

# Übersicht

## 1. Was ist Licht?

Photometrie  
Radiometrie  
Kohärenz

## 2. Erinnerung an die Elektrodynamik

Die Maxwell'schen Gleichungen  
Licht in Materie (Lorentz-Oszillator)

## 3. Wellenoptik

Reflexion und Brechung  
Dielektrische Schichtsysteme  
Doppelbrechung  
Beugung von Licht

## 4. Nahfeldoptik

## 5. Geometrische Optik

Linsen und deren Fehler  
Matrixoptik  
Optische Geräte  
Das Fermatsche Prinzip

## 6. Quantenoptik

Das Photon  
Das Plancksche Strahlungsgesetz  
Der LASER

## 7. Nichtlineare Optik

Die nichtlinear optischen Suszeptibilitäten  
Beispiele

1

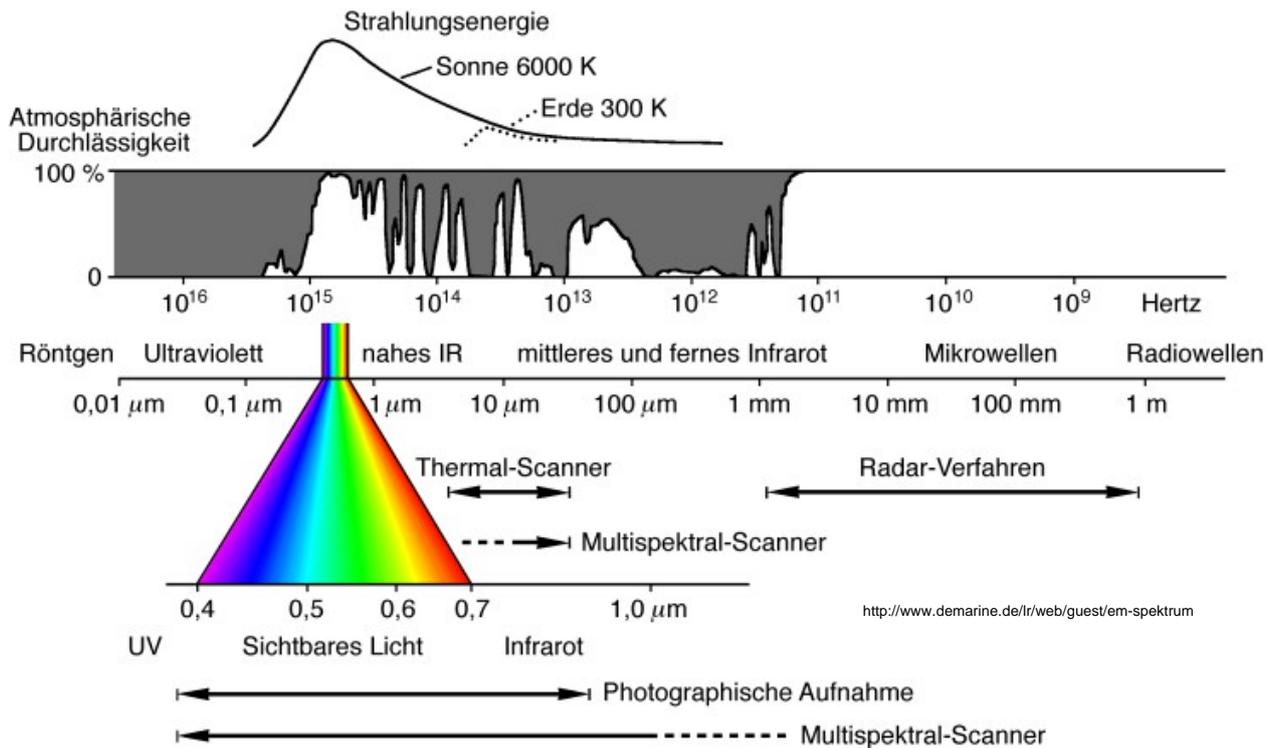
# Literatur

- E. Hecht:  
Optik (Addison-Wesley)  
[Ausgezeichnetes Buch \(ohne nichtlineare Optik\)](#)
- W. Demtröder:  
Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik (Springer)   
[Gutes, recht ausführliches Lehrbuch](#)
- D. Meschede:  
Gerthsen Physik (Springer)   
[Vollständig, aber knapp](#)
- D. Meschede:  
Optik, Licht und Laser (Vieweg+Teubner)   
[Kompakte Darstellung der klassischen und modernen Optik](#)
- Klaus Lüders und Robert O. Pohl (Hrsg.):  
Pohls Einführung in die Physik Elektrizitätslehre und Optik (Springer)   
[Ausführliche Beschreibung von klassischen Experimenten und Geräten](#)

Verwendete Abbildungen werden zitiert als:  
Hecht, Demtröder, Gerthsen, Meschede, Pohl

2

# Elektromagnetisches Spektrum



3

## Was ist Licht?

- Licht kann sowohl klassisch als elektromagnetische Welle oder quantenmechanisch als Teilchen (Photonen) mit Energie, Impuls und Drehimpuls beschrieben werden (Welle-Teilchen-Dualität).
