

# Medizinische Biophysik

Licht in der Medizin. Eigenschaften des Lichts,

Emissionsspektrometrie

5. Vorlesung  
03. 10. 2016

## II. Wellenoptik

### 1. Grundkenntnisse der Wellenlehre

- a) Welle, Wellenlänge ( $\lambda$ ), Frequenz ( $f$ ), Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ ), Transversal- und Longitudinalwellen
- b) Lineare Polarisation
- c) Reflexion und Brechung an Grenzflächen
- d) Interferenz
- e) Beugung, Huygenssches Prinzip

### 2. Licht als Welle

- a) Beugung (Diffraktion) des Lichtes
- b) Wellenlängenbereiche des Lichtes
- c) Licht = elektromagnetische Welle
- d) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes – endliche Auflösung der optischen Instrumenten

## III. Teilchencharakter des Lichtes

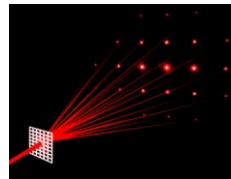
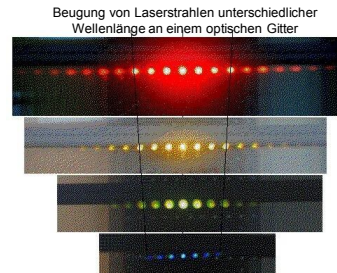
- a) Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)
- b) Photon, Photonenenergie

## IV. Energietransport im Licht (in Strahlungen)

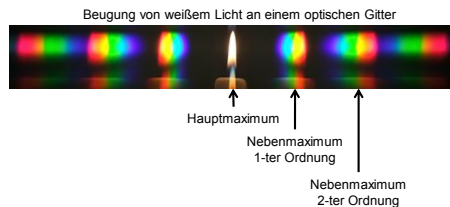
- a) Größen zur Beschreibung des Energietransports
- b) Strahlungsquellen mit verschiedener Geometrie

## V. Lichtemission

- 1. Emissionsspektrometrie
  - a) Emissionsspektrum
  - b) Messung des Emissionsspektrums – Aufbau eines Spektrometers
  - c) Monochromator
  - d) Lichtdetektor



Beugung eines Laserstrahls an einem zweidimensionalen optischen Gitter



## II. Wellenoptik

### 1. Grundkenntnisse der Wellenlehre

- a) Welle, Wellenlänge ( $\lambda$ ), Frequenz ( $f$ ), Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $c$ )  $c = \lambda \cdot f$   
Transversal- und Longitudinalwellen
- b) Lineare Polarisation
- c) Reflexion und Brechung an Grenzflächen
- d) Interferenz
- e) Beugung, Huygenssches Prinzip

Vorkenntnisse  
(s. Skript „Physikalische  
Grundkenntnisse“ Kapitel 9)

### 2. Licht als Welle

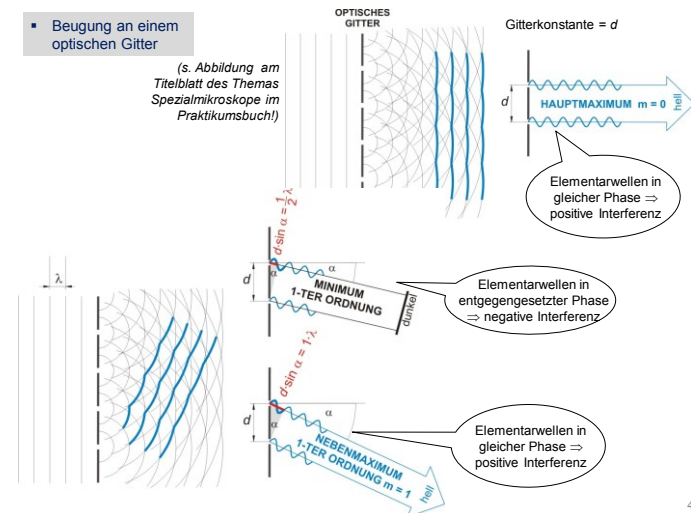
#### a) Beugung (Diffraktion) des Lichtes

