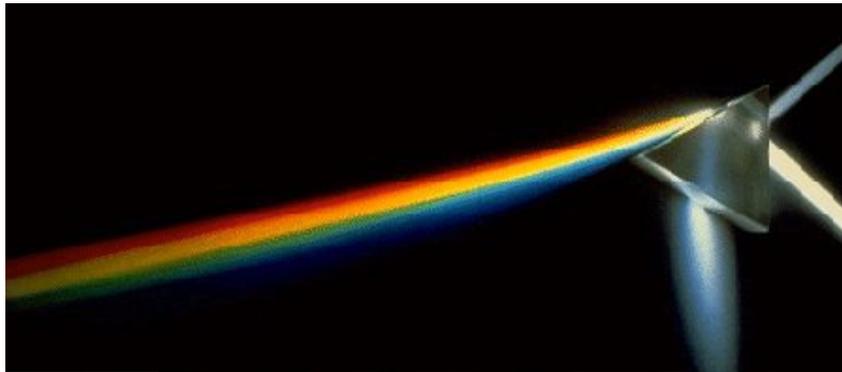


# Vom Sehstrahl zum Photon

Die "Natur des Lichtes"  
im Wandel von zwei Jahrtausenden

Manfred Sigrist, *Institut für Theoretische Physik*

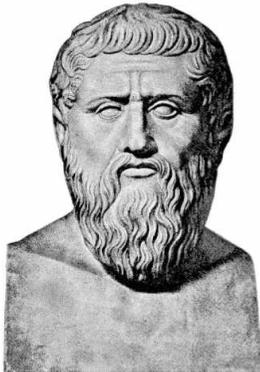
*ETH Zürich*



# Was ist Licht ?

Antike

*Empedokles* (490-430 v. Chr.), *Platon* (428-348 v. Chr.)



Licht

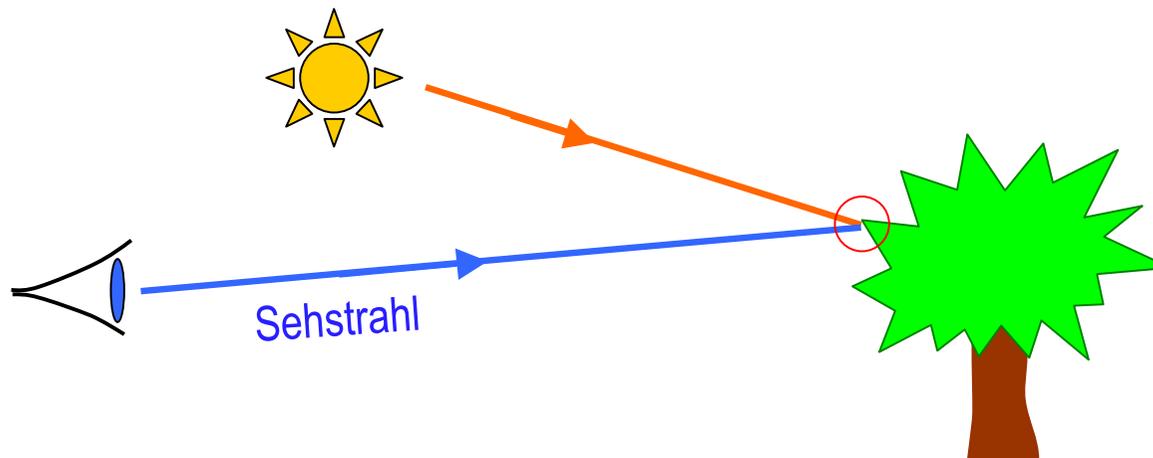


Sehen

Licht auf Objekt



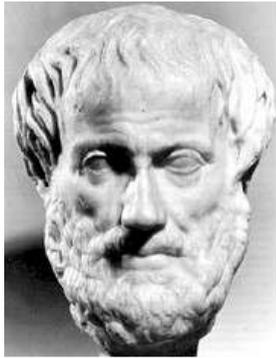
"Sehstrahl" des Auges



# Was ist Licht ?

Antike

*Aristoteles* (384 - 322 v.Chr.)

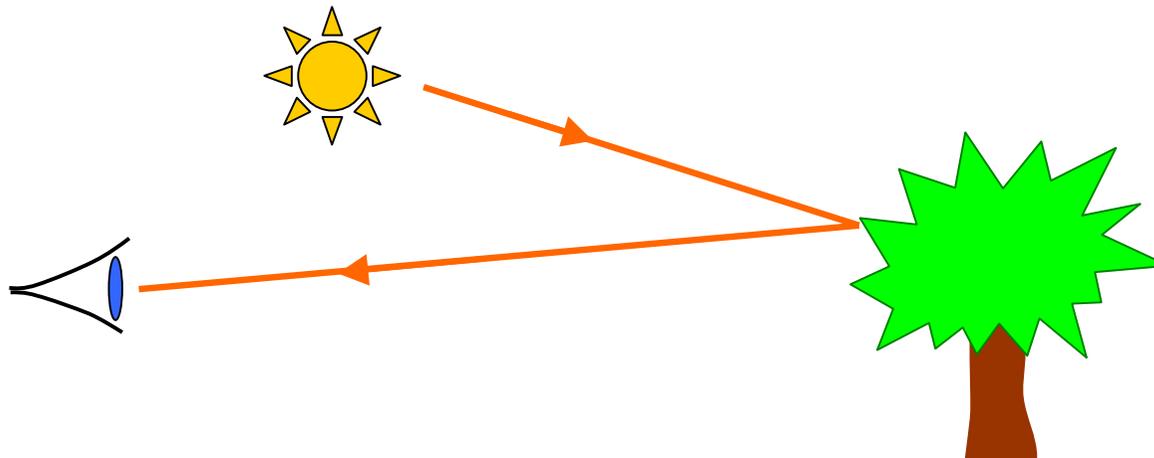


Licht



Sehen

Auge erfasst vom Objekt reflektiertes Licht



*Euklid* (325 - 265 v.Chr.)

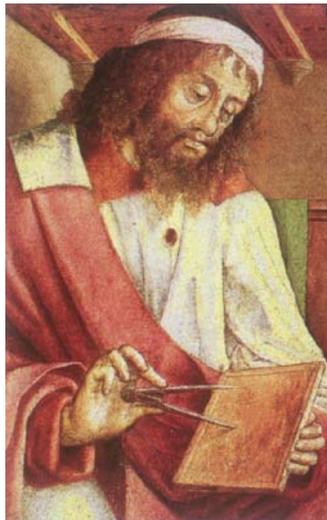
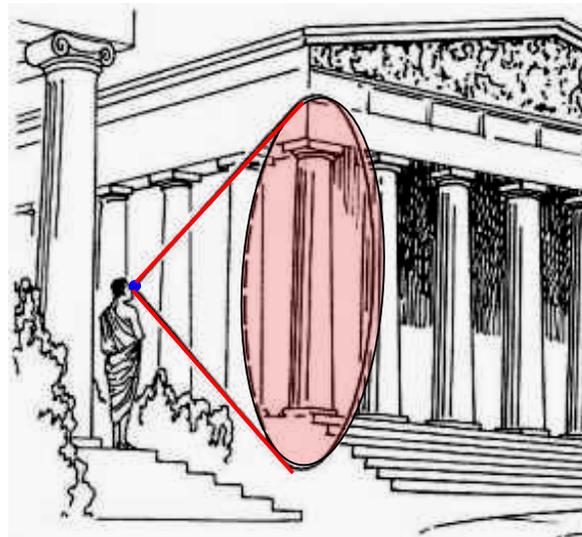


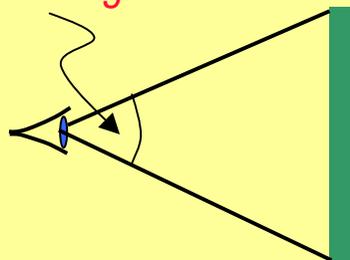
Bild des Lichtes: Sehstrahl *geradlinig* (Geometrie)



Sicht als Kegel:

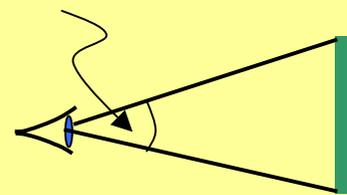
- Spitze beim Auge
- Grundfläche als Gesehenes
- gesehene Grösse ↔ Winkel

*Winkel gross*



Objekt  
erscheint  
gross

*Winkel klein*



Objekt  
erscheint  
klein

*Euklid* (325 - 265 v.Chr.)

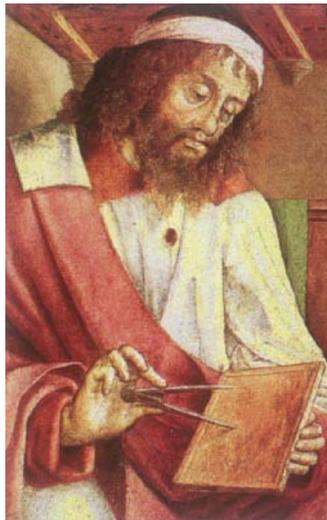
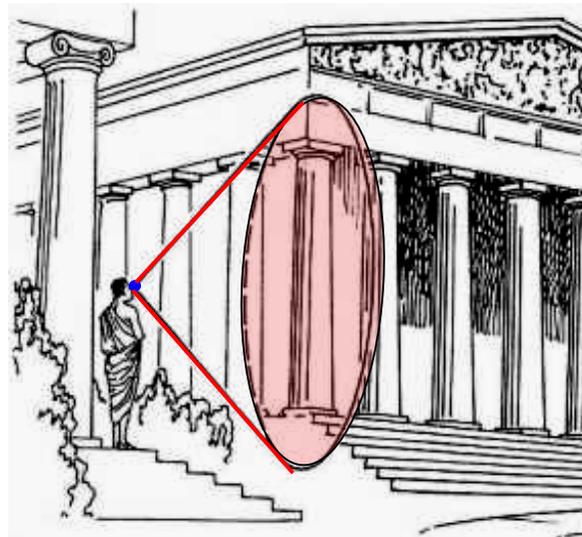


Bild des Lichtes: Sehstrahl *geradlinig* (Geometrie)

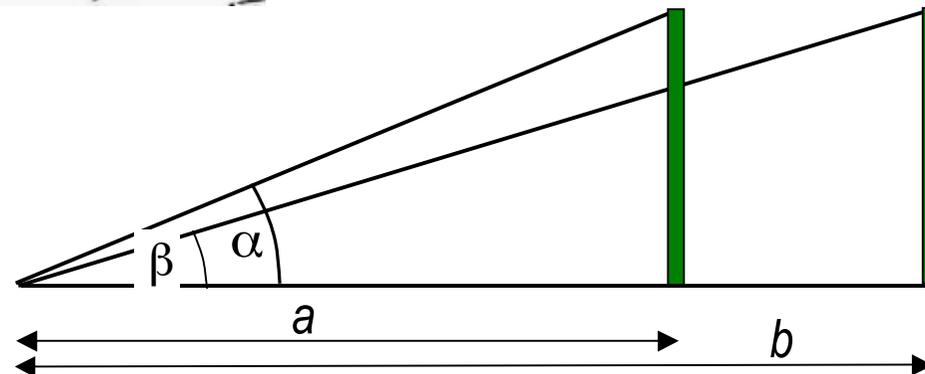


Sicht als Kegel:

- Spitze beim Auge
- Grundfläche als Gesehenes
- gesehene Grösse  $\leftrightarrow$  Winkel

Aussage:

Die gesehene Grösse von gleichen, parallele Objekten ist nicht proportional zu deren Distanzen



*Euklid* (325 - 265 v.Chr.)

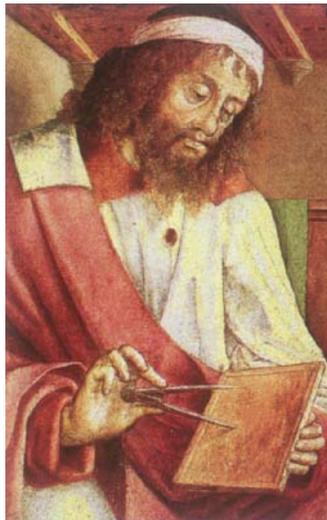
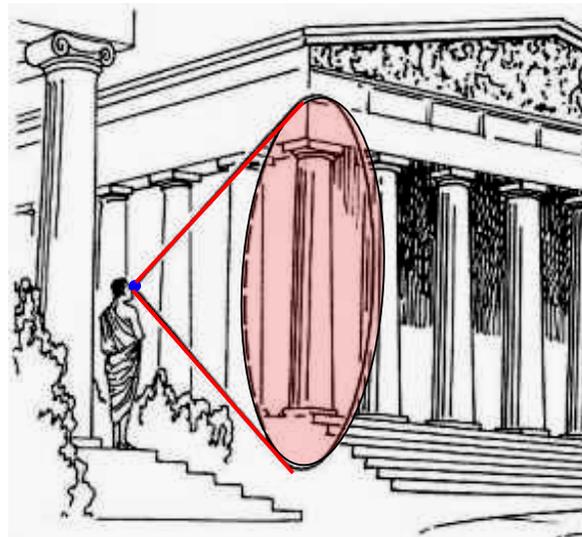


Bild des Lichtes: Sehstrahl *geradlinig* (Geometrie)

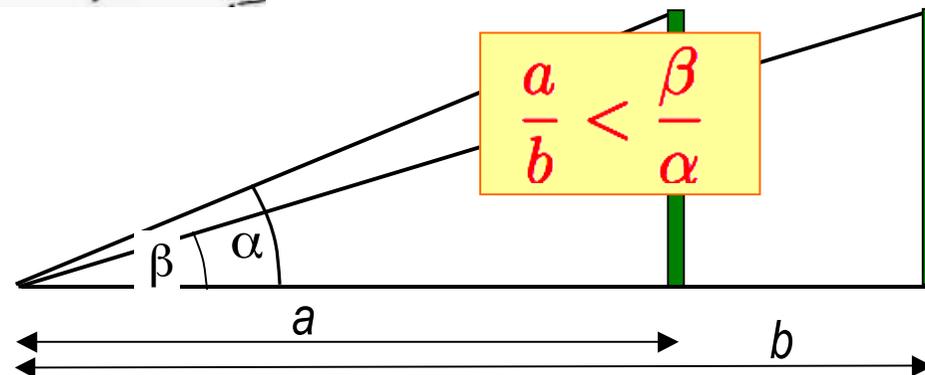


Sicht als Kegel:

- Spitze beim Auge
- Grundfläche als Gesehenes
- gesehene Grösse ↔ Winkel

Aussage:

Die gesehene Grösse von gleichen, parallele Objekten ist nicht proportional zu deren Distanzen



*Heron von Alexandrien* (10 - 70 n. Chr.)

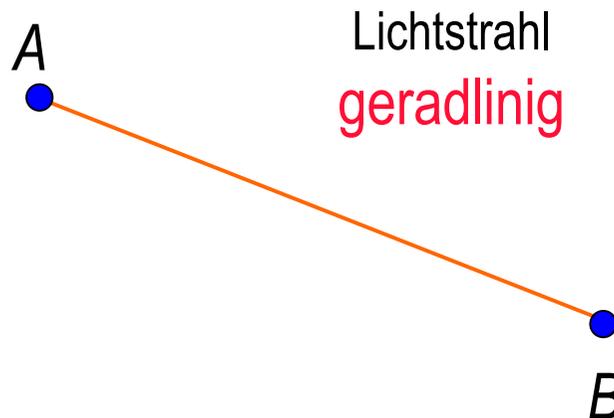


Erfinder der  
Dampfmaschine



Prinzip von Heron:

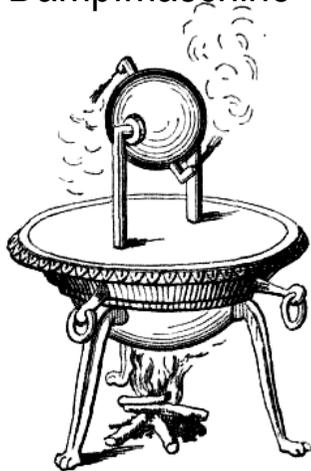
Lichtstrahl verbindet zwei Punkte auf der kürzesten Strecke



*Heron von Alexandrien* (10 - 70 n. Chr.)



