

Vorlesung 1

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

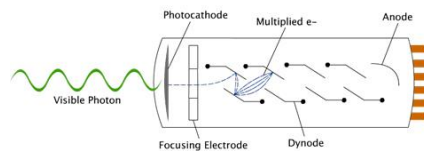
(I) Strahlung

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

Strahlung

- Klinisches Wörterbuch Pschyrembel: „Form der Energieausbreitung“
- Alle Strahlungen...
 - ...transportieren Energie, die in andere Energieformen umgewandelt werden kann
 - ...können mit Materie in Wechselwirkung treten
 - ...weisen einen Wellen- und einen Teilchencharakter auf, der unterschiedlich stark ausgeprägt ist (auch mechanische Wellen)
- Alle Detektionsverfahren von Strahlungen beruhen auf der Wechselwirkung der Strahlung mit dem Detektor

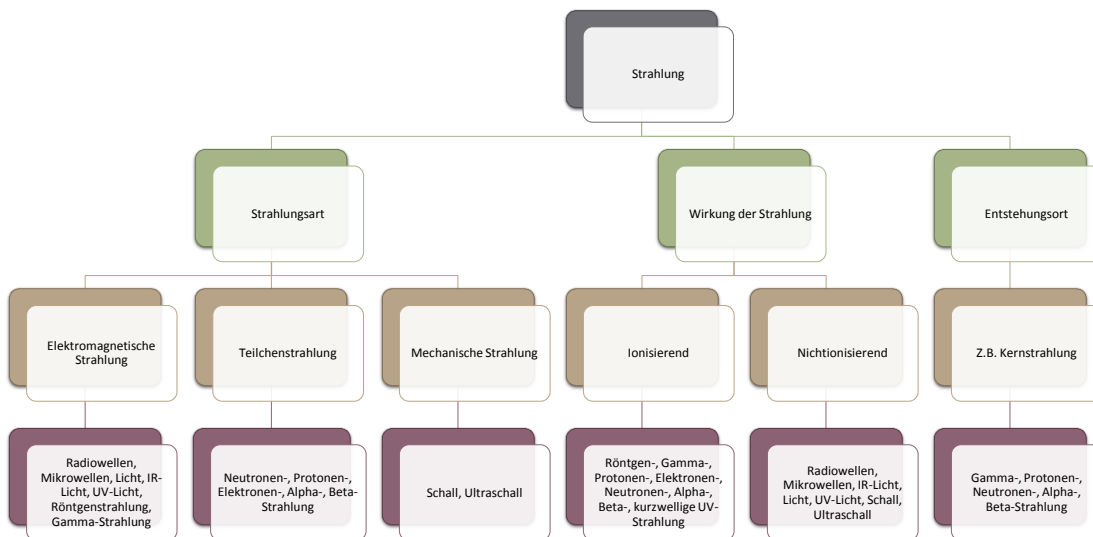


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://niefmney.com/science/>

3

Einteilung von Strahlung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

4

Elektromagnetische Strahlung

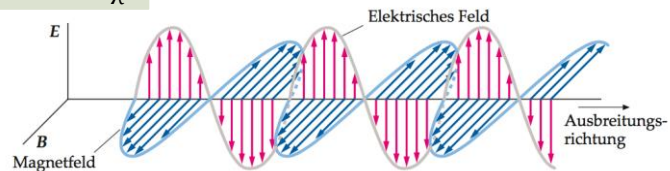
- Besteht aus elektromagnetischen Wellen (Wellen aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern)
- Beschreibt Transversalwellen (Transversalwellen können polarisiert werden)
- Es gilt:

$$c = \lambda \cdot f$$

- Für die Energie des Photons gilt:

c : Lichtgeschwindigkeit
 λ : Wellenlänge
 f : Frequenz
 h : Planck'sches Wirkungsquantum
 ε : Energie des Photons

$$\varepsilon = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Komme: Christoph (2011): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., Fig. 1. Jenny Wagner, Springer Spektrum