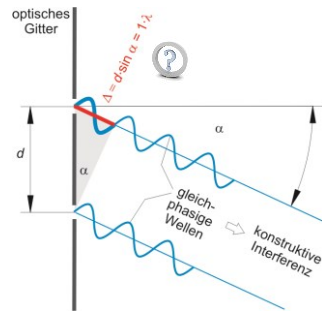
Beweis für den  
Wellencharakter  
des Lichtes



#### Beugung an einem optischen Gitter

(s. Abbildung am  
Titelblatt des Themas  
Spezialmikroskope im  
Praktikumsbuch!)





$$d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

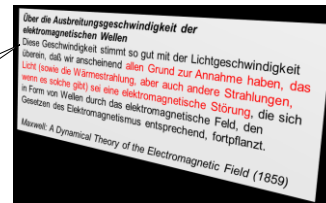
wobei  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

→ Bestimmung von  $\lambda$

→ Bestimmung von  $d$ , s. Diffraktionsmethoden

### c) Licht = elektromagnetische Welle

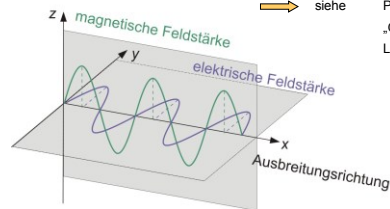
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  
 $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



Transversalwelle  $\Rightarrow$  Polarisierbarkeit

→ siehe

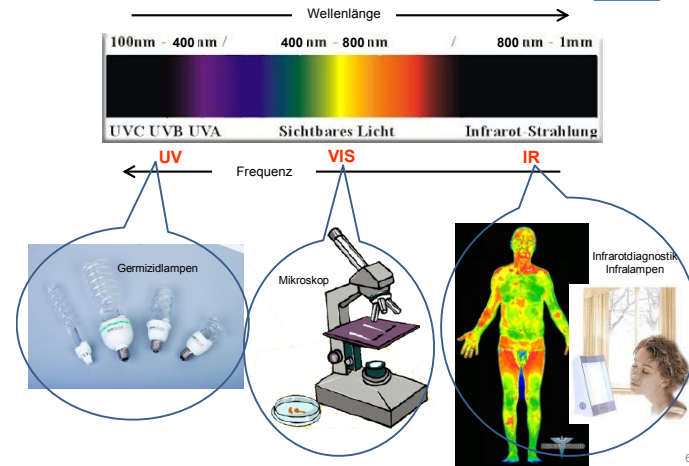
Polarisationsmikroskop,  
„Optische Aktivität - Polarimeter“ im Praktikum,  
LCD, ...



7

### b) Wellenlängenbereiche des Lichts

$$c = \lambda \cdot f$$



6

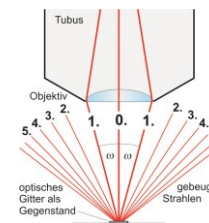
### d) Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes – endliche Auflösung der optischen Instrumenten

„So präzise eine Linse auch geschliffen sei, infolge der Wellennatur des Lichtes tritt an der Eintrittsoffnung der Linse **Diffraktion** auf: demzufolge erhält man von einer punktförmigen Lichtquelle statt eines punktförmigen Bildes eine kleine leuchtende Scheibe. **Dieses Phänomen verhindert das Studium beliebig feiner Strukturen**, weil diese Scheiben einander überlappen.“

Airy-Scheibe



### ▪ Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops ( $\delta$ ):



Wellenlänge des verwendeten Lichts

$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \omega}$$

Brechzahl des Materials zwischen dem Präparat und der Objektlinse

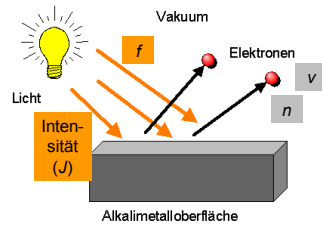
Halböffnungswinkel der Objektlinse

### ▪ Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops ( $f$ ): $f = \frac{1}{\delta}$

8

### III. Teilchencharakter des Lichtes

#### a) Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)



$$c = \lambda \cdot f$$

Man variiert:

- die Frequenz ( $f$ ) des Lichtes
- die Intensität ( $J$ ) des Lichtes

Man beobachtet:

- die Zahl der ausgelösten Elektronen ( $n$ )
- die Geschwindigkeit der Elektronen ( $v$ )

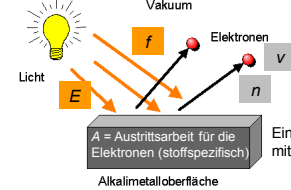
#### Beobachtungen:

Es gibt eine minimale Frequenz ( $f_{\min}$ ), für welche

- $f < f_{\min} \Rightarrow n = 0$ , egal wie groß  $J$  ist;
- $f_{\min} \leq f \Rightarrow$  Elektronen werden ausgelöst
  - $n$  wächst mit wachsender  $J$
  - $v$  wächst mit wachsender  $f$

9

#### b) Photon, Photonenenergie



Erklärung (Einstein, 1905):

- Lichtteilchen = Lichtquanten = Photonen
- Photonenenergie ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = h \cdot f$$

plancksche Konstante  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$$h \cdot f_{\min} = \epsilon_{\min} = A$$

$$f < f_{\min} \Rightarrow h \cdot f = \epsilon < A \Rightarrow \text{Kein Elektron wird ausgelöst}$$

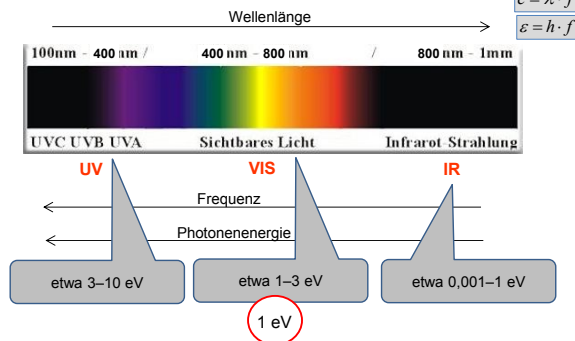
$$f_{\min} < f \Rightarrow A < h \cdot f = \epsilon \Rightarrow \text{Elektron wird ausgelöst}$$

$$\text{Energieerhaltungssatz für den Photoeffekt: } \epsilon = A + \frac{1}{2} m_{\text{Elektron}} v_{\text{Elektron}}^2$$

Bei zunehmender Intensität (mehr Photonen) werden mehr Elektronen ausgelöst.  
Bei zunehmender Frequenz wird die kinetische Energie und  $v$  des Elektrons größer.