- Lichtwellen sind transversale Wellen, die eine Polarisationsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufweisen können.
- Lichtausbreitung ist nicht an Materie gebunden.
- Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig vom Bezugssystem.
- Man muss unterscheiden, ob eine Lichtquelle hell ist (physikalische Größe) oder uns hell erscheint (physiologische Größe).

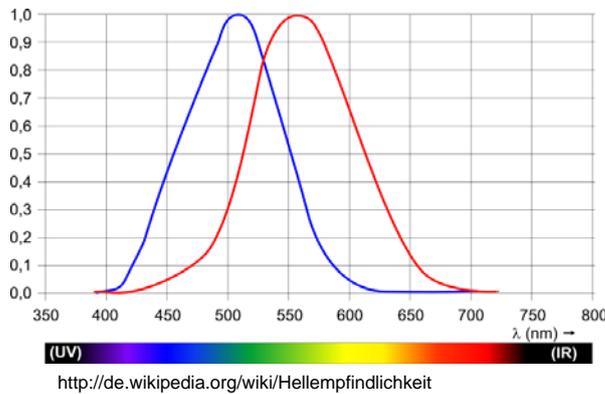


4

# Photometrie

Die **Radiometrie** ist die Lehre von der Messung der elektromagnetischen Strahlung.

Die **Photometrie** ist die messtechnische Lehre des sichtbaren Lichts. Darin werden sowohl rein physikalische Aspekte als auch die Physiologie des Sehens berücksichtigt, da das Auge eine frequenz- und intensitätsabhängige Empfindlichkeit hat.



Spektraler Empfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  des menschlichen Auges:

**rot** (Tagsehen, Zapfen),  
**blau** (Nachtsehen, Stäbchen)

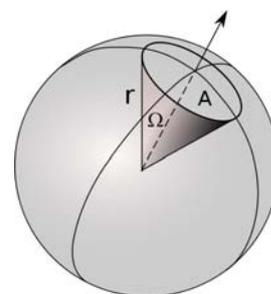
# Basiseinheit Lichtstärke

Eine Lichtquelle hat in einer gegebenen Raumrichtung die **Lichtstärke 1 Candela**, wenn sie auf einem Sensor mit der genormten spektralen Empfindlichkeit  $V(\lambda)$  des menschlichen Auges dasselbe Signal erzeugt wie monochromatisches Licht der Frequenz 540 THz ( $\lambda \cong 555 \text{ nm}$ ) und **Strahlungsstärke 1/683 W pro Steradian**.

Lichtstärke ist eine Eigenschaft der Quelle und damit abstandsunabhängig.