5

Energiebereiche elektromagnetischer Strahlung

W: Wellencharakter
 T: Teilchencharakter

Bereich	W/T	λ/ε (Größenordnung)	Anwendung
Gamma-Strahlung	T	MeV	Gamma-Messer
Röntgen-Strahlung	T	keV	Röntgendiagnostik
UV-Licht	T	eV	UV-Phototherapie
VIS-Licht	W/T	eV	Mikroskopie/Sehen
IR-Licht	W	μm	IR-Diagnostik
Mikrowellen	W	mm	MRT
Radiowellen	W	m – km	Radiokommunikation

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

6

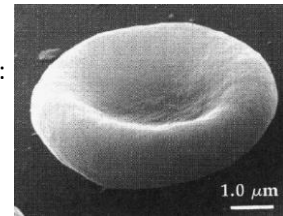
Teilchenstrahlung

- Teilchenstrahlung hat sowohl einen Teilchen- als auch einen Wellencharakter
- Mit Hilfe der **De Broglie**-Beziehung kann jedem Teilchen eine Wellenlänge zugeordnet werden:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}$$

h : Planck'sches Wirkungsquantum
 m : Masse des Teilchens
 v : Geschwindigkeit des Teilchens
 p : Impuls des Teilchens

- Strahlung besteht aus realen Teilchen (z.B. Elektronen)
- Teilchenstrahlung findet in vielen technischen Geräten Anwendung, z.B.:
 - Elektronenmikroskop
 - Strahlentherapie
 - Neutronendiffraktion



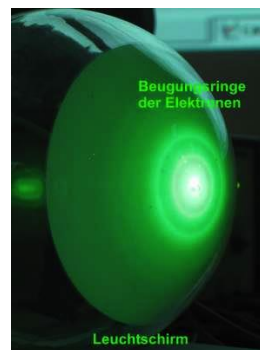
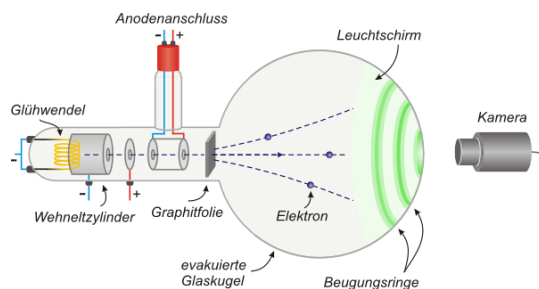
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://daten.digitale-uni-bayreuth.de/dm/elektronenmikroskopischebilder/elektronenmikroskopischebilder.jpg>

7

Elektronenbeugung – Wellencharakter

- Elektronen besitzen neben ihrem Teilchen- auch einen Wellencharakter, wie sich in diesem Versuch zeigt
- Ein Elektronenstrahl wird auf eine Graphitfolie geschossen, an der dieser gebeugt wird



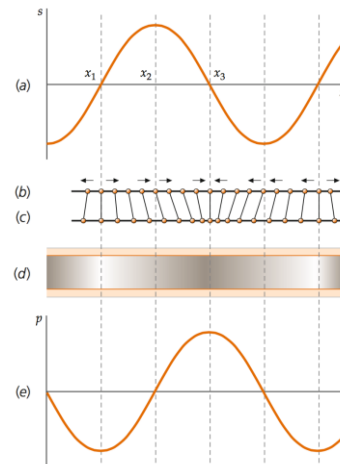
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://le.uni-goettingen.de/leu/07/569>

8

Mechanische Wellen

- Sind unbedingt an die Bewegung von Materie gebunden (benötigen einen Träger)
- Bewegung von Materiestücken z.B.:
 - Wasserwellen (Wasser)
 - Schallwellen (Luft)
- Können sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen darstellen
- Mechanische Longitudinalwellen können sich in jedem Medium ausbreiten, mechanische Transversalwellen nur in Festkörpern
- Mit der Ausbreitung der Wellen ist ein Energie-transport, aber kein Materietransport verbunden