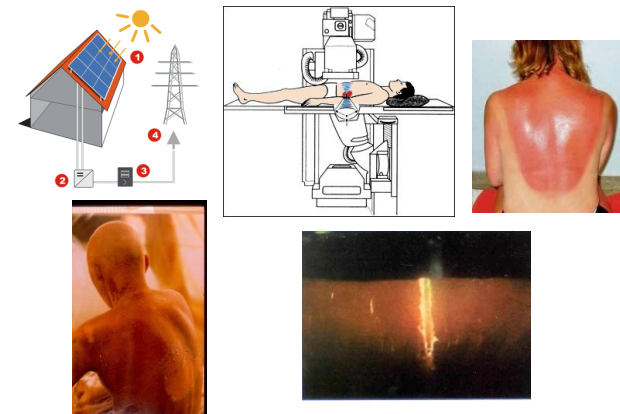
10

#### Photonenenergiwerte der Lichtbereichen



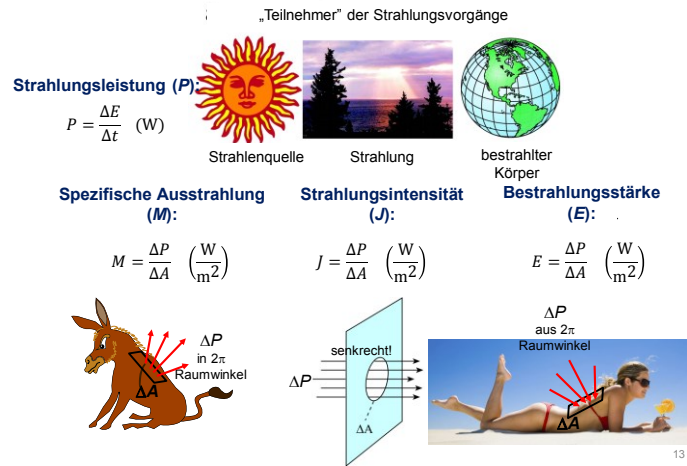
11

### IV. Energietransport im Licht (in Strahlungen)



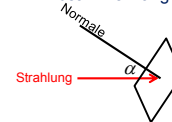
12

## a) Größen zur Beschreibung des Energietransports:

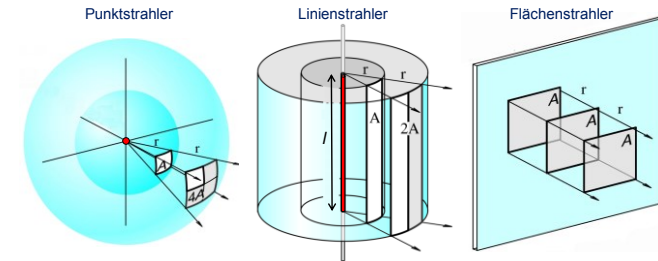


13

## ▪ Zusammenhang zwischen $J$ und $E$ : ?



## b) Strahlungsquellen mit verschiedener Geometrie:



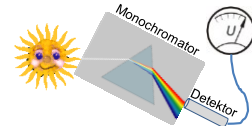
$J(r)$  ?

14

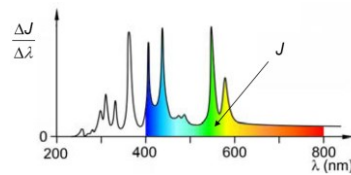
## V. Lichtemission

### 1. Emissionsspektrometrie

Analyse des emittierten (ausgestrahlten) Lichts



#### a) Emissionsspektrum

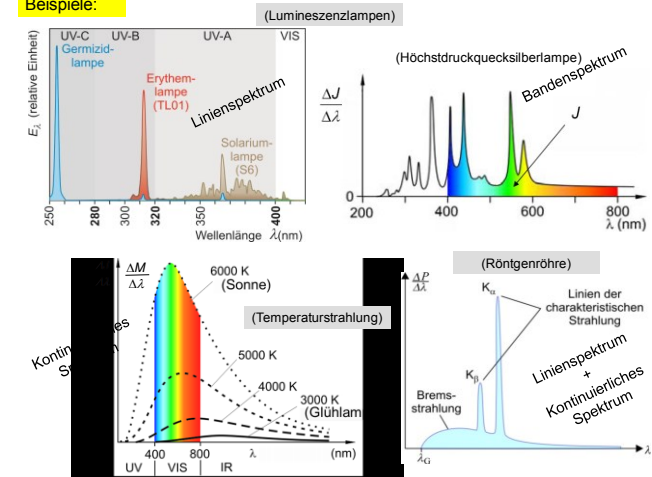


Spektrumtypen:

- Linienspektrum
- Bandenspektrum
- Kontinuierliches Spektrum

15

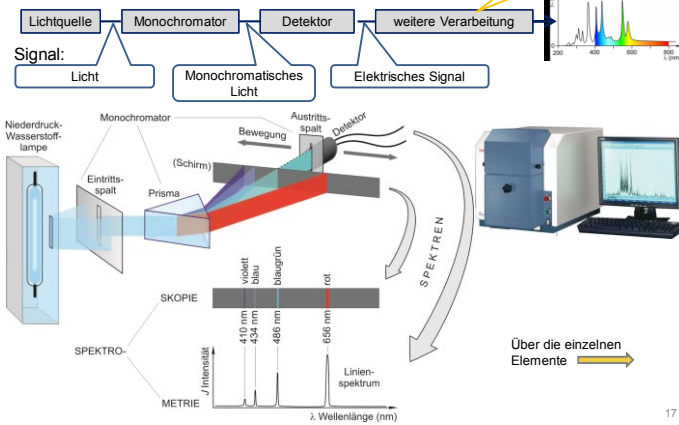
### Beispiele:



16

## b) Messung des Emissionsspektrums

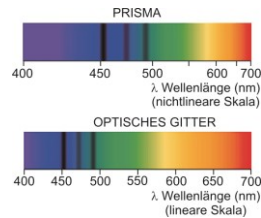
Aufbau eines Emissionsspektrometers:



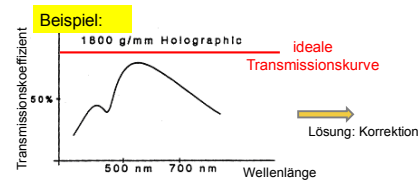
17

Technische Probleme bei den Monochromatoren:

- Wellenlängeskala



- Transmissionskurve (Frequenzgang)



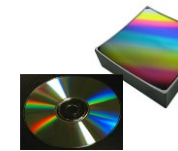
19

## c) Monochromator

- Prisma

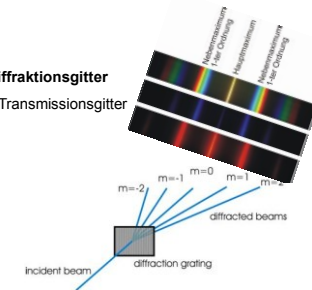
Funktionsprinzip:

Dispersion



- Diffractionsgitter

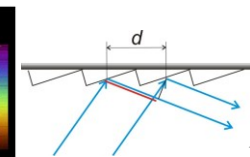
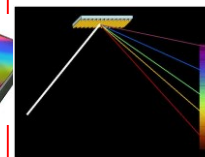
— Transmissionsgitter



- Reflexionsgitter

Funktionsprinzip:

Interferenz

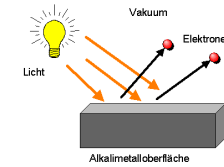


18

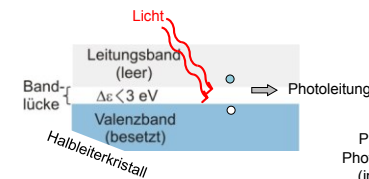
## d) Lichtdetektor

- Photomultiplier (PM) (Sekundärelektronenvervielfacher – SEV):

Prinzip: äußerer lichtelektrischer Effekt



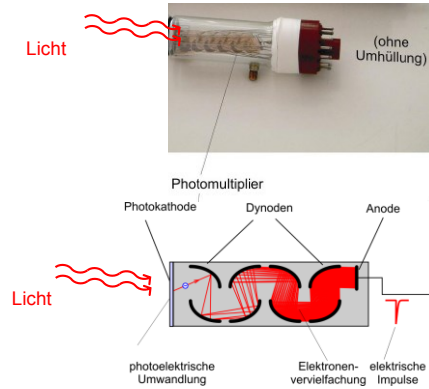
- Photodiode:



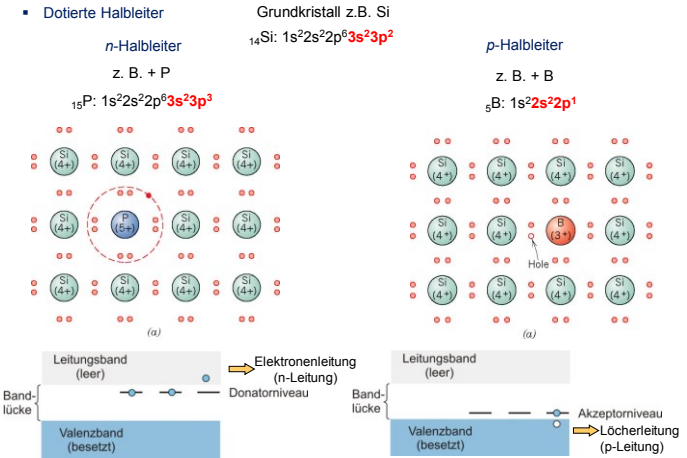
Prinzip: Photoleitung (innerer lichtelektrischer Effekt)