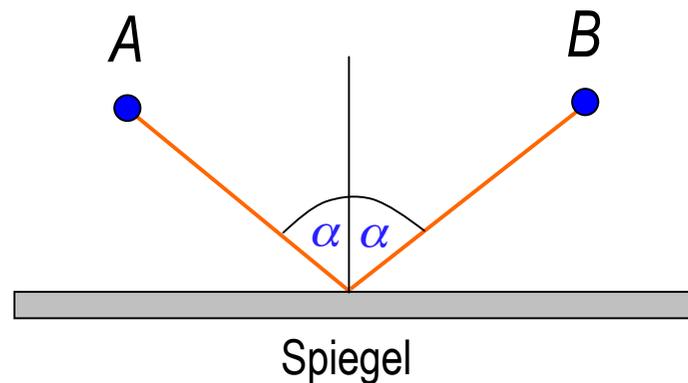
Erfinder der  
Dampfmaschine



Prinzip von Heron:

Lichtstrahl verbindet zwei Punkte auf der kürzesten Strecke

Reflexion



kürzeste Verbindung mit Reflexion

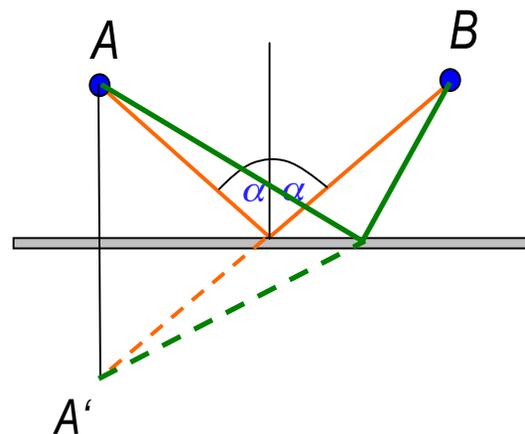
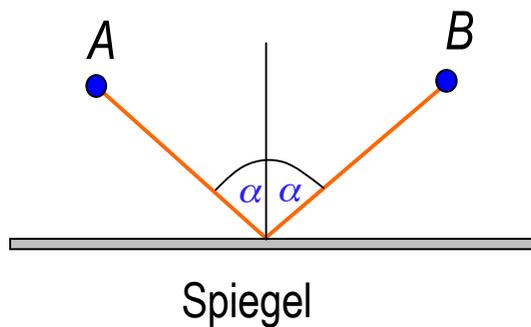
*Heron von Alexandrien* (10 - 70 n. Chr.)



## Prinzip von Heron:

Lichtstrahl verbindet zwei Punkte auf der kürzesten Strecke

## Reflexion



kürzeste Verbindung

längere Verbindung

# Was ist Licht ?

# Brechung

# Antike

*Claudius Ptolemäus* (87-150 n. Chr.):

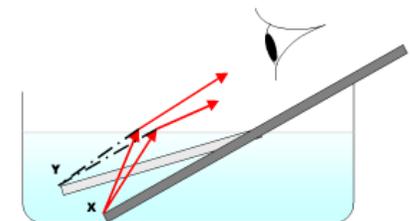
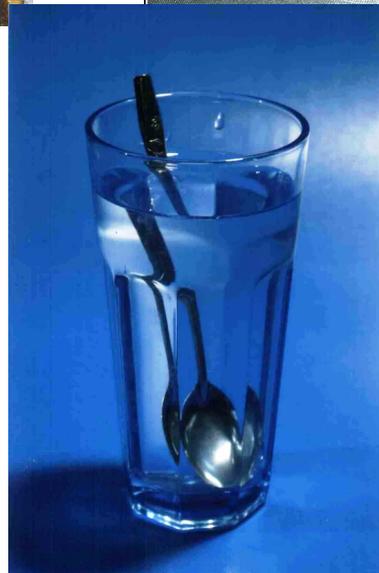


Glas ohne Wasser



Experimente  
mit  
Lichtbrechung

Glas mit Wasser



# Was ist Licht ?

# Brechung

# Antike

*Claudius Ptolemäus* (87-150 n. Chr.):

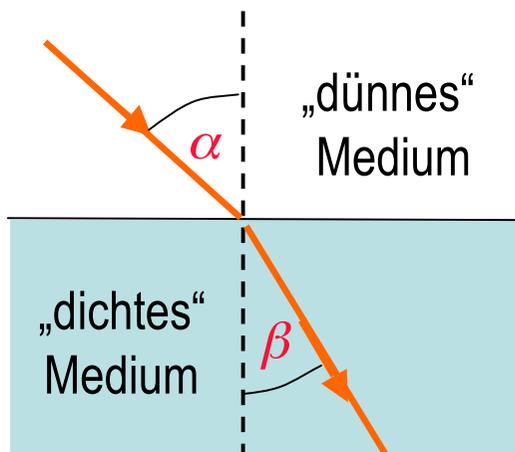


Glas ohne Wasser



Experimente  
mit  
Lichtbrechung

Glas mit Wasser



Resultat von Ptolomäus

$$\beta = n\alpha + m\alpha^2$$

$n, m$  von Medien abhängig

*nicht  
ganz  
korrekt!*

# Was ist Licht ?

# Brechung

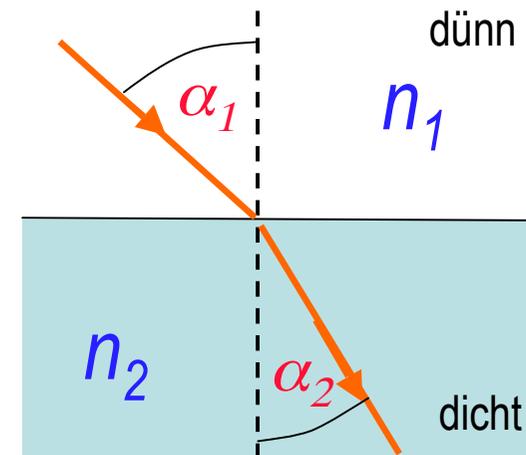
Ptolomäus & Alhazen: erste quantitative Aussagen zur Brechung

Willebrord Snellius (1580-1626)



$n_1, n_2$   
Brechungsindex  
des Mediums

dünn      dicht  
 $n_1 < n_2$



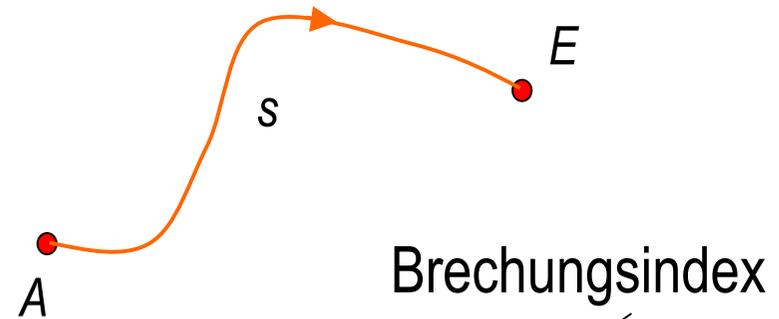
Snellius-Gesetz

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

*Herons Prinzip:* Lichtstrahlen bewegen sich auf dem kürzesten Weg

*Fermats Prinzip:* Verallgemeinerung

Pierre de Fermat (1601 - 1665)



optische Weglänge

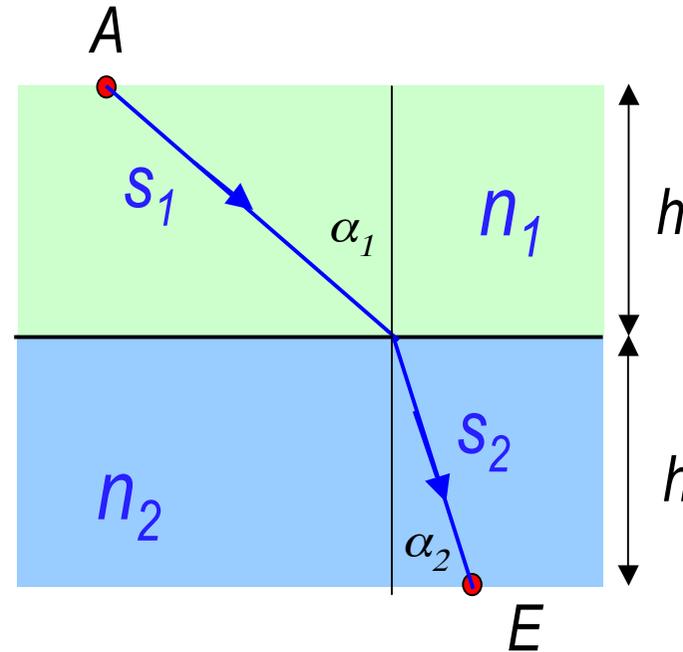
$$L(A, E) = \int_A^E n(s) ds$$

*Prinzip:* Lichtstrahl bewegt sich entlang der kürzesten Weglänge

*Herons Prinzip:* Lichtstrahlen bewegen sich auf dem kürzesten Weg

*Fermats Prinzip:*

Pierre de Fermat (1601 - 1665)



$$L(A,E) = s_1 n_1 + s_2 n_2$$

→  
kürzester  
Weg

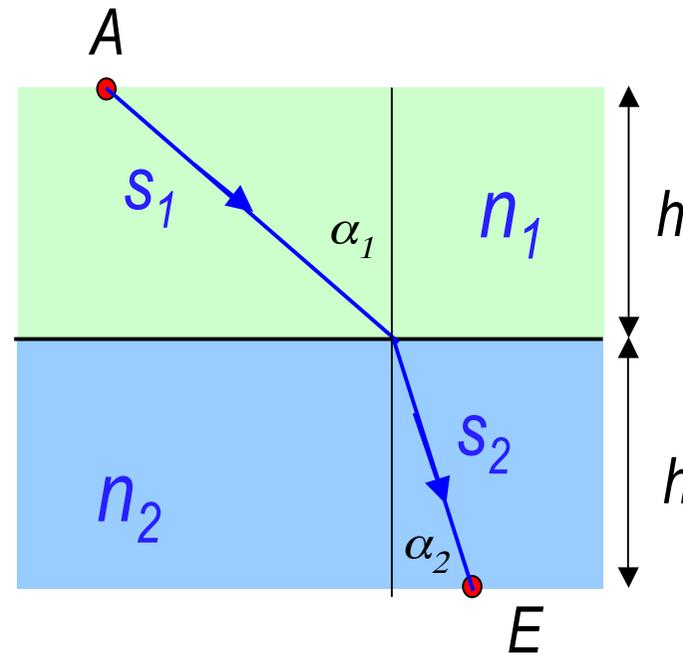
$$n_1 \frac{\sqrt{s_1^2 - h^2}}{s_1} = n_2 \frac{\sqrt{s_2^2 - h^2}}{s_2}$$

Snellius-Gesetz

*Herons Prinzip:* Lichtstrahlen bewegen sich auf dem kürzesten Weg

*Fermats Prinzip:*

Pierre de Fermat (1601 - 1665)



$$L(A,E) = s_1 n_1 + s_2 n_2$$

→  
kürzester  
Weg

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Snellius-Gesetz

Fermat-Prinzip: kürzeste optische Weglänge

optische Weglänge

$$L(A, E) = \int_A^E n(s) ds$$

Brechungsindex



Strahl krümmt sich  
in Richtung des  
dichteren Mediums

$$n_{\text{dünn}} < n_{\text{dicht}}$$

Fermat-Prinzip: kürzeste optische Weglänge

optische Weglänge

$$L(A, E) = \int_A^E n(s) ds$$

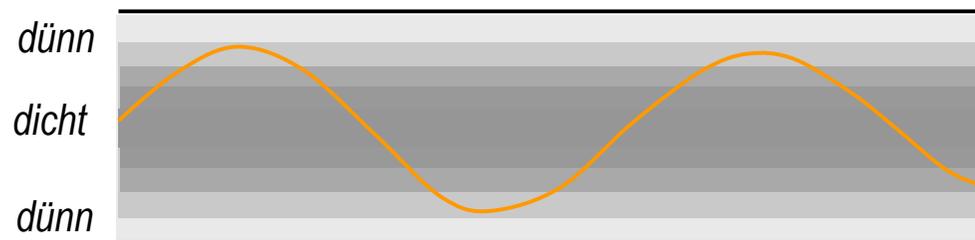
Brechungsindex



Strahl krümmt sich  
in Richtung des  
dichteren Mediums

$$n_{\text{dünn}} < n_{\text{dicht}}$$

Optisches Faserkabel



Strahl bleibt in Glasfaser

Fermat-Prinzip: kürzeste optische Weglänge

optische Weglänge

$$L(A, E) = \int_A^E n(s) ds$$

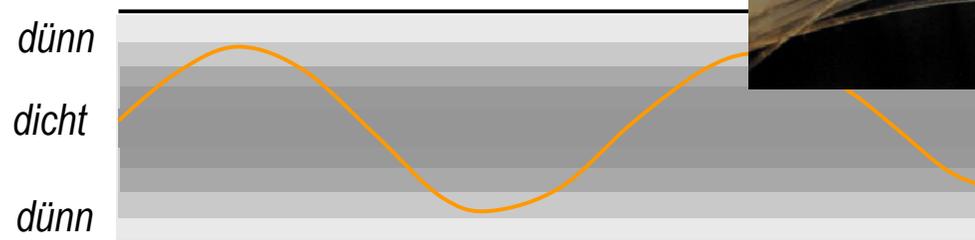
Brechungsindex



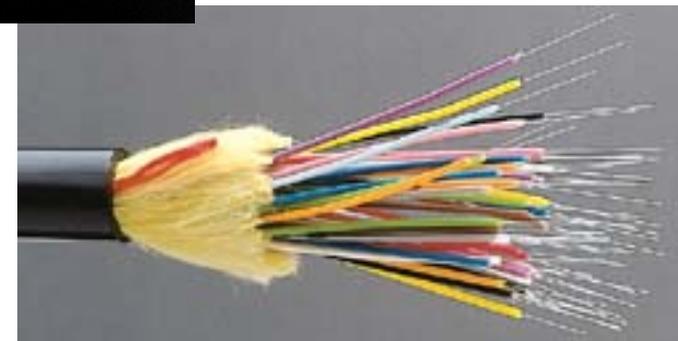
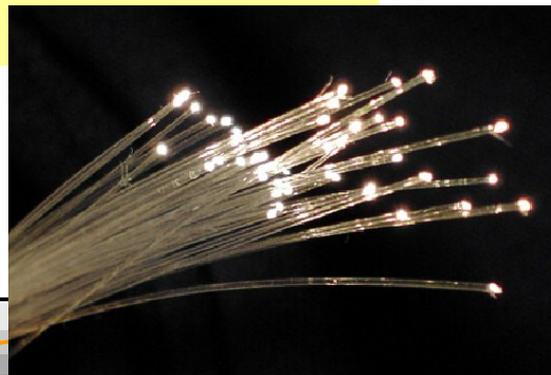
Strahl krümmt sich  
in Richtung des  
dichteren Mediums

$$n_{\text{dünn}} < n_{\text{dicht}}$$

Optisches Faserkabel



Strahl bleibt in Glasfaser



# Was ist Licht ?      Regenbogen

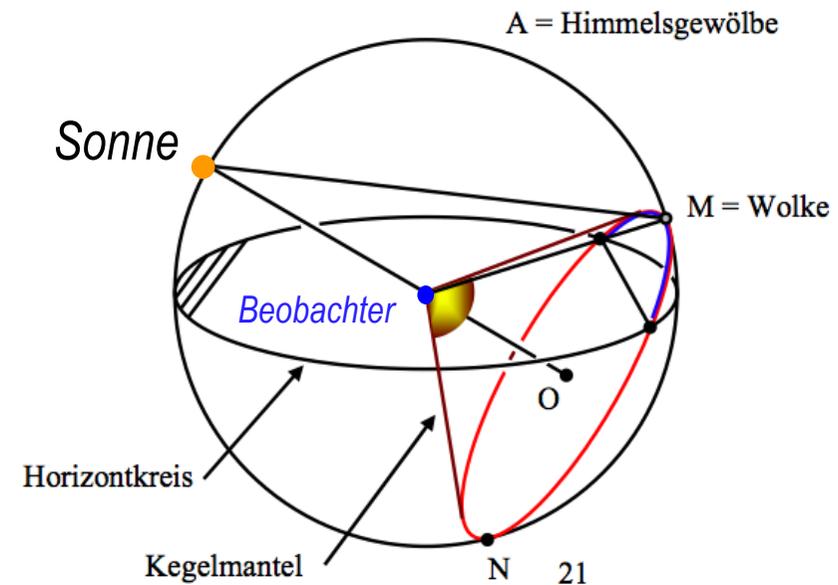
## Optisches Phänomen



## Aristoteles:

Regenbogen als Phänomen der Reflexion des Sonnenlichtes an den Wolken

geometrisch: Regenbogen als Kreis als Berandung einer Kegelfläche



# Was ist Licht ?      Regenbogen

korrekte Erklärung aufbauend auf Alhazen:

*Kamāl al-Dīn al-Fārisī (1267-1320)*

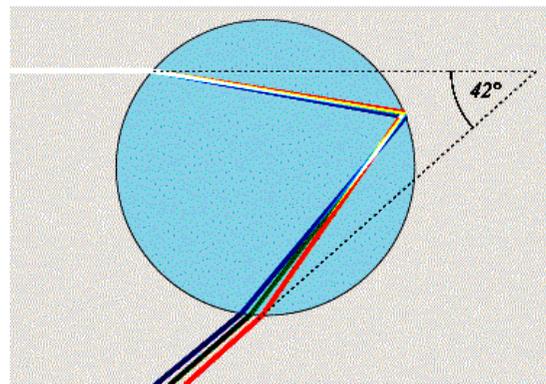
*Theodoric von Freiberg (1250-1310)*

Geometrische Eigenschaften:

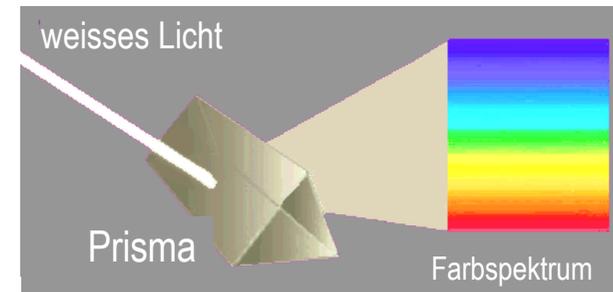
- Rolle der einzelnen Wassertropfen
- zwei Regenbogen



primärer Regenbogen

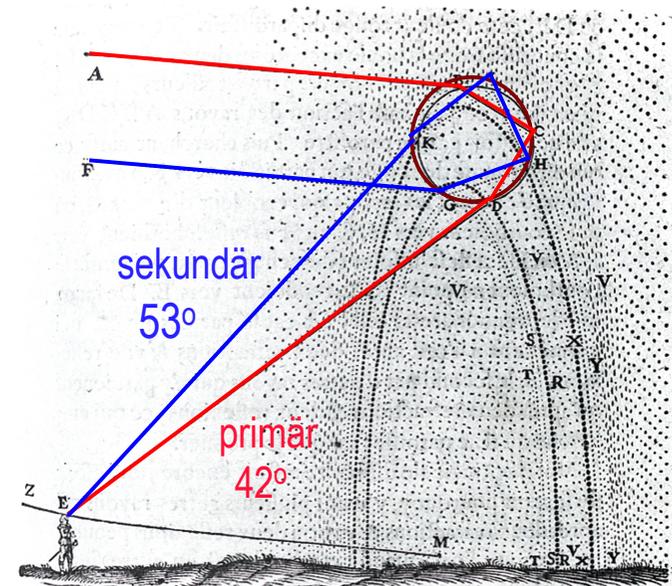


weiss ↔ Farbspektrum



*Isaak Newton (1643-1727)*

*Rene Descartes (1596-1650)*

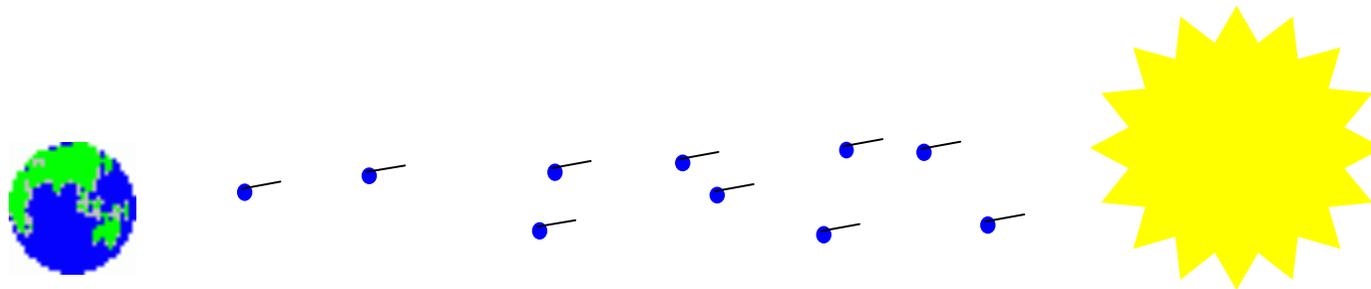




*Lukrez* (99-55 v. Chr.) Atomist ("Schüler" von Demokrit)

## Natur des Lichtes

*Licht und Wärme der Sonne bestehen aus kleinen Teilchen, die sich mit "unendlicher" Geschwindigkeit von der Quelle weg durch den Raum bewegen.*





*Lukrez* (99-55 v. Chr.) Atomist ("Schüler" von Demokrit)

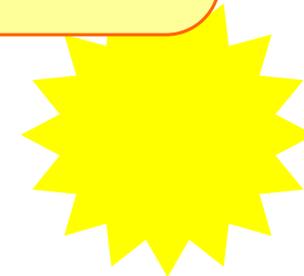
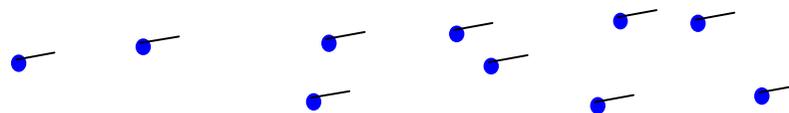
## Natur des Lichtes

*Licht und Wärme* der Sonne bestehen aus *kleinen Teilchen*, die sich mit "unendlicher" Geschwindigkeit von der Quelle weg

Licht als

Teilchen

Energieträger



# Was ist Licht ?

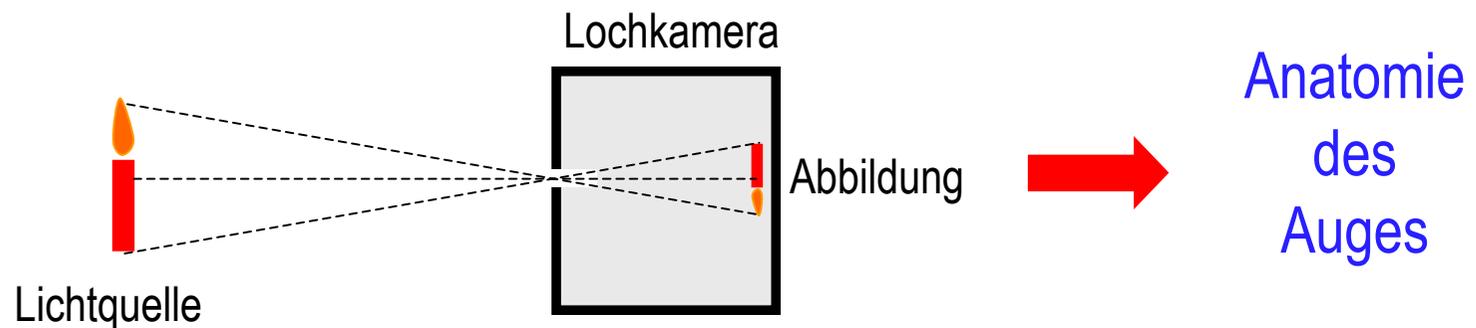


Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Halham

## *Alhazen* (965-1040): Optische Experimente

- Licht bewegt sich entlang geraden Linien
- Lichtstrahlen beeinflussen sich gegenseitig nicht
- Licht breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit aus
- Licht bewegt sich in dichteren Medien langsamer

## Experimente mit Lochkamera (Auge):



# Was ist Licht ?



Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Halham

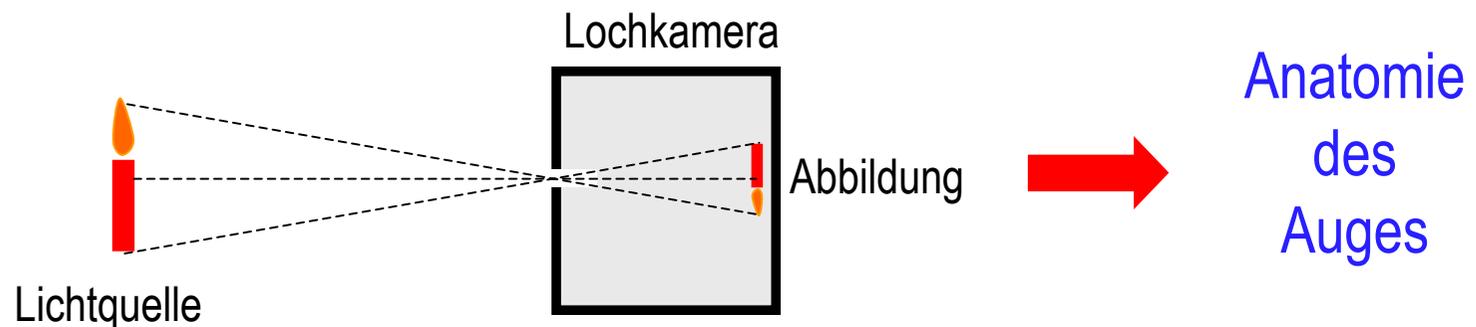
## *Alhazen* (965-1040): Optische Experimente

- Licht bewegt sich entlang geraden Linien
- Lichtstrahlen beeinflussen sich gegenseitig nicht
- Licht breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit aus

Natur des Lichtes: **Teilchen**

langsamer

## Experimente mit Lochkamera (Auge):



# Was ist Licht ?

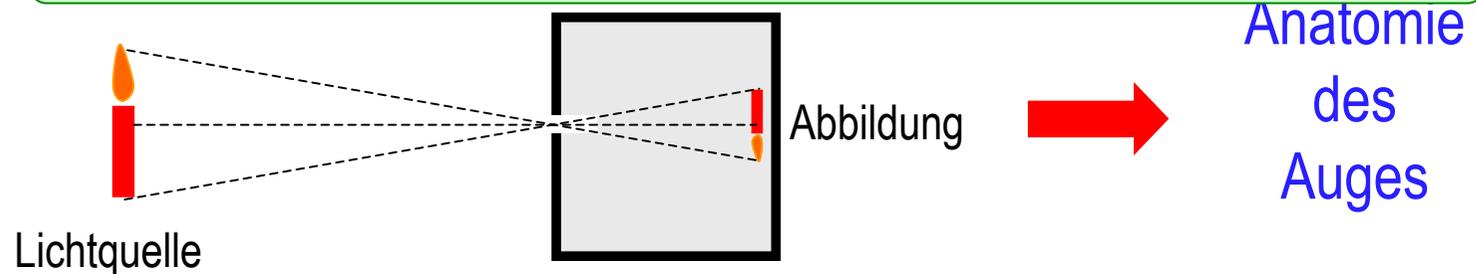


Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Halham

## *Alhazen* (965-1040): Optische Experimente

- Licht bewegt sich entlang geraden Linien
- Lichtstrahlen beeinflussen sich gegenseitig nicht
- Licht breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit aus
- Licht bewegt sich in dichteren Medien langsamer

Experimente Naturwissenschaft: *Erkenntnis aus Experimenten*



# Was ist Licht ?



Abu Ali al-Hasan Ibn al-Haytham

Weitreichender Einfluss auf alle Bereiche der Optik und des Verständnisses des Lichtes auch in Europa

13. Jhr.: R. Grosseteste, R. Bacon

Studien zu Linsen und Vergrößerungsgläser, Eigenschaften von Reflexion

*Erfindung der Brille:*

Salvino D'Armato (ca. 1284)

Älteste Abbildung einer Brille:  
da Modenas Portrait von  
Kardinal Hugh de Provence  
(1352)



Experiment

Lichtquelle

Auges

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Licht als Teilchen:

Lukrez, Alhazen, ...

*Isaak Newton (1643-1727)*



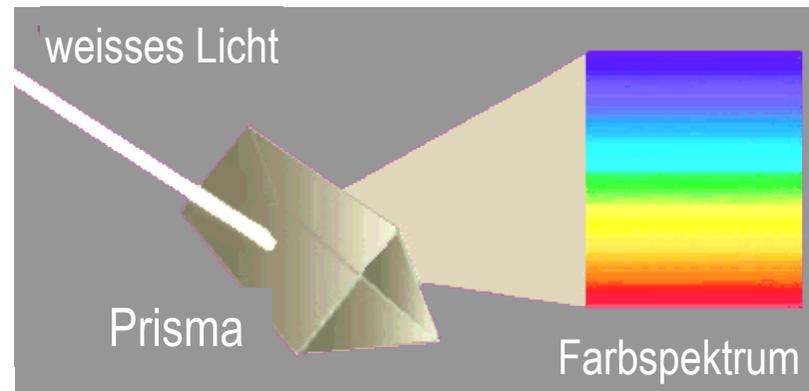
## *Korpuskeltheorie des Lichts*

Korpuskel trägt Farbe

*Brechung:*

Beschleunigung der  
Korpuskel im  
dichteren Medium

## Newton's Farblehre



## Fermat-Prinzip:

verträglich mit den  
Gesetzen der Bewegung  
von Teilchen



## Maupertuis-Prinzip

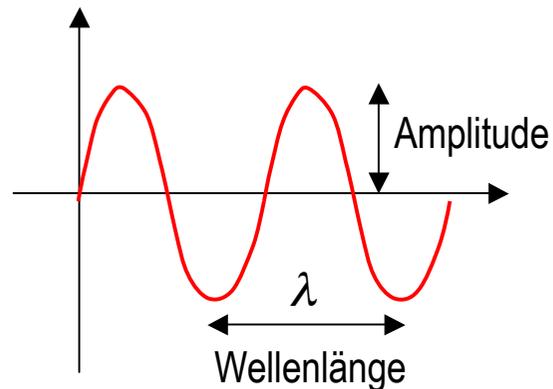
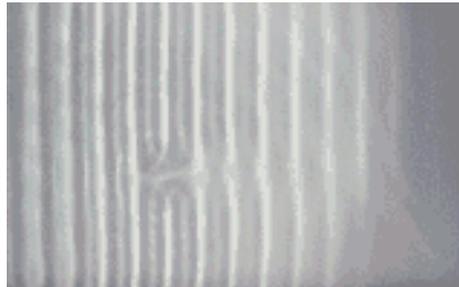
Mechanik von Teilchen

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

Licht als Welle: analog zum Schall

*Robert Hooke* (1635-1703)



*Christian Huygens* (1629-1695)



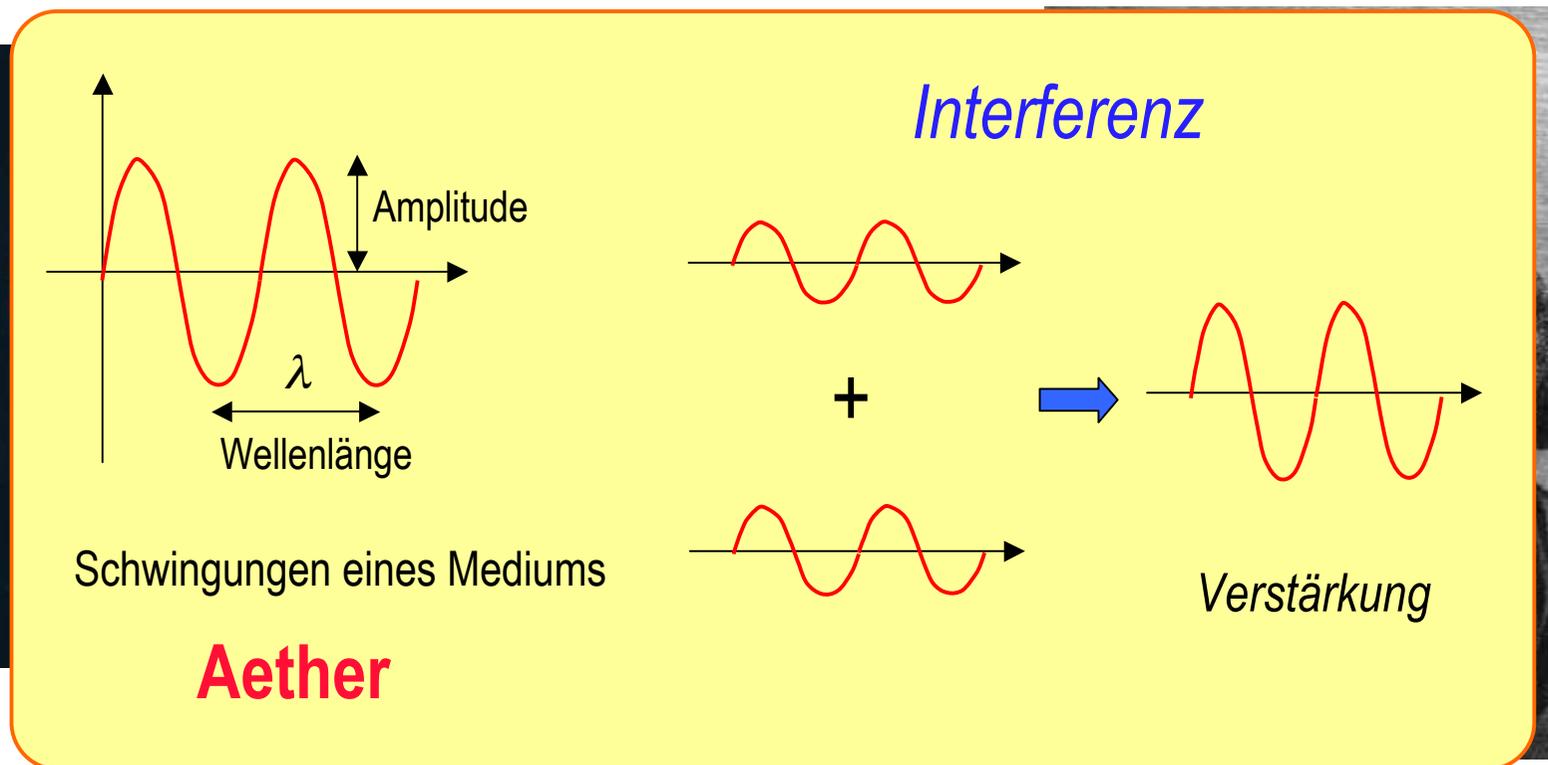
# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

Licht als Welle: analog zum Schall

Robert Hooke (1635-1703)