(a) Auslenkung der Luftmoleküle, (b) Moleküle in der Gleichgewichtslage, (c) Positionen der Moleküle nach Eintreffen der Schallwelle, (d) Dichte der Luft in der harmonischen Schallwelle, (e) Druckänderung

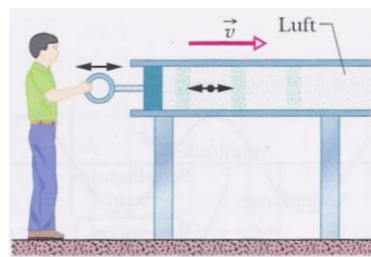
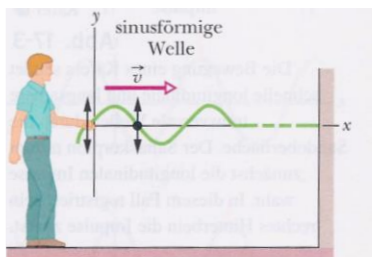
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2011): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hg. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

9

Longitudinal- und Transversalwellen

- Abhängig davon, wie die Auslenkungsrichtung (Schwingungsrichtung) und die Wellenausbreitungsrichtung zueinander stehen, unterscheidet man Longitudinal- und Transversalwellen
- **L**ongitudinalwellen: Schwingungsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung
- **T**ransversalwellen: Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physik: Halliday, Resnick, Walker: WILEY-VCH

10

Mechanische Strahlung

- Es gilt folgender Zusammenhang:

$$c = \lambda \cdot f$$

Beachte: c ist nicht die Lichtgeschwindigkeit, sondern die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in einem Medium, z.B. die Schallgeschwindigkeit.

- Wichtige Frequenzbereiche dieser Strahlung:
 - Infraschall (< 20 Hz)
 - Hörschall (20 – 20000 Hz)
 - Ultraschall (20000 – 10^9 Hz)
 - Hyperschall (> 10^9 Hz)

- Schallgeschwindigkeit in Luft: $c_{\text{Schall}} = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Anwendungen: Sonographie, Hören



Quelle: http://www.dr-verena-moesch.de/ultra3d/ultra3d_02.html

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

11

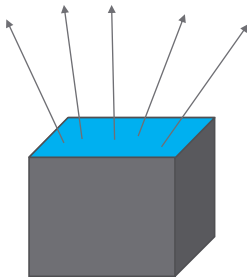
Spezifische Ausstrahlung (M)

- Charakterisiert die Strahlungsquelle
- Gibt den Energiebetrag an, der aus einer bestimmten Fläche in einer bestimmten Zeit von einem Körper abgegeben wird:

$$M = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot A} \left[\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

$$M = \frac{\Delta P}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Beachte: $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2013)

12

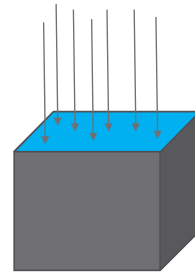
Strahlungsintensität (J)

- Charakterisiert die **Strahlung**
- Gibt den Energiebetrag an, der senkrecht auf eine bestimmte Fläche in einer bestimmten Zeit trifft:

$$J = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot A} \left[\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

$$J = \frac{\Delta P}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

- Wird auch als **Leistungsdichte oder Energiestromdichte** bezeichnet



Quelle: Karim Kouz (November 2013)

13

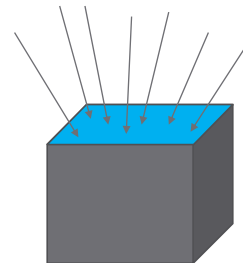
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Bestrahlungsstärke (E)

- Charakterisiert den **bestrahlten Körper**
- Gibt den Energiebetrag an, der auf eine bestimmte Fläche eines Körpers in einer bestimmten Zeit trifft:

$$E = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot A} \left[\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