Typische Lichtstärke einer Kerze:  $I_v \approx 1 \text{ cd}$

	Lichtstärke $I_v$	Strahlungsstärke $I$
$\lambda = 555 \text{ nm}$	1 cd	$\frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}$
$\lambda = 750 \text{ nm}$	1 cd	$10 \frac{\text{W}}{\text{sr}}$



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

## Zusammenhang

$$I_v = K_m \int V(\lambda) \frac{\partial I(\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda \quad ; \quad K_m = 683 \frac{\text{cd sr}}{\text{W}}$$

## Lichtstrom

$$\Phi_v = I_v \cdot \Omega \quad \text{bzw.} \quad I_v = \frac{\partial \Phi_v}{\partial \Omega} \quad \text{Einheit : } \text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr} \quad (\text{Lumen})$$

(die entsprechende radiologische Größe ist Strahlungsleistung [W])

12.57 lm entspricht dem Lichtstrom, den eine punktförmige Lichtquelle der Lichtstärke 1 cd isotrop in alle Richtungen aussendet.

	Elektr. Leistung W	Lichtstrom $\Phi_v$ lm	Lichtausbeute lm/W
Halogenlampe	20	350	17.5
Leuchtstofflampe	30	1500	50
LED (2700 K)	20	1600	80
Natriumdampflampe	80	14000	175
Weißes Licht (5800 K) Theoret. Maximum			251

(Wikipedia)

7

## Beleuchtungsstärke

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad \text{bzw.} \quad E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad \text{Einheit : } \text{lx} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \quad (\text{Lux})$$

	$E_v$ / lx
Heller Sonnentag, in der Sonne	100000
Heller Sonnentag, im Schatten	10000
Bürobeleuchtung	500
Wohnzimmer	50
Straßenbeleuchtung	10
Kerze, 1m entfernt	1
Vollmond (im Zenit)	0.3
Sternklarer Nachthimmel (Neumond)	0.001

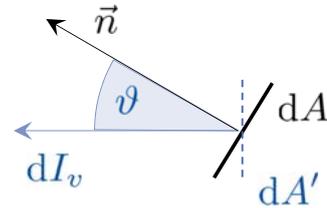
(Wikipedia)

8

## Leuchtdichte

Lichtstärke einer Quelle (Selbstleuchter oder beleuchtete Fläche), bezogen auf deren projizierte Fläche (senkrecht zur Betrachtungsrichtung); diese Größe nimmt der Mensch als Helligkeit einer Fläche wahr.

$$L_v(\vartheta) = \frac{1}{\cos \vartheta} \frac{dI_v}{dA}$$



Hierin ist  $\vartheta$  der Winkel zwischen Ausstrahlrichtung und Flächennormale.

	$L_v$ in $\text{cd}/\text{m}^2$
Sonnenscheibe	$1.6 \cdot 10^9$
Klarer Himmel	8000
Mondoberfläche	2500
Sternklarer Nachthimmel	0.001

	$L_v$ in $\text{cd}/\text{m}^2$
Xe-Lampe	$5 \cdot 10^9$
Draht einer Halogenlampe	$20 \cdot 10^6$
LCD-Monitor	150 ... 500
Sehschwelle	ca. $3 \cdot 10^{-6}$

(Wikipedia)

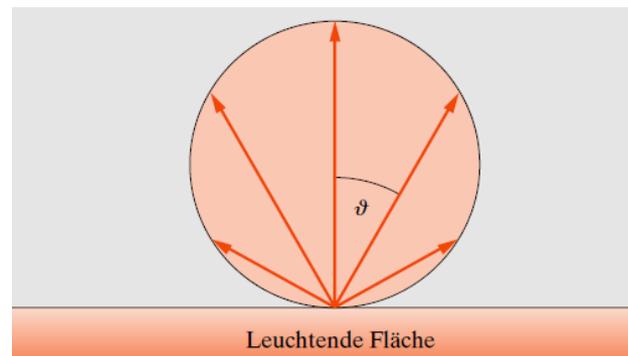
9

## Lambertsches Gesetz

Leuchtende Flächen mit der Eigenschaft

$$I_v = I_0 \cos \vartheta$$

erzeugen in alle Richtungen die gleiche Leuchtdichte  $L_v$ . Solche Lichtquellen werden als **Lambert-Strahler** bezeichnet.