Christian Huygens (1629-1695)



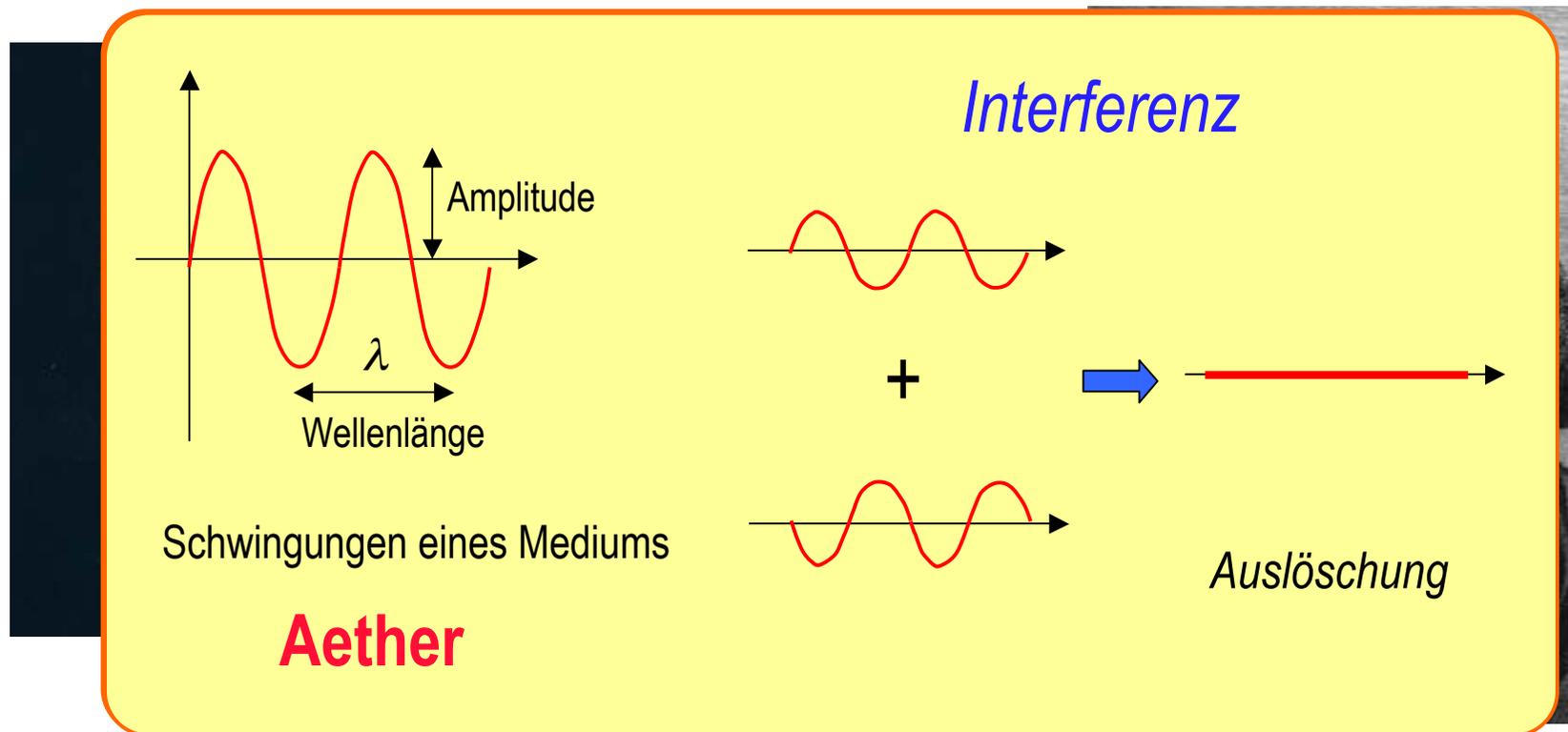
# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

Licht als Welle: analog zum Schall

Robert Hooke (1635-1703)

Christian Huygens (1629-1695)



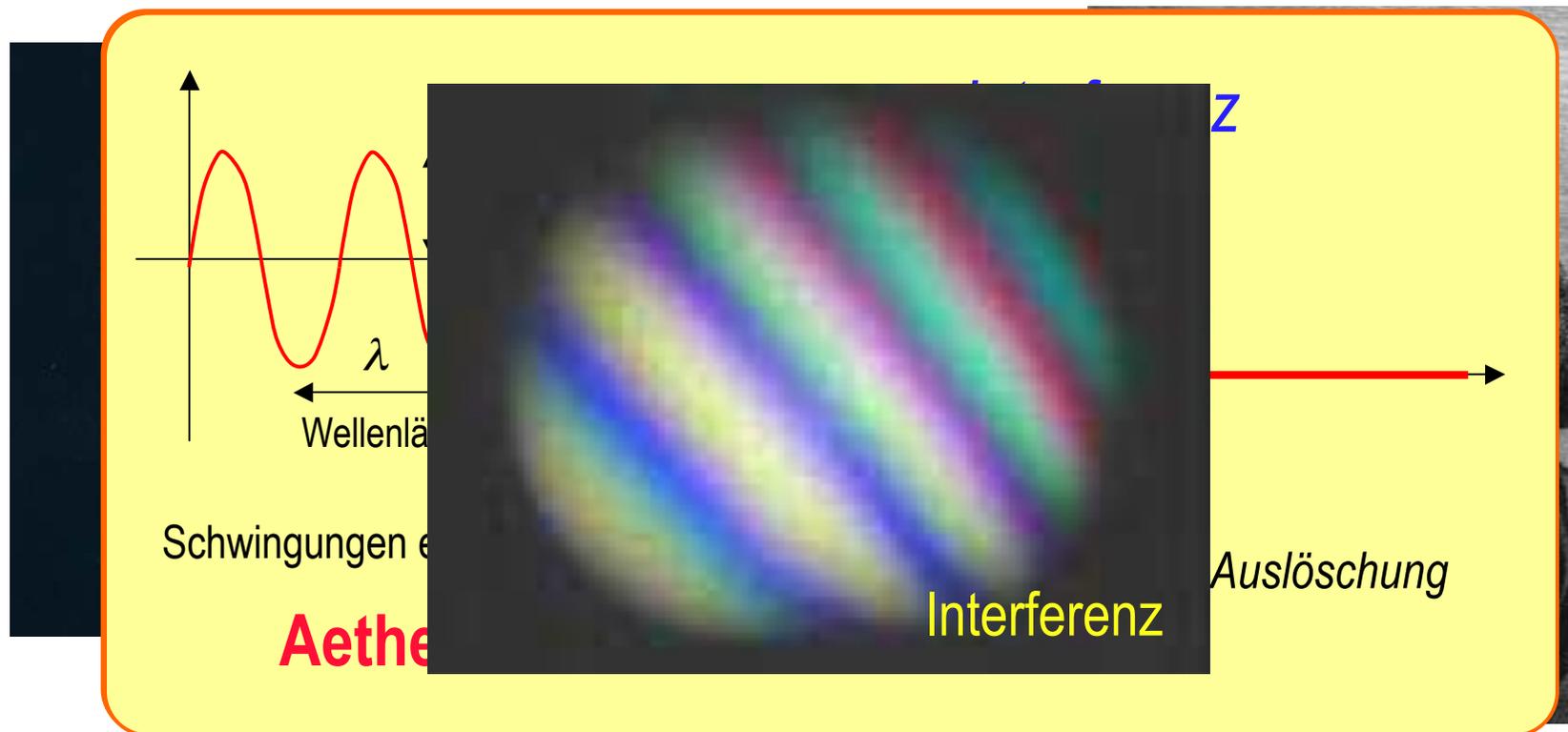
# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

Licht als Welle: analog zum Schall

Robert Hooke (1635-1703)

Christian Huygens (1629-1695)



## Fermat-Prinzip und die Natur des Lichtes

### Teilchen-Bild

Licht ist **schneller**  
in dichteren Medien

Lichtgeschwindigkeit

$$c_{\text{Medium}} = n c$$

### Wellen-Bild

Licht ist **langsamer**  
in dichteren Medien

Lichtgeschwindigkeit

$$c_{\text{Medium}} = c / n$$

**c** Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

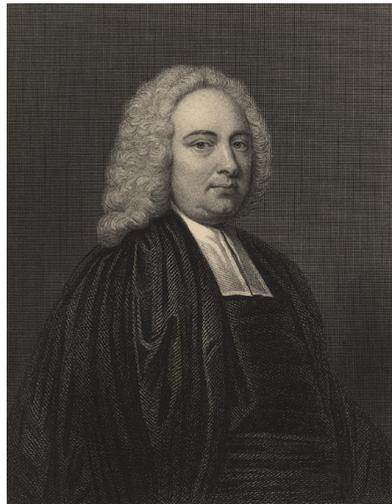
# Was ist Licht ? Lichtgeschwindigkeit

## Licht hat eine endliche Geschwindigkeit

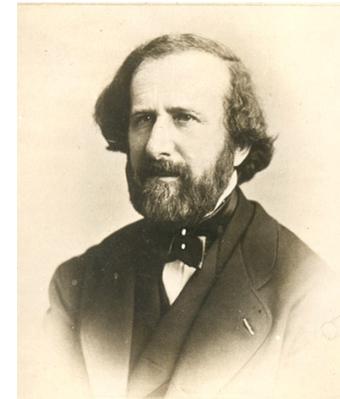
Ole Rømer (1644-1710)



James Bradley (1693-1762)



Hippolyte Fizeau (1819-1896)



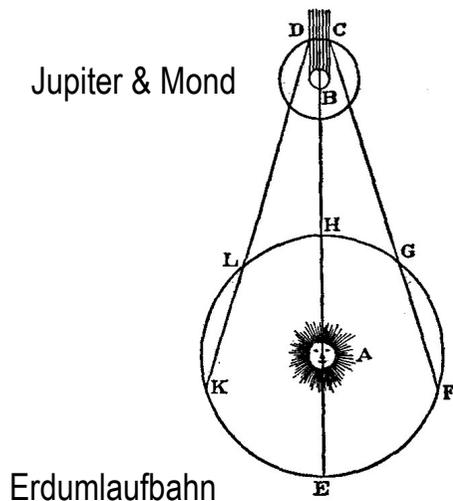
Leon Foucault (1819-1868)



# Was ist Licht ? Lichtgeschwindigkeit

## Licht hat eine endliche Geschwindigkeit

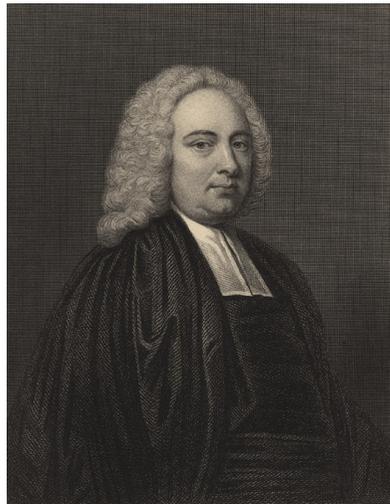
Ole Rømer (1644-1710)



astronomische Messung  
mit Hilfe der Jupitermonde  
(1676)

$c = 225,000,000 \text{ m/s}$

James Bradley (1693-1762)



Hippolyte Fizeau (1819-1896)



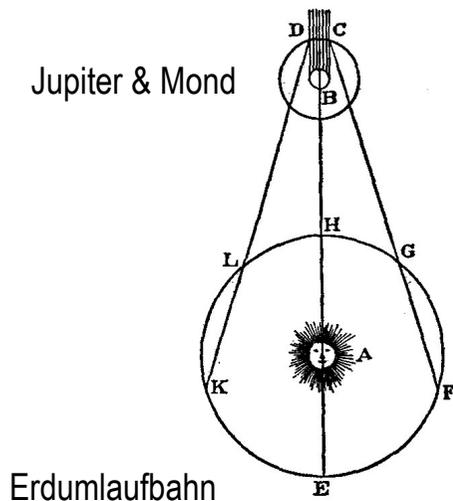
Leon Foucault (1819-1868)



# Was ist Licht ? Lichtgeschwindigkeit

## Licht hat eine endliche Geschwindigkeit

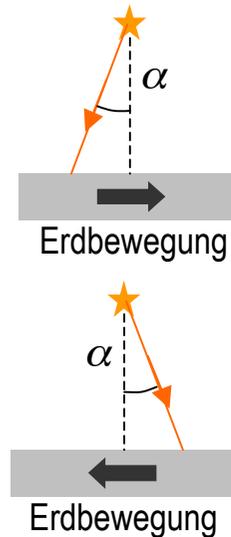
Ole Rømer (1644-1710)



astronomische Messung  
mit Hilfe der Jupitermonde  
(1676)

$$c = 225,000,000 \text{ m/s}$$

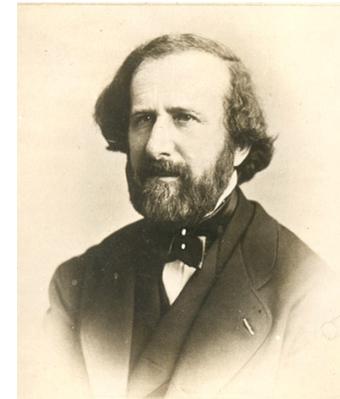
James Bradley (1693-1762)



astronomische Messung  
mit Hilfe der *Aberation*  
von Sternen (1728)

$$c = 301,000,000 \text{ m/s}$$

Hippolyte Fizeau (1819-1896)



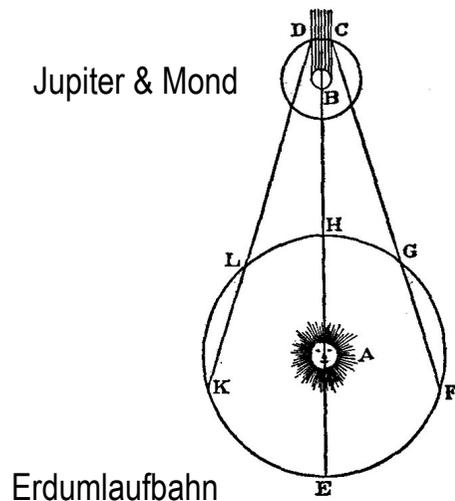
Leon Foucault (1819-1868)



# Was ist Licht ? Lichtgeschwindigkeit

## Licht hat eine endliche Geschwindigkeit

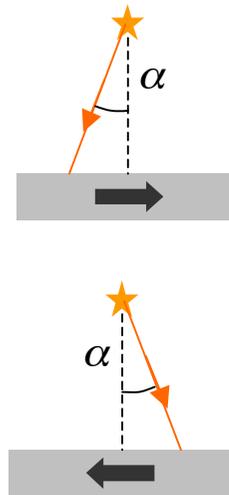
Ole Rømer (1644-1710)



astronomische Messung  
mit Hilfe der Jupitermonde  
(1676)

$$c = 225,000,000 \text{ m/s}$$

James Bradley (1693-1762)



astronomische Messung  
mit Hilfe der *Aberation*  
von Sternen (1728)

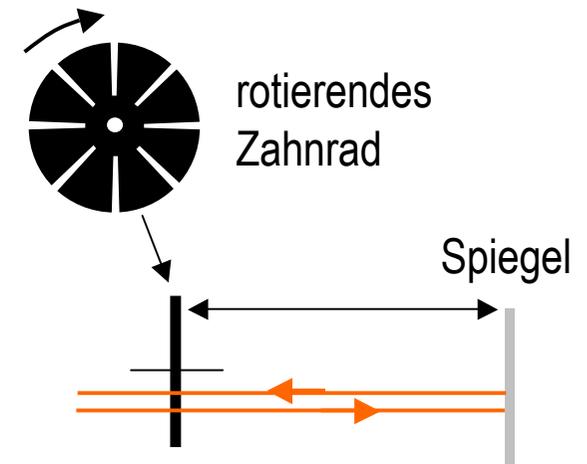
$$c = 301,000,000 \text{ m/s}$$

Hippolyte Fizeau (1819-1896)

Leon Foucault (1819-1868)

erdgebundene Messungen

Stroboskop-Methode



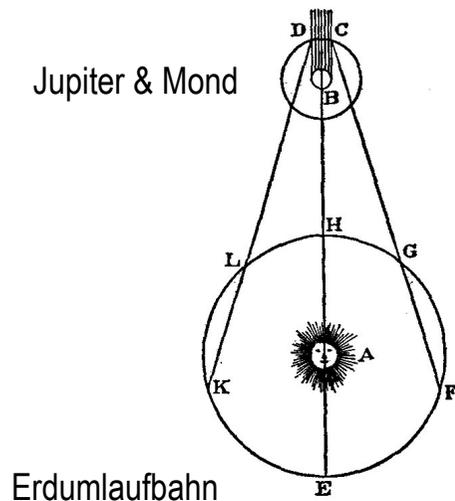
$$c = 298,000,000 \text{ m/s}$$

# Was ist Licht ? Lichtgeschwindigkeit

## Licht hat eine endliche Geschwindigkeit

$$c = 299,792,458 \text{ m/s}$$

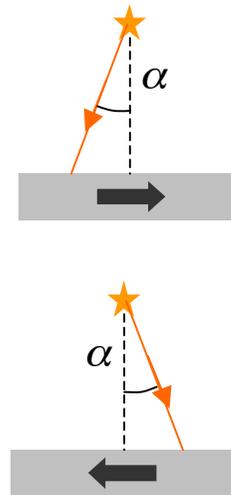
Ole Rømer (1644-1710)



astronomische Messung  
mit Hilfe der Jupitermonde  
(1676)

$$c = 225,000,000 \text{ m/s}$$

James Bradley (1693-1762)



astronomische Messung  
mit Hilfe der *Aberation*  
von Sternen (1728)

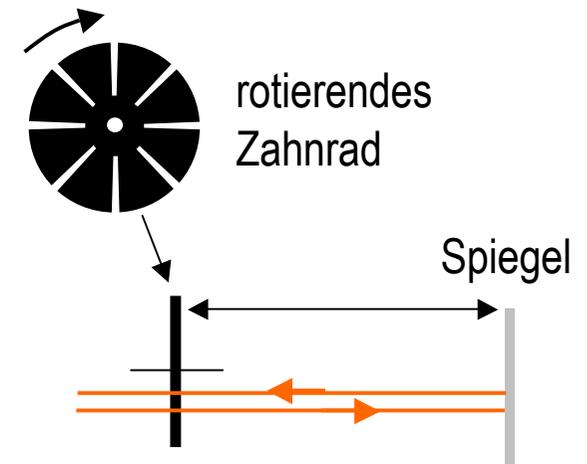
$$c = 301,000,000 \text{ m/s}$$

Hippolyte Fizeau (1819-1896)

Leon Foucault (1819-1868)

erdgebundene Messungen

Stroboskop-Methode



$$c = 298,000,000 \text{ m/s}$$

## Probleme des Wellenbildes gegenüber dem Teilchenbild

- Wellen brauchen ein Medium
- Wellen haben Beugung
- Wellen bieten „keine Erklärung“ für
  - Farben
  - Doppelbrechung

Analogie zum  
Schall

### Doppelbrechung

Musterverdoppelung



Kalzit  $\text{CaCO}_3$

E. Bartholin (1625-1698)

Was ist Licht ?

Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

*Thomas Young* (1773-1829)

*Augustin Jean Fresnel* (1788-1827)



Farbe des Lichtes



Wellenlänge



# Was ist Licht ?

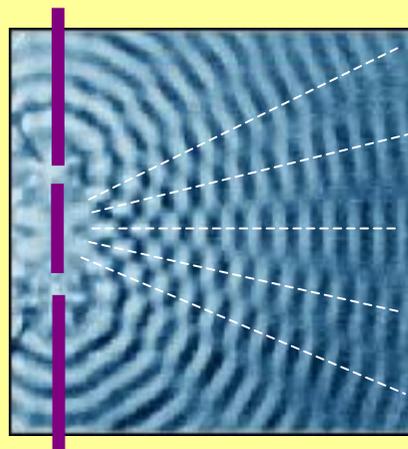
# Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

*Thomas Young (1773-1829)*

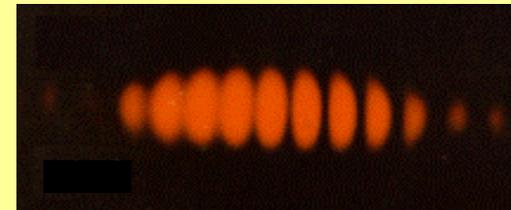
*Augustin Jean Fresnel (1788-1827)*

### Zweispalt-Interferenz 1802

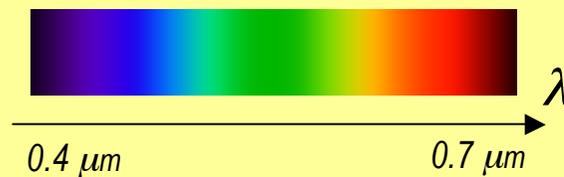


dunkle Stellen

helle Stellen



Interferenzmuster



# Was ist Licht ?

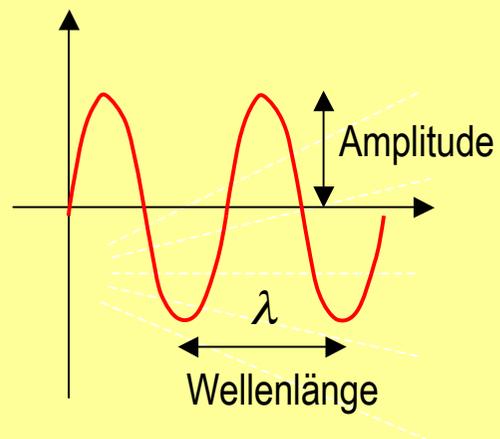
# Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

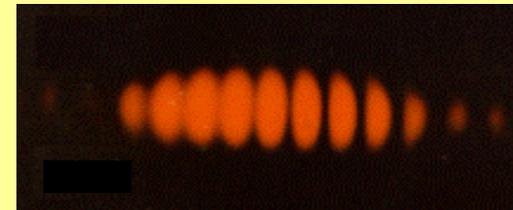
*Thomas Young (1773-1829)*

*Augustin Jean Fresnel (1788-1827)*

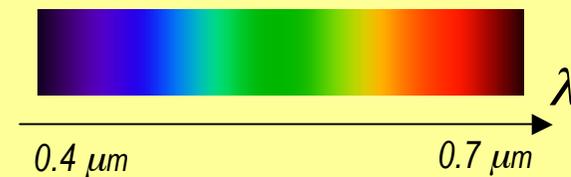
Farbe ↔ Wellenlänge



*Wellenlänge sehr kurz*



Interferenzmuster



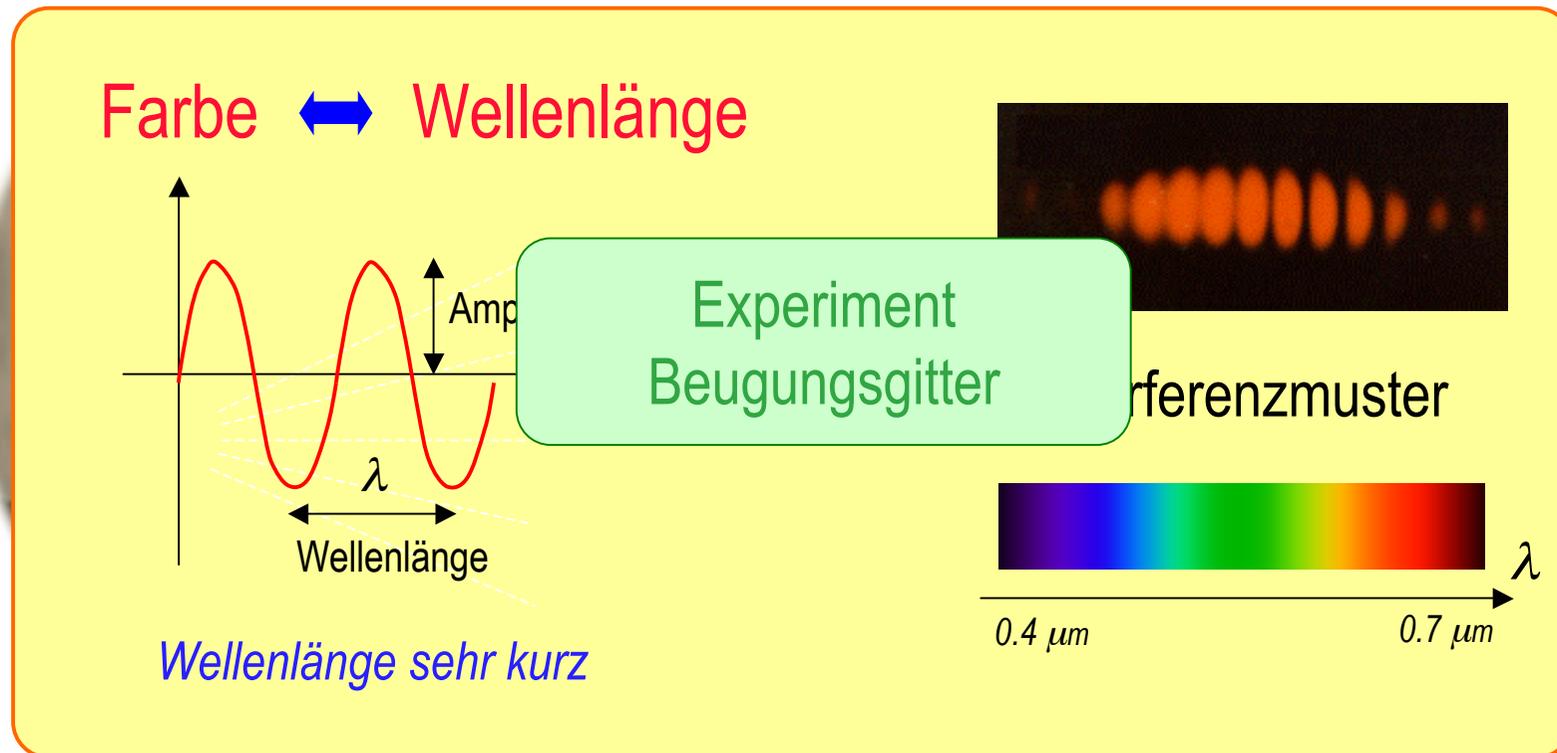
# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

Thomas Young (1773-1829)

Augustin Jean Fresnel (1788-1827)



# Was ist Licht ?

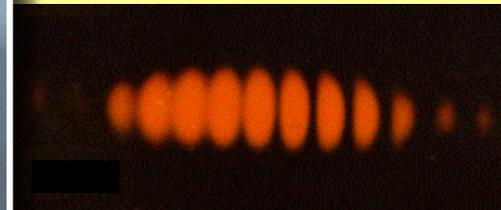
# Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

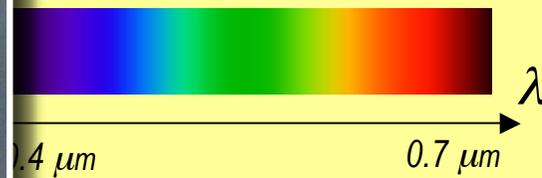
Das Beugungsexperiment mit Vorhang



Christien Jean Fresnel (1788-1827)



Interferenzmuster



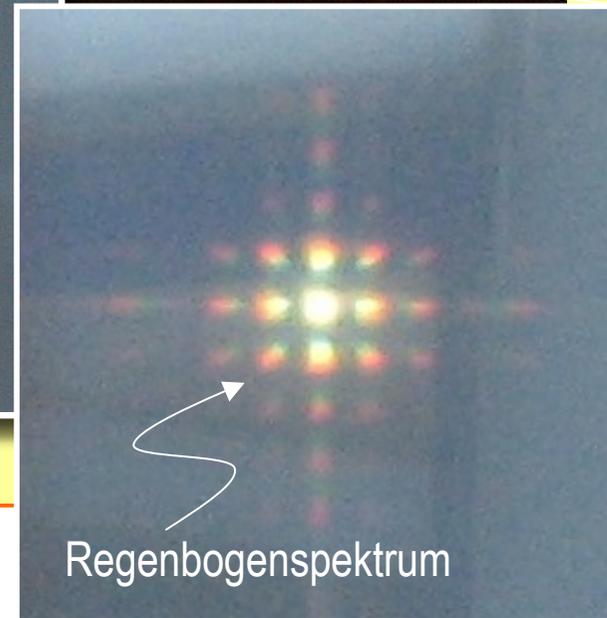
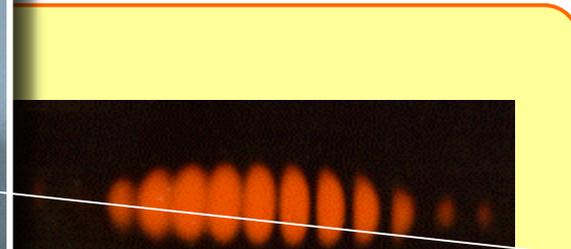
Was ist Licht ?

Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

The Beugungsexperiment mit Vorhang

stin Jean Fresnel (1788-1827)



## Probleme des Wellenbildes gegenüber dem Teilchenbild

- Wellen brauchen ein Medium
- Wellen haben Beugung
- Wellen bieten „keine Erklärung“ für
  - Farben
  - Doppelbrechung

Analogie zum  
Schall

### Doppelbrechung

Musterverdoppelung



Kalzit  $\text{CaCO}_3$

E. Bartholin (1625-1698)

# Was ist Licht ?

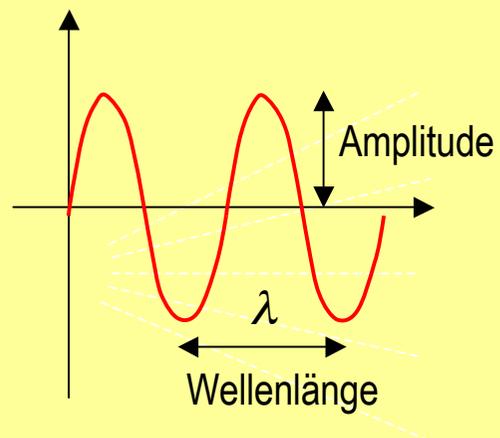
# Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

Thomas Young (1773-1829)

Augustin Jean Fresnel (1788-1827)

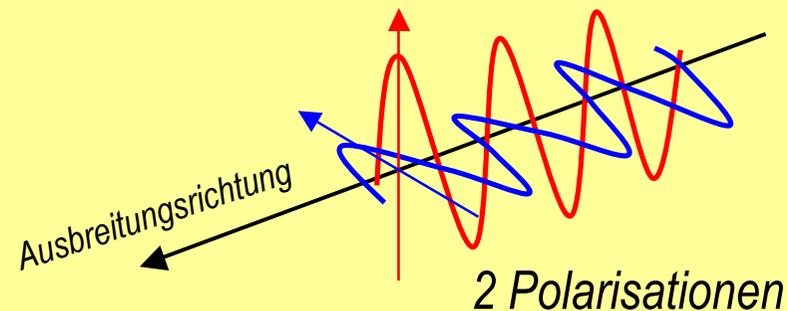
Farbe ↔ Wellenlänge



Wellenlänge sehr kurz

Polarisation des Lichtes

transverse Welle



→ Doppelbrechung



# Was ist Licht ?

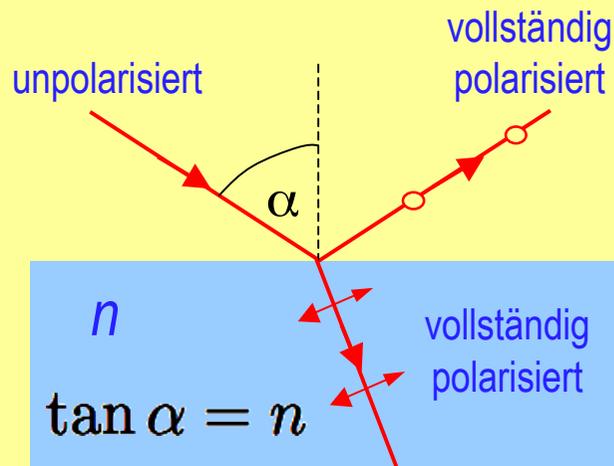
# Natur des Lichtes

## Experiment zur Wellennatur des Lichtes

Thomas Young (1773-1829)

Augustin Jean Fresnel (1788-1827)

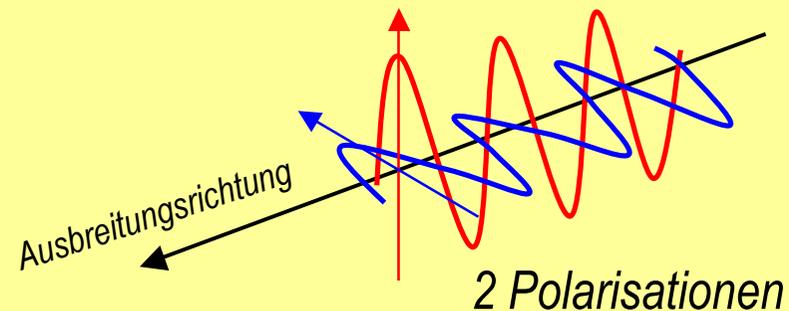
### Brewster Winkel



David Brewster (1781-1868)

### Polarisation des Lichtes

transverse Welle



→ Doppelbrechung

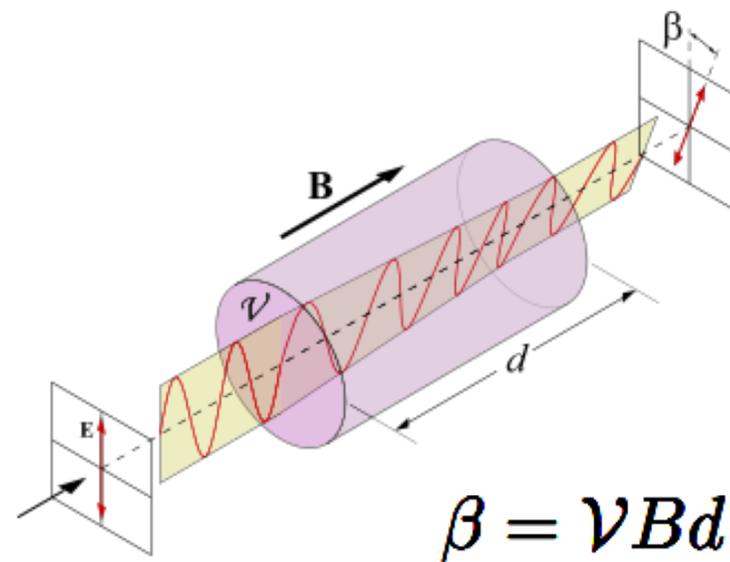


## Licht und Elektromagnetismus

Micheal Faraday (1791-1867)