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



Quelle: Karim Kouz (November 2013)

14

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Strahlungsquellentypen

- Strahlungsquellen werden abhängig von ihrer Geometrie unterschiedlich bezeichnet:
 - Punktstrahler
 - Linienstrahler
 - Flächenstrahler
- Zudem unterscheiden sie sich in ihrer Abnahme der Strahlungsintensität mit wachsendem Abstand
- Es wird unterschieden zwischen:
 - Isotropen Strahlern (Strahler strahlt gleichmäßig in alle Raumrichtungen)
 - Anisotropen Strahlern (Strahler strahlt nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

15

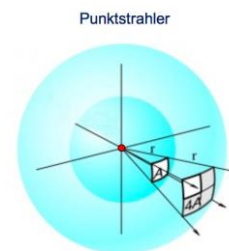
Punktstrahler

- Die Leistung verteilt sich auf die geometrische Form einer Kugel
- Die Intensität nimmt mit wachsendem Abstand wie folgt ab:

$$J = \frac{\Delta P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \sim \frac{1}{r^2}$$

Oberfläche einer Kugel: $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$

- Beispiel: Röntgenröhre (strahlt jedoch in den Raum einer Halbkugel)



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2016 Sommersemester

16

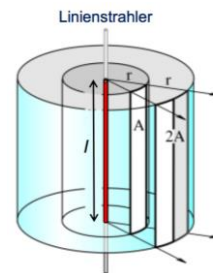
Linienstrahler

- Die Leistung verteilt sich auf die geometrische Form eines Zylinders
- Die Intensität nimmt mit wachsendem Abstand wie folgt ab:

$$J = \frac{\Delta P}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \sim \frac{1}{r}$$

Mantelfläche eines geraden Kreiszylinders: $M = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$

- Beispiel: Leuchtröhre



Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2016 Sommersemester Universität

17

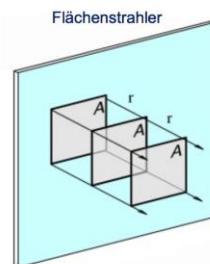
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Flächenstrahler

- Die Leistung/Intensität bleibt mit wachsendem Abstand konstant, solange das Strahlenbündel eine geringe/keine Divergenz aufweist (also alle Strahlen parallel laufen):

$$J = \text{konstant}$$

- Beispiel: Laserstrahl (unter Vernachlässigung der recht geringen Divergenz)



Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2016 Sommersemester Universität

18

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

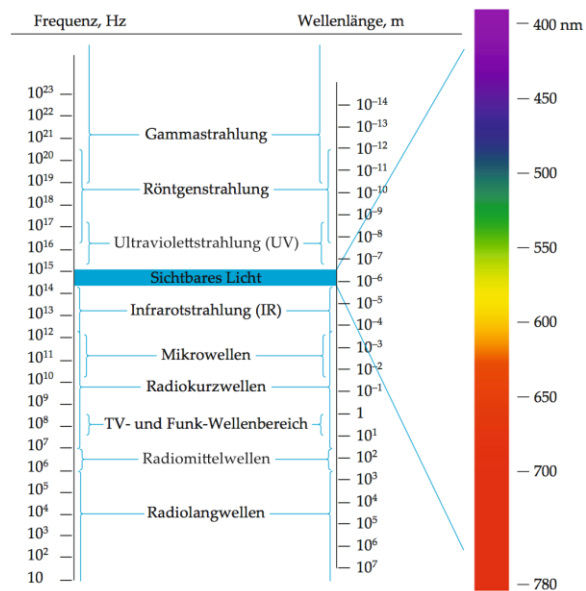
(II) Licht und Lichtdetektoren

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

Licht

- Das sichtbare Spektrum des Lichts umfasst den Wellenlängenbereich von ca. 380 nm – 780 nm (VIS-Bereich)
- Der Bereich unterhalb des sichtbaren Bereichs ist der UV-Bereich:
 - UV-C: 100 nm – 280 nm
 - UV-B: 280 nm – 315 nm
 - UV-A: 315 nm – 400 nm
- Der Bereich oberhalb des sichtbaren Bereichs ist der IR-Bereich