(Gerthsen, Abb. 12-8)

10

# Radiometrie

## Energieflussdichte

Die Energieflussdichte einer elektromagnetischen Welle mit Wellenvektor  $\vec{k}$  ist gegeben durch den Poynting-Vektor

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad ; \quad [S] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Bei ebenen Wellen im Vakuum gilt

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_0 \quad \text{mit Vakuumimpedanz } Z_0 = 376 \Omega$$

und demzufolge

$$|\vec{S}| = \frac{1}{Z_0} |\vec{E}|^2 \quad ; \quad \vec{S} \parallel \vec{k}$$

Oszilliert  $\vec{E}$  mit der Frequenz  $\omega$  so oszilliert auch  $\vec{S}$ . Mittelt man über die Periodendauer  $T$  der Oszillation spricht man von der **Intensität**  $I$  des Lichts.

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle_T$$

11

## Superpositionsprinzip

Lichtwellen werden beschrieben durch eine homogene, lineare partielle Differentialgleichung 2. Ordnung (vgl. Kap. 2). Daher gilt für die Überlagerung der **elektrischen Felder** zweier Wellen

$$\vec{E}_{\text{ges}}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t)$$

## Interferenz

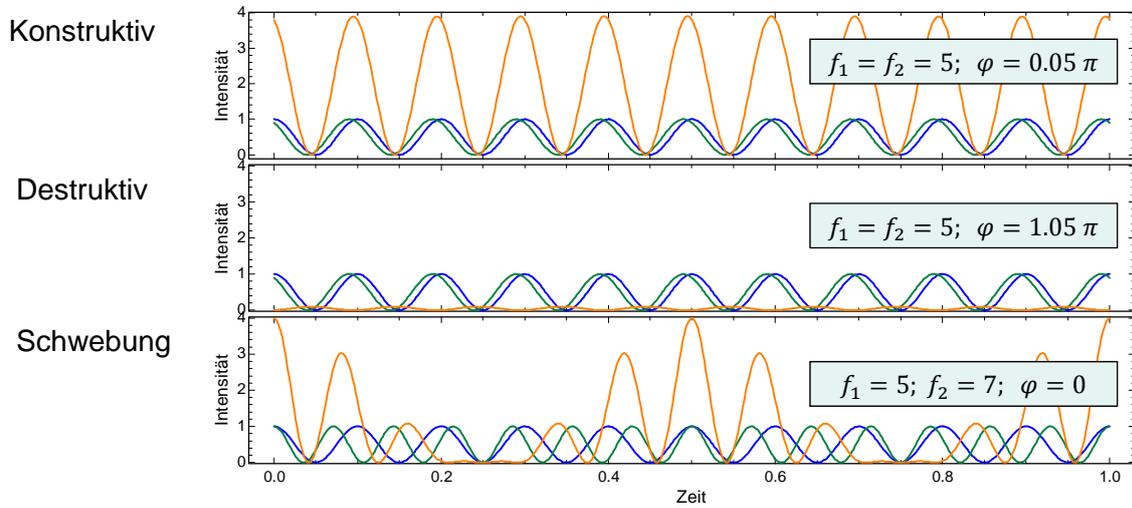
Optische Interferenz ist die Überlagerung zweier (oder mehrerer) Lichtwellen, für deren resultierende Intensität gilt

$$\begin{aligned} I_{\text{ges}}(\vec{r}, t) &= I_1(\vec{r}, t) + I_2(\vec{r}, t) + \frac{2}{Z_0} \langle \vec{E}_1(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}_2(\vec{r}, t) \rangle_T \\ &\neq I_1(\vec{r}, t) + I_2(\vec{r}, t) \end{aligned}$$