Faraday-Effekt (1845)



Drehung der Polarisationsrichtung  
im Magnetfeld

# Was ist Licht ?

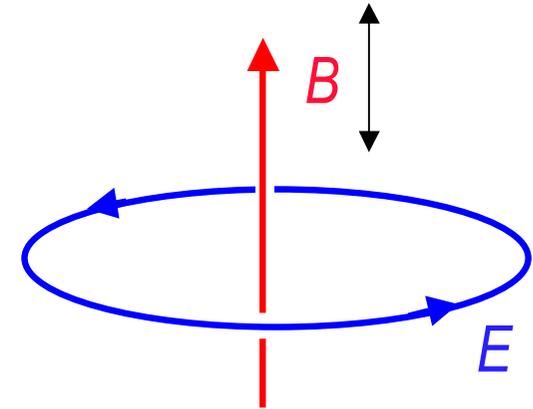
# Natur des Lichtes

## Licht und Elektromagnetismus

Micheal Faraday (1791-1867)



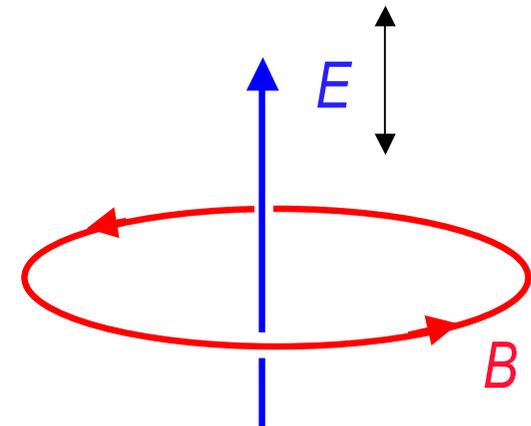
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$



James Clerk Maxwell (1831-1879)



$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = +\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



## Licht und Elektromagnetismus

Micheal Faraday (1791-1867)



$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

James Clerk Maxwell (1831-1879)



$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = +\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Wellengleichung

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Licht und Elektromagnetismus

Micheal Faraday (1791-1867)



$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

James Clerk Maxwell (1831-1879)



$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = +\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Wellengleichung

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

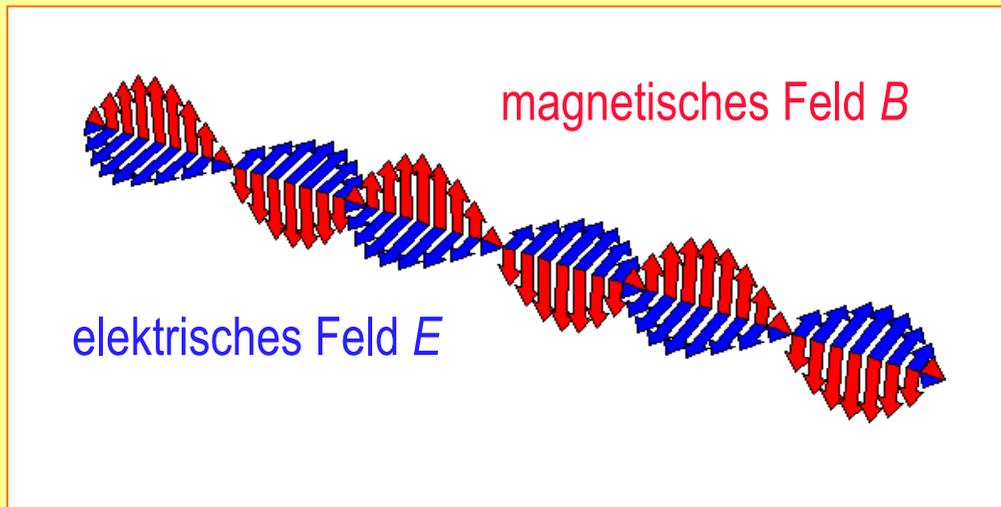
$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Lichtgeschwindigkeit

## Licht und Elektromagnetismus

### Elektromagnetische Welle

*transvers polarisiert*



Frequenz:  $\nu = c / \lambda$

*Frequenz = Lichtgeschwindigkeit / Wellenlänge*

### Wellengleichung

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Experimentelle Bestätigung

Leon Foucault (1819-1868)



*Lichtgeschwindigkeit in  
dichteren Medien ist  
kleiner als im Vakuum (1850)*



**Wellenbild**

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Experimentelle Bestätigung

Leon Foucault (1819-1868)



*Lichtgeschwindigkeit in dichten Medien ist kleiner als im Vakuum (1850)*

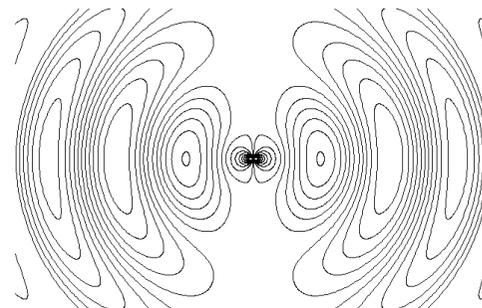


**Wellenbild**

Heinrich Hertz (1857-1894)



Hertz'scher Dipol (1886)

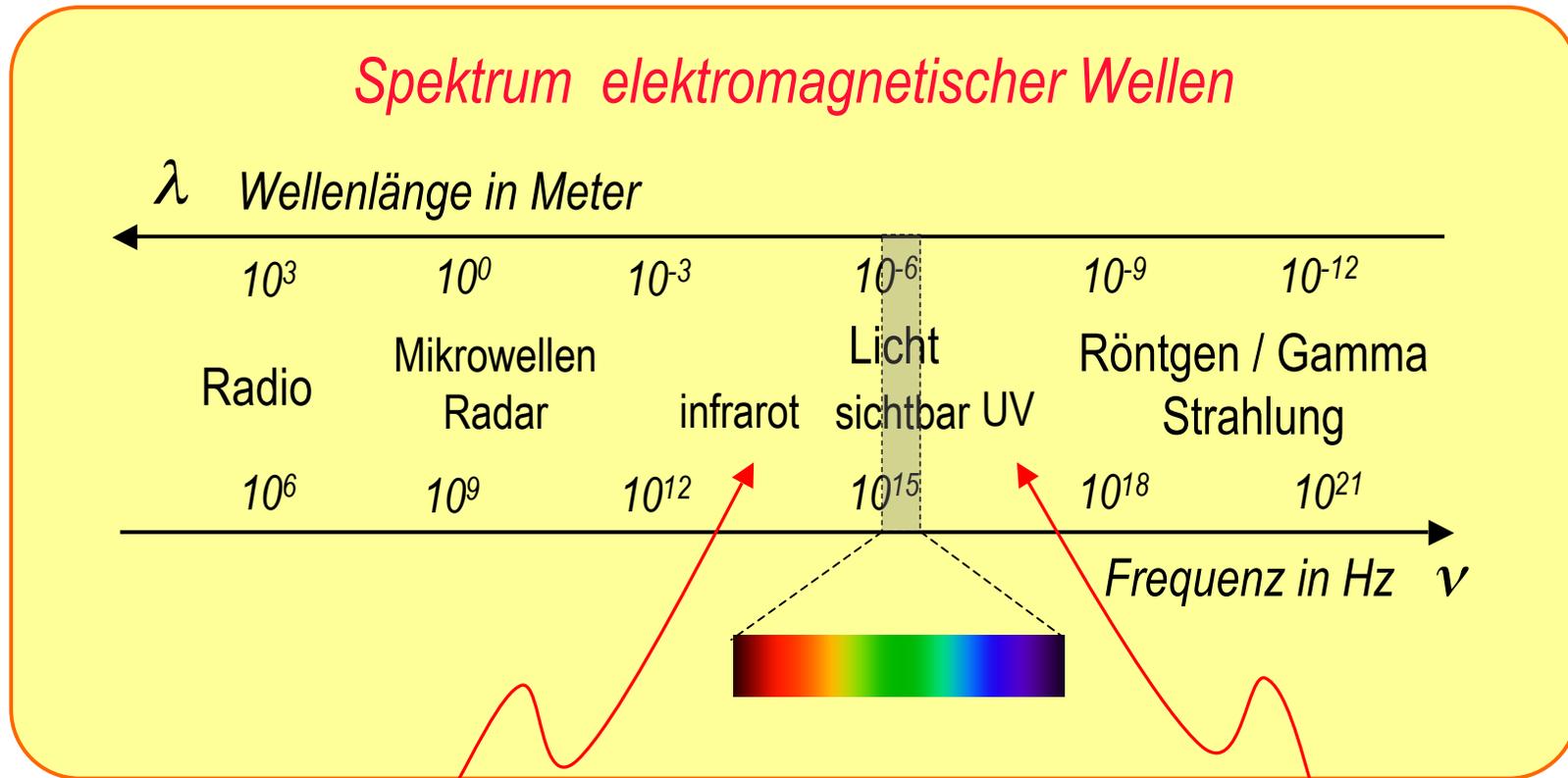


bewegte elektrische Ladung  
↓  
elektromagnetische Strahlung

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Licht als elektromagnetische Welle



William Herschel  
infrarot (1800)

Johann W. Ritter  
ultraviolett (1801)

# Elektromagnetische Strahlung & Materie

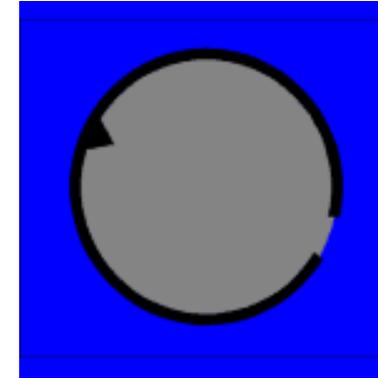
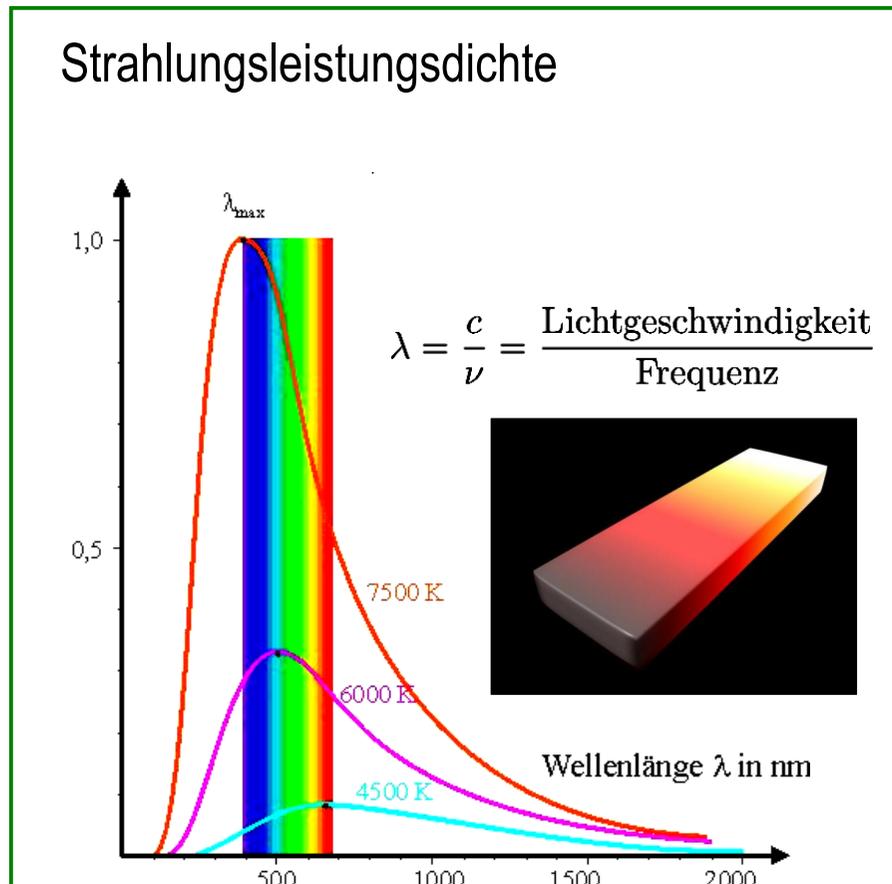
## Materie und Licht



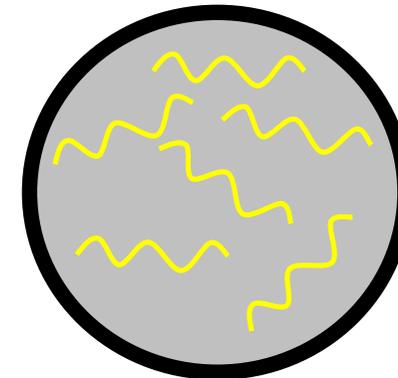
# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Strahlung "schwarzer Körper"

*Spektrum der elektromagnetischen Strahlung*



Hohlraumstrahlung



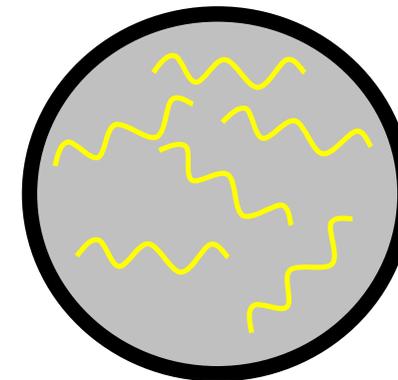
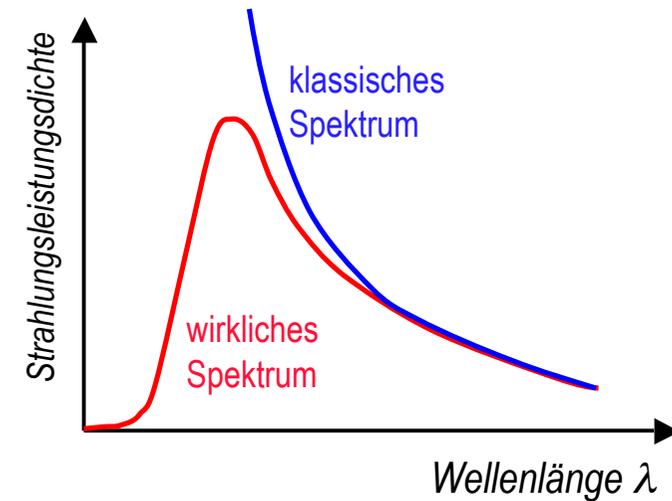
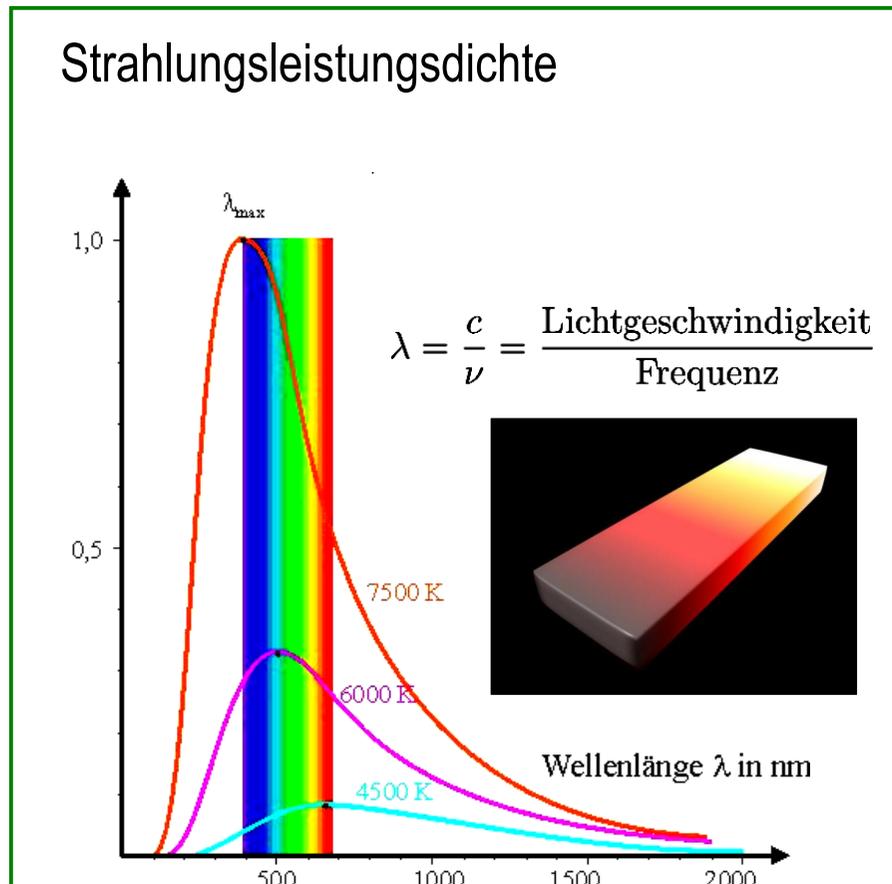
Strahlung im Gleichgewicht