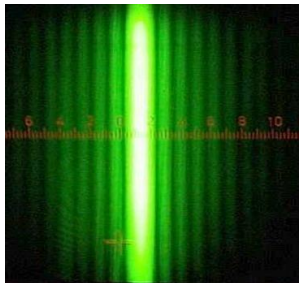
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hg. v. Jerry Wagner. Springer Spektrum

20

Licht: Wellen- & Teilchendualismus

- Mit Hilfe von bestimmten Experimenten kann sowohl der Wellen- als auch der Teilchencharakter des Lichtes gezeigt werden
- Wellencharakter: Spalt- oder Gitterexperimente (Beugung des Lichts)
- Teilchencharakter: Lichtelektrischer Effekt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

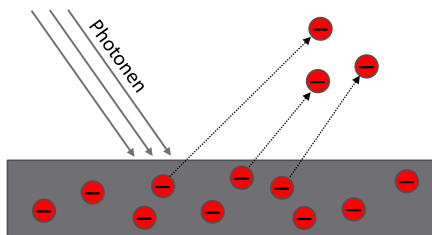
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Albert_Einstein_Nobel.jpg

21

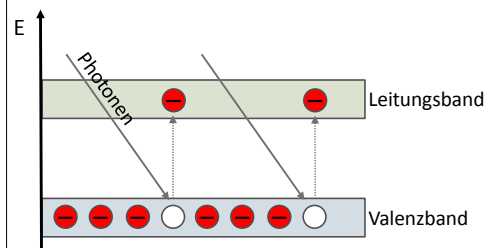
Lichtelektrischer Effekt

Man unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Erscheinungen:

- **Äußerer** lichtelektrischer Effekt: Herauslösen von Elektronen aus Metallen oder Halbleitern beim Bestrahlen mit Licht genügend hoher Energie



- **Innerer** lichtelektrischer Effekt: Zunahme der Leitfähigkeit von Halbleitern durch Erzeugung von nicht aneinander gebundenen Elektronen-Loch-Paaren durch Bestrahlung mit Licht



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2015)

22

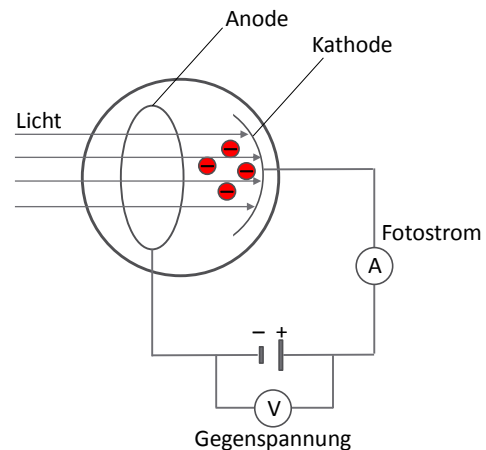
Versuch: Gegenfeldmethode

Durchführung:

1. Licht unterschiedlich großer Intensität wird auf die Kathode gerichtet
2. Licht unterschiedlich großer Frequenz wird auf die Kathode gerichtet

Beobachtung:

- Licht löst den äußeren lichtelektrischen Effekt aus
- Die austretenden Elektronen erreichen die Anode und ein Stromfluss ist messbar (= Fotostrom)
- Mit zunehmender Gegenspannung (zunehmende negative Ladung der Anode) erreichen immer weniger Elektronen die Anode
- Der Stromfluss nimmt mit zunehmender Gegenspannung ab



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2015)