12

## Beispiel

$$\left. \begin{aligned} E_1(t) &= E_0 \cos(2\pi f_1 \cdot t) \\ E_2(t) &= E_0 \cos(2\pi f_2 \cdot t + \varphi) \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_{\text{ges}}(t) = \{E_1(t) + E_2(t)\}^2$$



13

## Zeitlicher Mittelwert der Schwebung

$$\begin{aligned} \langle (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^2 \rangle_T &= \langle \cos^2 \omega_1 t \rangle_T + \langle \cos^2 \omega_2 t \rangle_T + \langle 2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t \rangle_T \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \langle \cos(\omega_1 t - \omega_2 t) \rangle_T + \langle \cos(\omega_1 t + \omega_2 t) \rangle_T \\ &= 1 + \begin{cases} 0 & \omega_1 \neq \omega_2 \\ 1 & \omega_1 = \omega_2 \end{cases} \end{aligned}$$

14

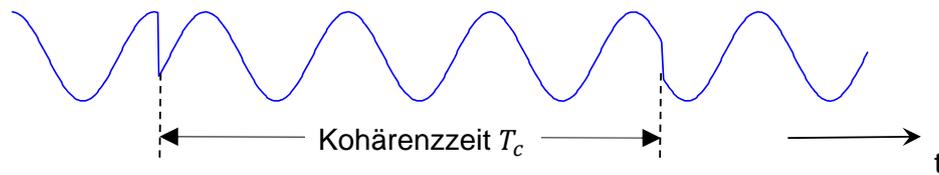
## Kohärenz

Lichtwellen sind kohärent, wenn bei ihrer Überlagerung eine **stationäre Interferenz** erzeugt wird. Dies ist der Fall, wenn die Zeitabhängigkeit ihrer elektrischen Felder bis auf eine konstante Phasenverschiebung gleich ist.

$$E_2(t) = \text{const} \cdot E_1(t + \tau)$$

Das gelingt für Lichtwellen in der Regel nur, wenn das Licht aus derselben Quelle stammt.

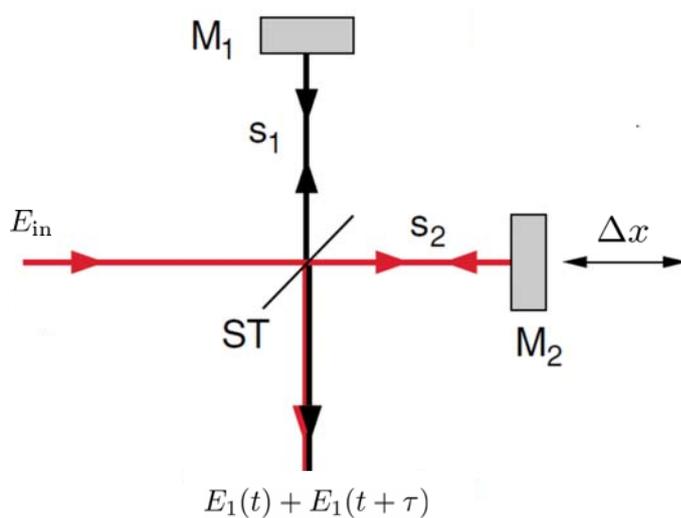
*Grund:* nicht kontrollierbare Phasensprünge (z.B. durch Stöße). Lichtquellen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer **Kohärenzzeit**  $T_c$  bzw. **Kohärenzlänge**  $L_c$ .