Absorption & Emission

# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Strahlung "schwarzer Körper"

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung



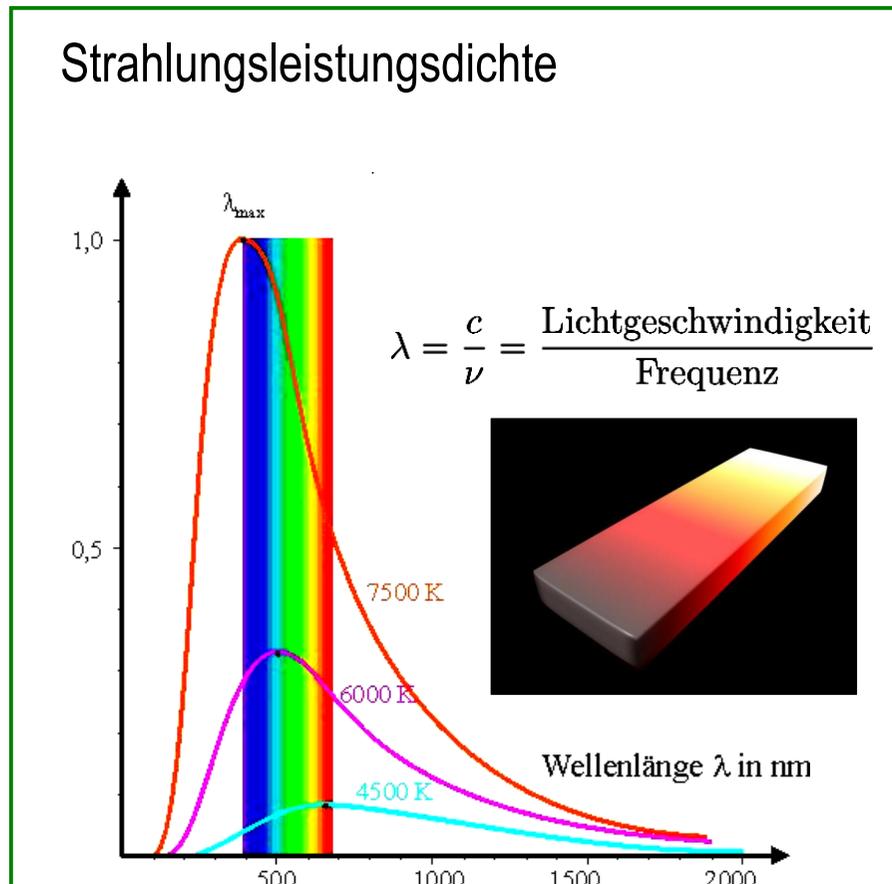
Strahlung im Gleichgewicht

Absorption & Emission

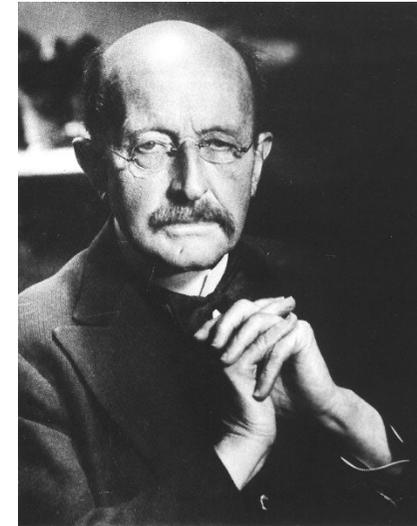
# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Strahlung "schwarzer Körper"

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung



Max Planck (1858-1947)



Energie-Absorption/Emission

klassisch: beliebige Energie

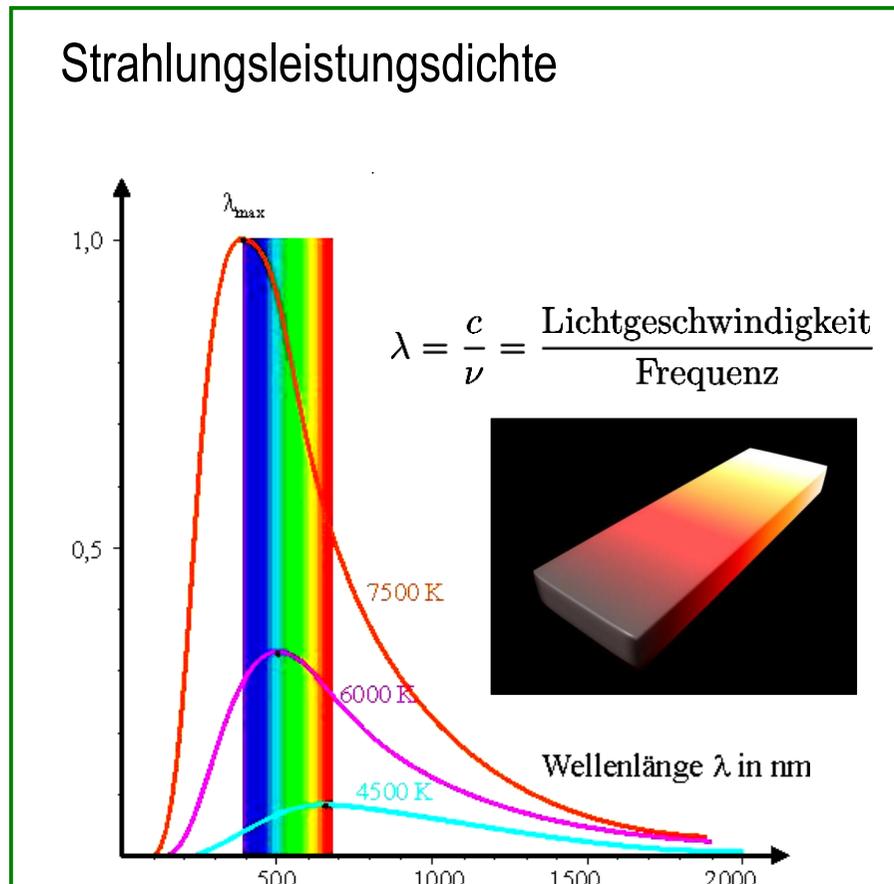
Planck: in Quanten  $E = h\nu$

$h$ : Planck'sches Wirkungsquantum

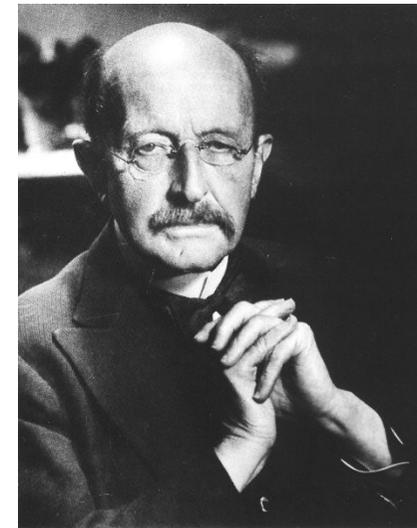
# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Strahlung "schwarzer Körper"

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung



Max Planck (1858-1947)



Planck'sche Strahlungsformel (1900)

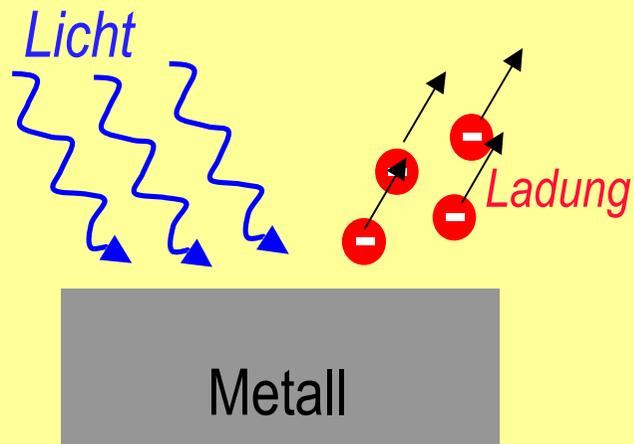
$$u(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

# Elektromagnetische Strahlung & Materie

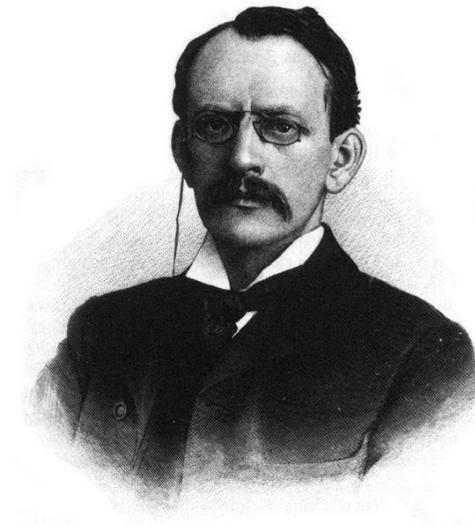
## Photoelektrischer Effekt

Entdeckung durch *H. Hertz* (1887)

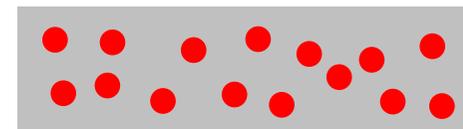
elektromagnetischer Strahlung setzt negative Ladungen aus Metallen frei



*Joseph John Thomson* (1856-1940)



identifiziert Ladung als *Elektron* in Kathodenstrahlung

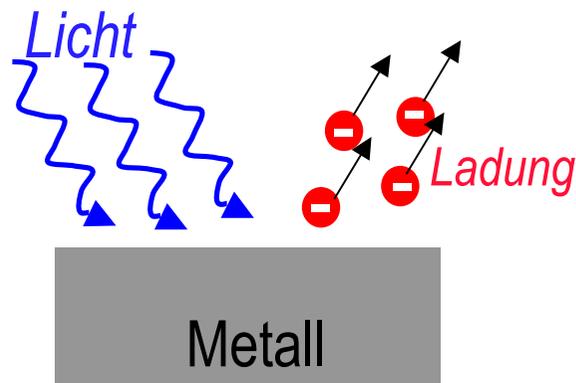


(1899)

# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Photoelektrischer Effekt

Bewegung der Elektronen im Feld der elektromagnetischen Strahlung

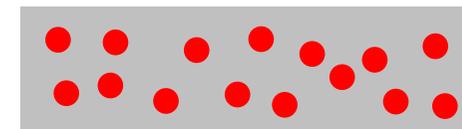


- ◆ *Intensität* der Strahlung  
grosse Felder → viele schnelle Elektronen
- ◆ Rolle der *Wellenlänge/Farbe* unklar

*Joseph John Thomson* (1856-1940)



identifiziert Ladung als *Elektron* in Kathodenstrahlung

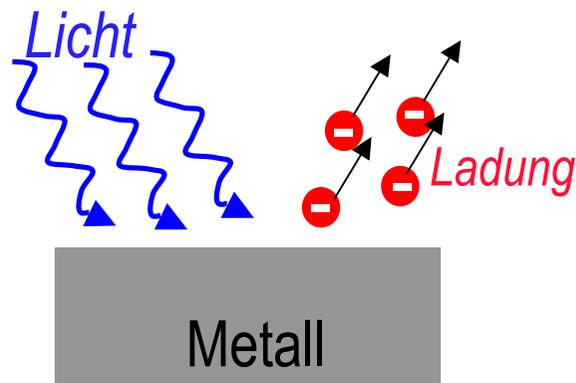


(1899)

# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Photoelektrischer Effekt

Bewegung der Elektronen im Feld der elektromagnetischen Strahlung



*Philipp Lenard* (1862-1947)



(1902)

- ◆ *Intensität* der Strahlung  
grosse Felder → viele schnelle Elektronen
- ◆ Rolle der *Wellenlänge/Farbe* unklar

*Intensität* ↔ Zahl der Elektronen

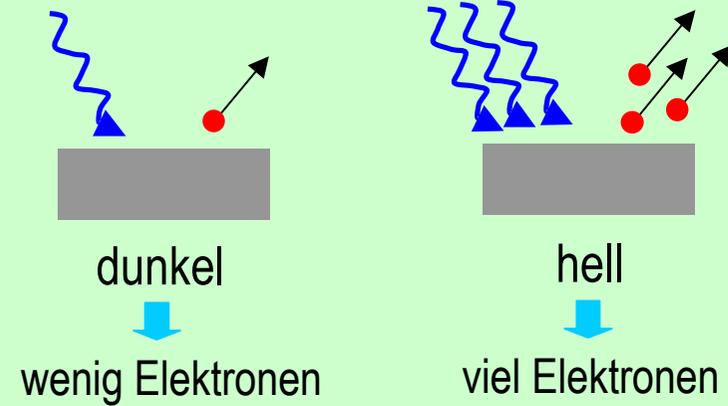
*Farbe* ↔ Energie der Elektronen

# Elektromagnetische Strahlung & Materie

## Photoelektrischer Effekt

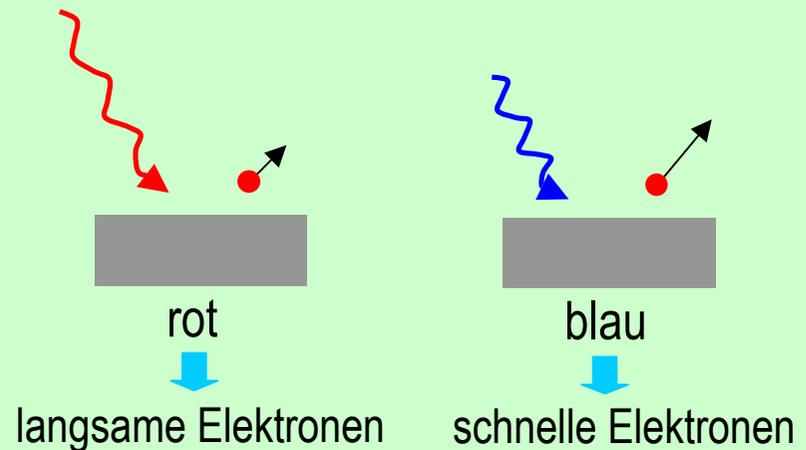
### *Intensität des Lichts*

bestimmt Zahl der Elektronen



### *Farbe des Lichts*

bestimmt Energie (Geschwindigkeit)  
der Elektronen

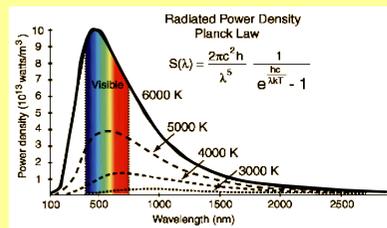


# Was ist Licht ?

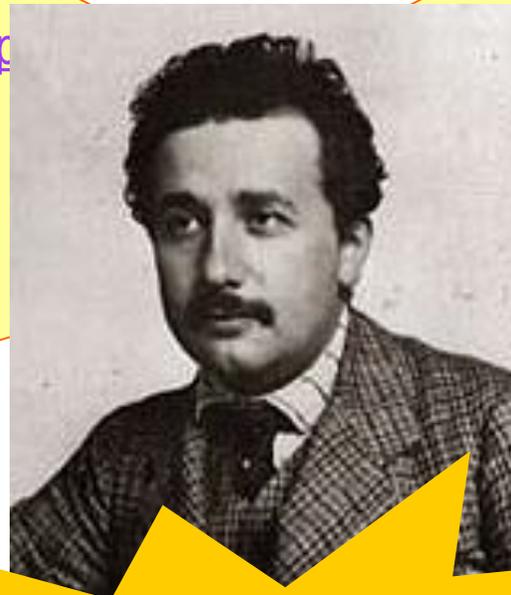
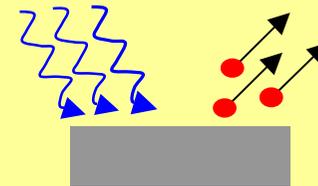
# Natur des Lichtes

Albert Einstein (1879-1955)