23

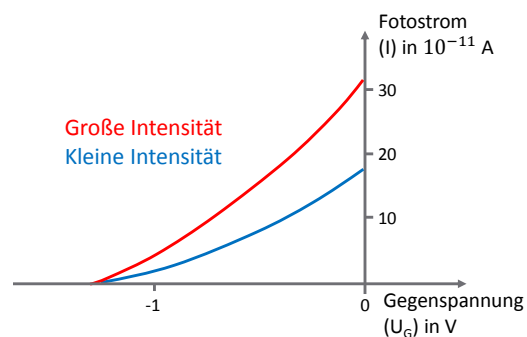
Gegenfeldmethode – Lichtintensität

Beobachtung:

- Bei Erhöhung der Lichtintensität erhöht sich die gemessene Stromstärke
- Unabhängig von der gewählten Lichtintensität ist immer ab der gleichen Gegenspannung kein Strom mehr messbar

Auswertung:

- Die Intensität des Lichtes bestimmt die Anzahl der pro Zeiteinheit ausgelösten Elektronen
- Je mehr Elektronen ausgelöst werden, desto größer ist der Fotostrom
- Der auf das einzelne Elektron übertragene Energiebetrag ist **unabhängig** von der Intensität



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

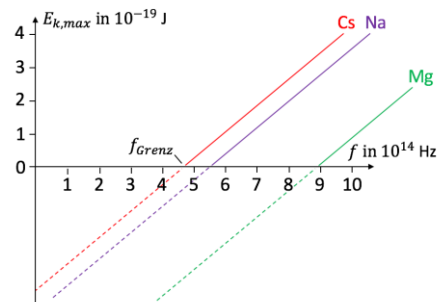
Quelle: in Anlehnung an: Impulse Physik 11/12, W. Breithaus, Ernst Klett Verlag Stuttgart

24

Gegenfeldmethode – Frequenz

• Beobachtung:

- Erst ab einer bestimmten Frequenz (Grenzfrequenz) ist die Auslösung von Elektronen zu beobachten – diese ist abhängig vom Kathodenmaterial
- Mit wachsender Frequenz des Lichtes wächst auch die Energie (die überwindbare Gegenspannung) der ausgelösten Elektronen
- Alle Messwerte eines Materials liegen auf einer Geraden – alle Geraden besitzen dieselbe Steigung



$$E_{kin max} = e \cdot U_G$$

• Auswertung:

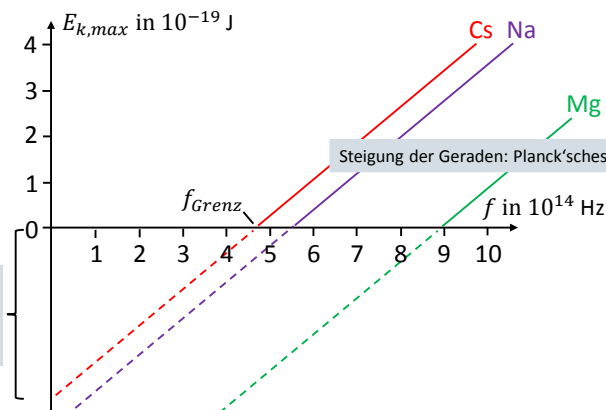
- Beim lichtelektrischen Effekt erhält das einzelne Elektron einen Energiebetrag, der von der Frequenz des Lichts abhängt
- Je höher die Frequenz, desto größer ist der Energiebetrag

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Angelehnt an Impulse Physik 11/12, W. Biedenhauer, Ernst Klett Verlag Stuttgart

25

Gegenfeldmethode – Frequenz



Austrittsenergie des jeweiligen Materials: Die Energie, die nötig ist, um ein Elektron aus der Kathode herauszulösen.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Angelehnt an Impulse Physik 11/12, W. Biedenhauer, Ernst Klett Verlag Stuttgart