Kohärenzlänge  $L_c = c_0 \cdot T_c$  mit Lichtgeschwindigkeit  $c_0$

15

## Michelson-Interferometer



$M_1, M_2$  Spiegel  
 $ST$  Strahlteiler  
 $s_1, s_2$  Strahlwege

$$s_2 = s_1 + \Delta x$$

$$\tau = \frac{2\Delta x}{c_0}$$

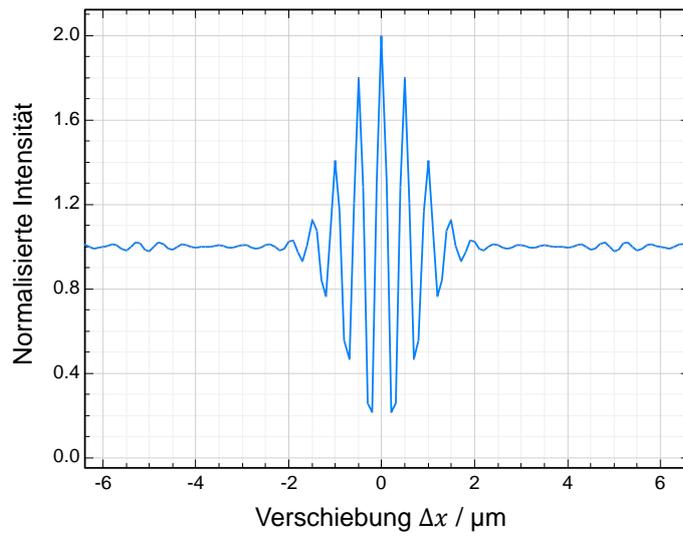
Der Detektor misst

$$I(t) \propto 2 \langle E_1^2(t) \rangle_T + \langle E_1(t) \cdot E_1(t + \tau) \rangle_T$$

(nach Demtröder)

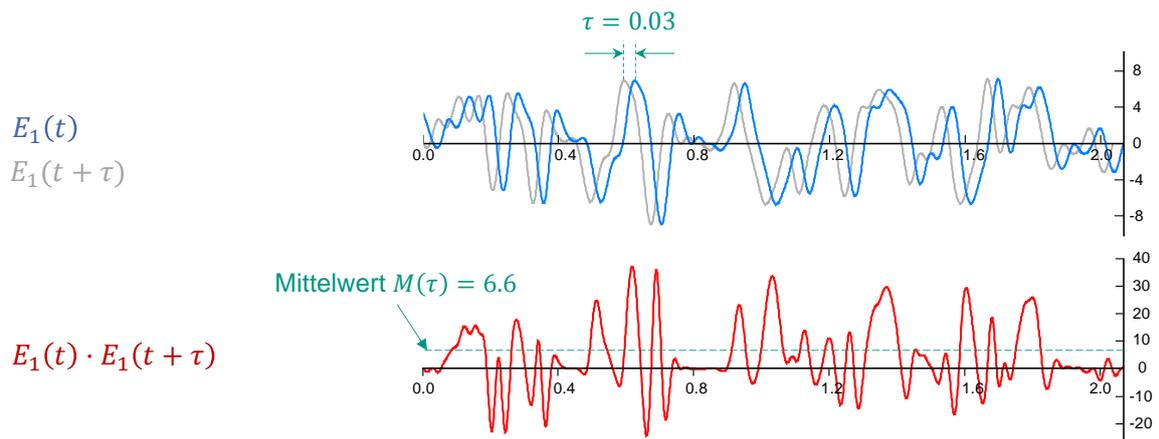
16

# Weißlicht-Interferogramm



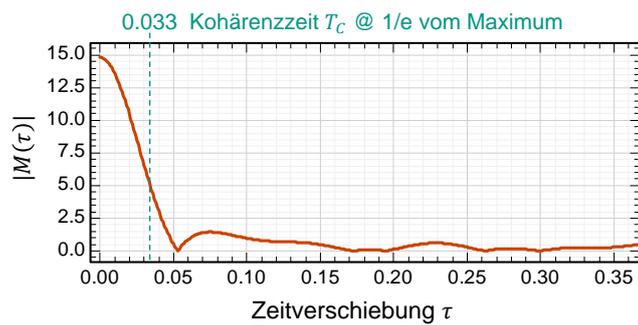
17

# Veranschaulichung



$$M(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T E_1(t) E_1(t + \tau) dt$$

(„Autokorrelationsfunktion“)



18