20

**Photomultiplier (PM)**  
(Sekundärelektronenvervielfacher – SEV):



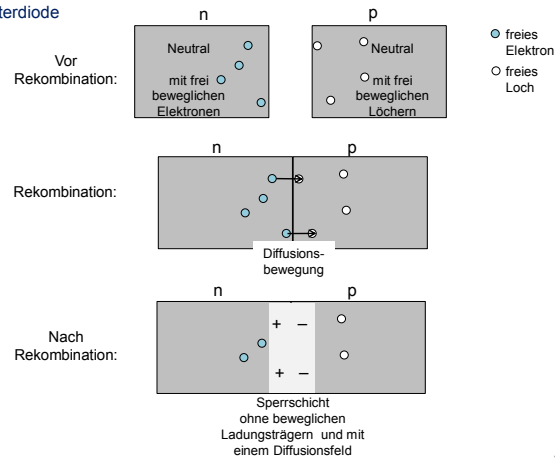
21



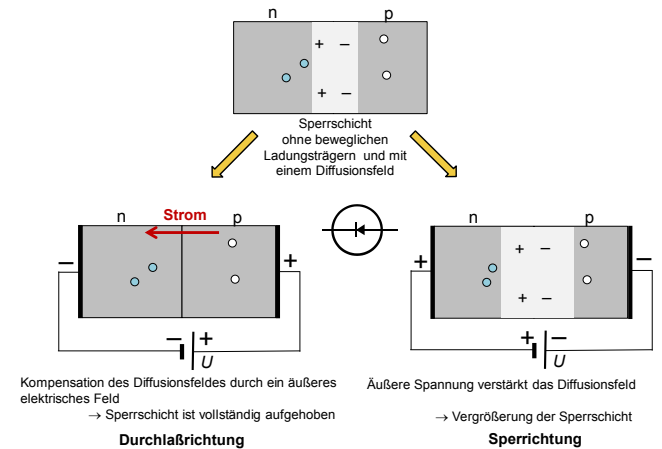
22

▪ Anwendungen der dotierten Halbleiter

○ Halbleiterdiode

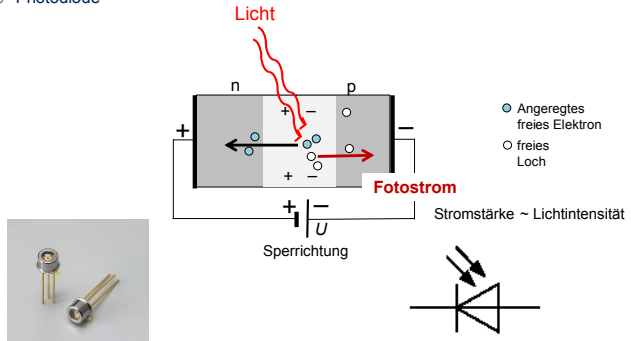


23



24

o Photodiode



(Es gibt auch lichtemittierende Dioden → siehe Leuchtdioden, LED)

25

Hausaufgaben: Aufgabensammlung

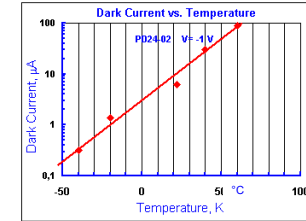
2.1, 3-5, 7, 8, 31, 32, 38-40, 42, 45



27

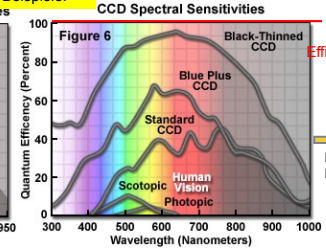
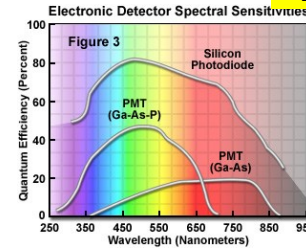
Technische Probleme bei den Lichtdetektoren:

- Dunkelstrom/Rauschen



- Effizienzkurve (Empfindlichkeitskurve)

Beispiele:



26