtung“ und der Richtung der Fläche (Flächennormale)

$$A_{\text{projiziert}} = A \cdot \cos \varepsilon$$

## Bestrahlungsstärken Arten



- Eben
  - Gängige Fläche
  - Angabe der Ausrichtung mit Index H oder V
- (Halb-)Zylindrisch
  - Für Ausleuchtung von Objekten wichtig. (Museum)
  - Ausleuchtung von Gesichtern (Straße)
- (Halb-)Sphärische
  - Empfängerfläche = Kugel
  - Sonneneinstrahlung

## Wie hell ist der Monitor?



- Angabe der Lichtmenge von einem Flächenelement in Richtung der Betrachtung
- Bezugsgröße:
  - Größe der ausstrahlenden Fläche (z.B. Pixel)
  - und Raumwinkel der Betrachtungsrichtung
- Richtung relativ zur Quelle
- Größen
  - Strahlendichte [ $W/(m^2 \text{ sr})$ ]
  - Leuchtdichte [ $cd/m^2$ ]

## Optische Grundgrößen



<p><b>Wie viel Licht kommt aus der Leuchte?</b></p> <p>Angabe der gesamten Menge die durch eine Fläche tritt, ohne Angabe einer Richtung.</p> <p>Strahlungsfluss [W] Lichtstrom [lm]</p>	<p><b>Wie hell ist der Leuchtturm geradeaus?</b></p> <p>Angabe einer Lichtmenge aus einem Punkt in eine Raumrichtung.</p> <p>Strahlstärke [W/sr] Lichtstärke [cd]</p>	<p><b>Wie viel Licht trifft auf den Tisch?</b></p> <p>Angabe einer Lichtmenge bezogen auf eine Fläche.</p> <p>Bestrahlungsstärke [W/m<sup>2</sup>] Beleuchtungsstärke [lux]</p>	<p><b>Wie hell ist der Monitor?</b></p> <p>Angabe der Lichtmenge von einem Flächenelement in Richtung der Betrachtung.</p> <p>Strahlstärke [W/m<sup>2</sup> sr] Leuchtdichte [cd/m<sup>2</sup>]</p>
--	---	---	---

27 21.04.2016
Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen
Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Zusammenfassung | Visuell



28 21.04.2016
Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | 01 | Optische Grundgrößen
Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

## Optische Grundgrößen | Zusammenfassung

Bezug	Vollraum	Fläche	Raumwinkel	Raumwinkel und Fläche
Bezeichnung physikalisch	Strahlungsfluss	Bestrahlungsstärke	Strahlstärke	Strahldichte
Bezeichnung lichttechnisch	Lichtstrom	Beleuchtungsstärke	Lichtstärke	Leuchtdichte
Einheit	Lumen (lm)	Lux (lx)	Candela (cd)	Candela / m <sup>2</sup> (cd/m <sup>2</sup> )
Zeichen	$\Phi$	E	I	L
Formel	$\Phi = \iint I_e \cdot d\lambda \cdot dA = [W]$	$E = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos \varepsilon} = \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \left[ \frac{W}{sr} \right]$	$L = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos \varepsilon} = \left[ \frac{W}{sr \cdot m^2} \right]$

- Die optischen Grundgrößen sind bezogene Größen. Bei optischen Messungen wird somit immer eine Größe gemessen, die einen Mittelwert über der Bezugsgröße /-fläche des Empfängers darstellt.
- Bei quantitativen optischen Messungen muss daher immer die Bezugsgröße, d.h. das Empfängerfeld angegeben sein. Dies wird i.R. über allgemeine Definitionen oder die Messbedingungen bestimmt. (DIN, CIE, ...)

## Optische Grundgrößen

- Die optischen Grundgrößen sind bezogene Größen, d.h. die Angabe der Menge (Quantität) erfolgt immer spezifisch.
- Angaben wird daher immer nur der Mittelwert über die Bezugsgröße. Z.B. Bei einem Beleuchtungsstärkemessgerät ist der Messwert der Mittelwert über die Messfläche.
- Bei quantitativen optischen Messungen muss immer die Bezugsgröße klar definiert sein. In realen Messungen kann die Messgröße vom Messbereich abhängen, wenn der Messbereich nicht konstant ausgeleuchtet ist.
- Aus diesen Gründen hängt in der optischen Messtechnik in der Regel das Ergebnis von den verwendeten Geräten ab. Diese werden daher in der Regel in Messvorschrift mitbestimmt.

## Die Messmethode beeinflusst das Ergebnis!