Strahlung schwarzer Körper



photoelektrischer Effekt



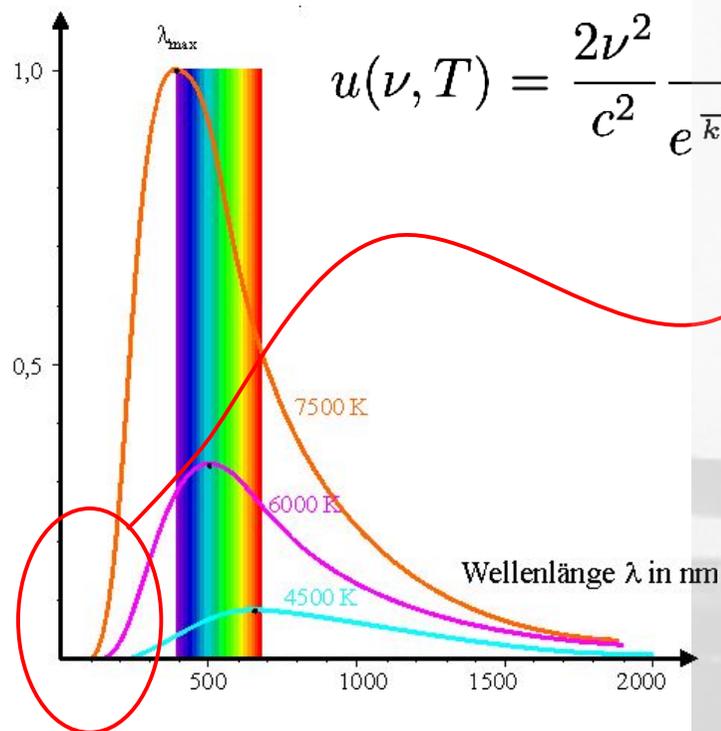
Lichtquanten  
Hypothese

# Was ist Licht ?

# Natur des Lichtes

## Lichtquanten-Hypothese

### Strahlung schwarzer Körper



$$u(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

### Thermodynamik

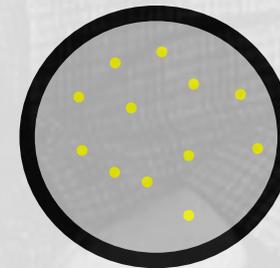
Entropie

$$S - S_0 = k_B \ln \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{\Delta E}{h\nu}}$$

wie

$$S - S_0 = k_B \ln \left( \frac{V}{V_0} \right)^N$$

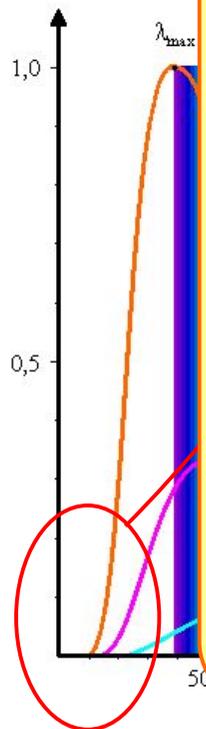
Ideales Gas



Strahlung als Gas  
unabhängiger  
Teilchen

## Lichtquanten-Hypothese

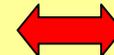
Strahlung



Elektromagnetische Strahlung verhält sich wie ein Gas von Teilchen (*Energiequanten*)

Energie des Teilchens:

$$h\nu$$



Frequenz  
Wellenlänge  
Farbe

*Photon*

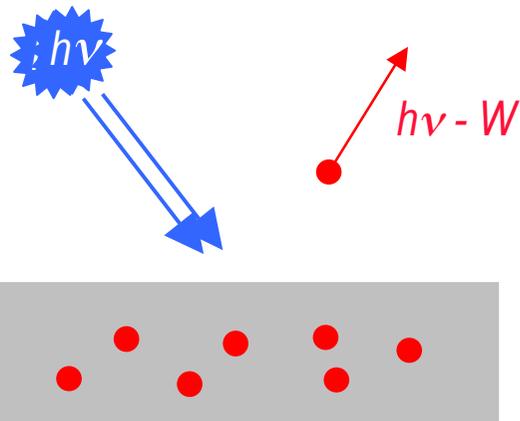
$$\frac{\Delta E}{h\nu}$$

$N$

Strahlung als Gas  
abhängiger  
Teilchen

## Lichtquanten-Hypothese

Energieübertrag in  
Lichtquanten:



1 Photon  $\rightarrow$  1 Elektron

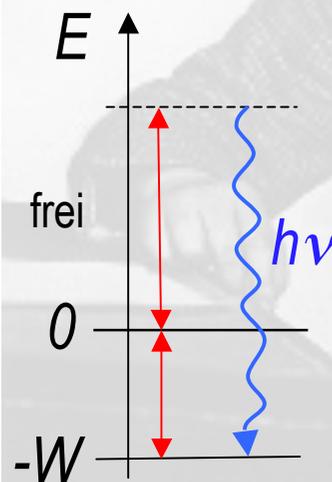
*Intensität:*

viele Photonen

$\rightarrow$  viele Elektronen

*Energie des Elektrons:*

$$E_{\text{Elektron}} = h\nu - W$$



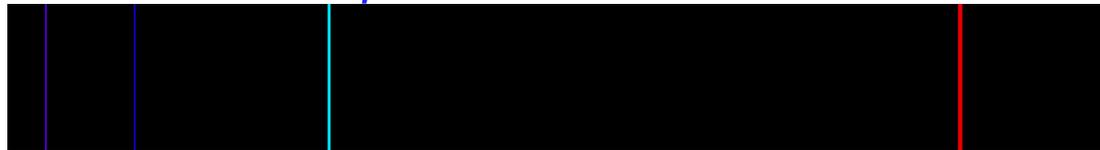
$W$ : Austrittsarbeit aus Metall



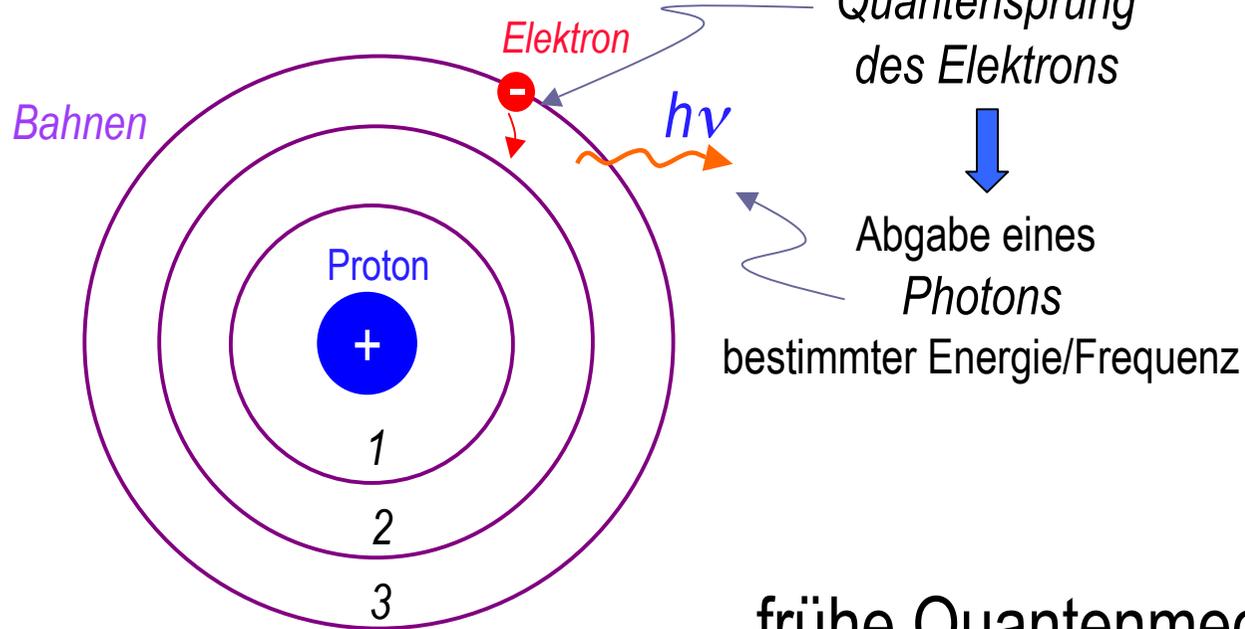
Energie des Elektrons  
im Metall

## Lichtquanten und Atomspektren

### Wasserstoff-Spektrum



### Bohrs Atom-Modell

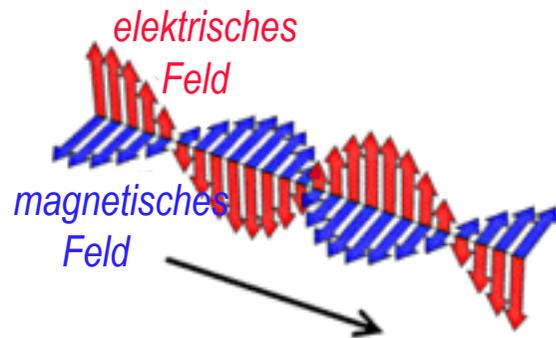


Niels Bohr (1885-1962)

frühe Quantenmechanik

## Licht als

### elektromagnetische Welle



- ◆ Ausbreitung
- ◆ Interferenz
- ◆ Brechung

### Photon



keine Masse  
Lichtgeschwindigkeit

Energie:  $E = h\nu$

Impuls:  $p = h/\lambda = E/c$

- ◆ Absorption
- ◆ Emission
- ◆ Energieübertragung

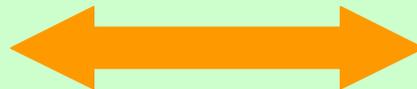
## Licht als

elektromagnetische Welle

Photon

Doppelnatur des Lichts

*Welle*



*Teilchen*

- ◆ Ausbreitung
- ◆ Interferenz
- ◆ Brechung

- ◆ Absorption
- ◆ Emission
- ◆ Energieübertragung

# Ansatz zur Quantenmechanik

## Doppelnatur des Lichts

Emission als Lichtquant

Bewegung

Absorption/Detektion als Lichtquant



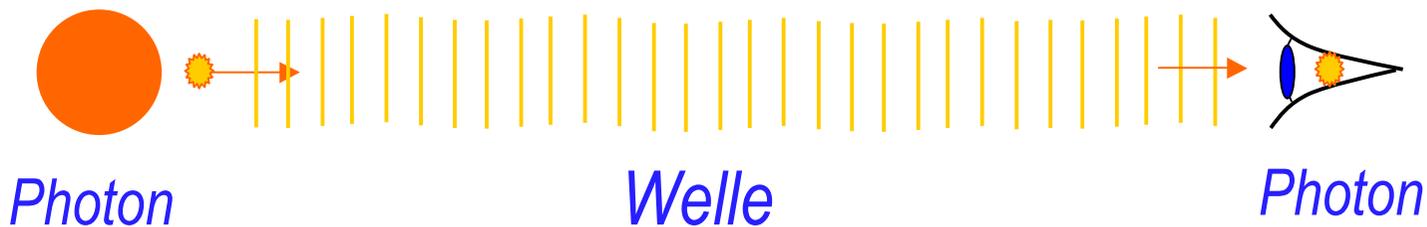
# Ansatz zur Quantenmechanik

## Doppelnatur des Lichts

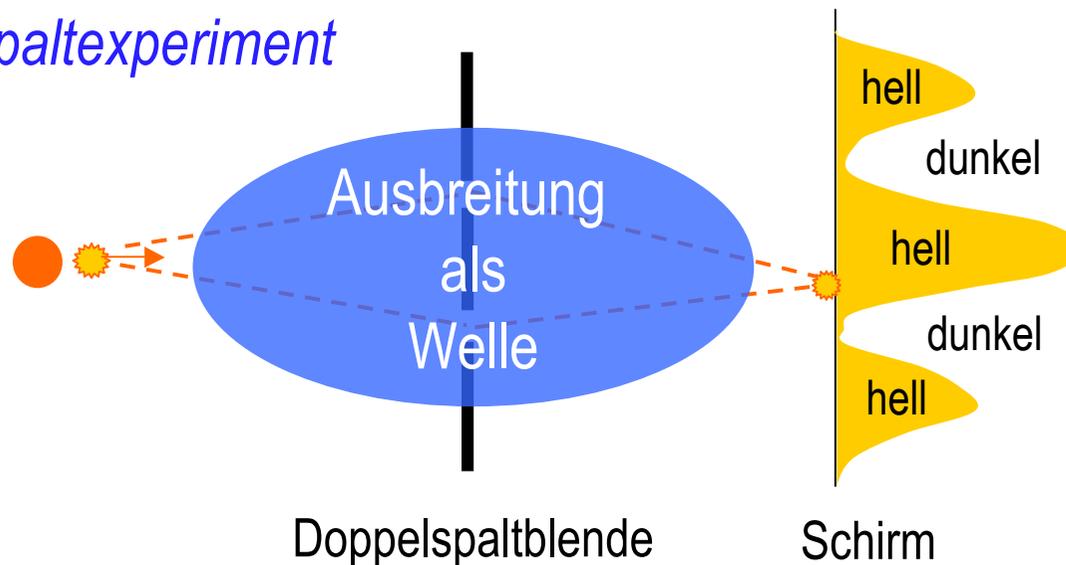
Emission als Lichtquant

Bewegung

Absorption/Detektion als Lichtquant



*Doppelspaltexperiment*



Intensität



Wahrscheinlichkeit  
des Auftreffens eines  
Photons

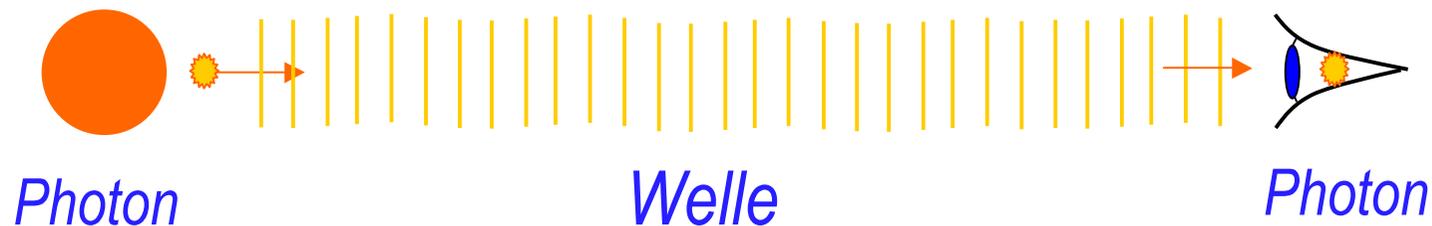
# Ansatz zur Quantenmechanik

## Doppelnatur des Lichts

Emission als Lichtquant

Bewegung

Absorption/Detektion als Lichtquant



Analog: Quantenteilchen wie das *Elektron, Proton, Neutron, .....*

Doppelnatur als **Teilchen und Welle**

*Louis de Broglie*  
(1923)



moderne  
Quantenmechanik

# Fundamentale Wechselwirkungen

Wechselwirkung / Kraft	Austauschteilchen
<b>Schwerkraft (Gravitation)</b> bestimmt grosse Strukturen im Universum	Graviton ?
<b>Elektromagnetismus</b> Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen bestimmt Atomstruktur, Chemie, ...	Photon
<b>schwache Wechselwirkung</b> radioaktive Zerfälle, ...	$Z_0$ $W^+$ $W^-$ Bosonen
<b>starke Wechselwirkung</b> bindet Quarks in Hadronen	Gluonen

# Fundamentale Wechselwirkungen

Wechselwirkung / Kraft	Austauschteilchen
<b>Schwerkraft (Gravitation)</b> bestimmt grosse Strukturen im Universum	Graviton ?
<b>Elektromagnetismus</b> Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen bestimmt Atomstruktur, ...	Photon
<b>schwache Wechselwirkung</b> radioaktive Zerfälle, ...	+ W <sup>-</sup> Bosonen
<b>starke Wechselwirkung</b> bindet Quarks in Hadronen	Gluonen

Vereinigt im  
Standard-Modell  
der Teilchenphysik

wird getestet am  
Large Hadron Collider

CERN

# Fundamentale Wechselwirkungen

Wechselwirkung / Kraft	Austauschteilchen
<b>Schwerkraft (Gravitation)</b> bestimmt grosse Strukturen im Universum	Graviton ?
<b>Elektromagnetismus</b> Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen bestimmt Atomstruktur, ...	Photon
<b>schwache Wechselwirkung</b> radioaktive Zerfälle, ...	 LHC
<b>starke Wechselwirkung</b> bindet Quarks in Hadronen	

Vereinigt im Standard-Modell der Teilchenphysik

wird getestet am Large Hadron Collider

CERN

# Lichtquellen



## Swiss Light Source

Paul Scherrer Institut



## Laser



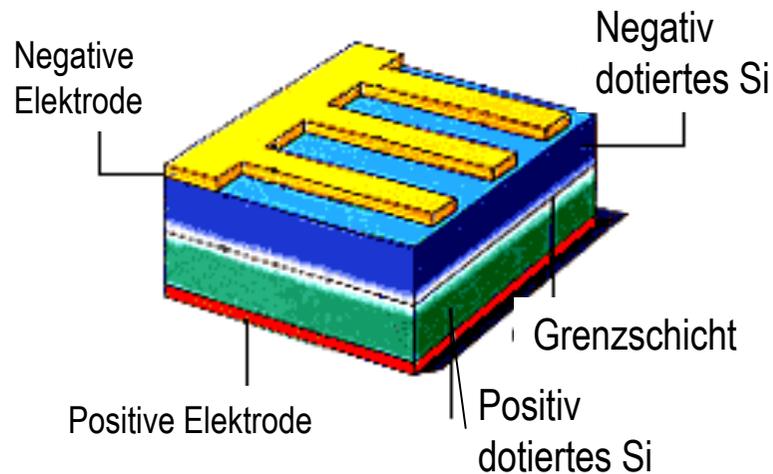
Licht für Forschung

# Licht als Energiequelle

## Photozelle und Solartechnologie

### *Photovoltaisches Element*

Halbleiter-Technologie



(von FH Bochum SolarNetz)

### *Solarzellen*