26

Zusammenfassung lichtelektrischer Effekt

- Die maximale kinetische Energie der ausgelösten Elektronen hängt nicht von der Lichtintensität ab
- Die auf ein ausgelöstes Elektron übertragene Energie wächst mit der Frequenz des Lichtes
- Die Planck'sche Konstante $h = 6,5 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ verknüpft Frequenz und Energie
- Die Energie eines Photons lässt sich mit folgender Formel berechnen:

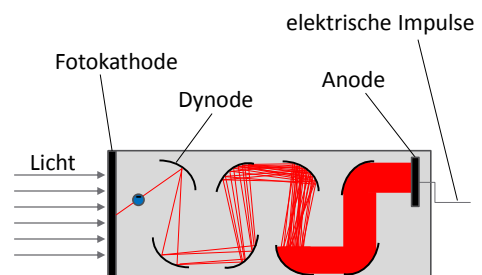
$$\varepsilon = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

27

Photomultiplier

- Photomultiplier = Sekundärelektronenvervielfacher
1. Licht trifft auf die Fotokathode
 2. **Äußerer** lichtelektrischer Effekt wird ausgelöst
 3. Elektronen treten auf **beiden** Seiten der Kathode aus
 4. Elektronen werden auf der Seite der Dynoden (Metallplatten) mit **steigender** Beschleunigungsspannung beschleunigt
 5. Es werden immer mehr Elektronen von Dynode zu Dynode herausgelöst (Sekundärelektronen), da die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen stetig zunimmt (Multiplier)
 6. Elektronen werden am Ende an der Anode in Form von kurzen Spannungsimpulsen registriert



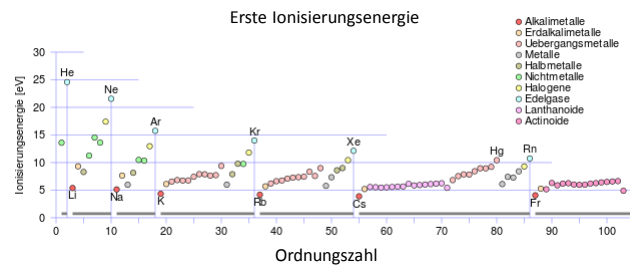
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2015)

28

Photomultiplier – Details

- Fotokathode besteht aus Alkalimetall-Legierung:
 - Legierungen sind gegenüber Umwelteinflüssen beständiger
 - Alkalimetalle weisen geringere Austrittsarbeiten auf, wodurch Elektronen einfacher herausgelöst werden können



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach <http://www.flickr.com/photos/7388341@N02/883092/>; <http://de.wikipedia.org/wiki/Ionisierungsenergie>

29

Photomultiplier – Details

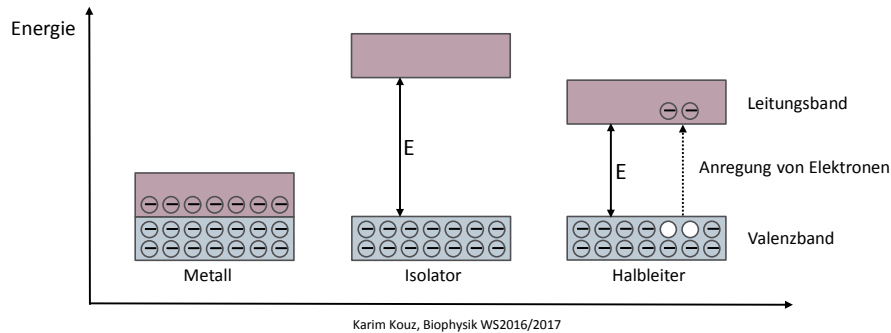
- Die Amplitude des Spannungsimpulses hängt von der Photonenenergie ab:
 - Je größer die Photonenenergie, desto mehr Sekundärelektronen entstehen und desto höher ist der Stromfluss und der damit am Widerstand messbare Spannungsimpuls
 - Die Amplitude ist zudem auch von der Dynodenspannung abhängig
- Totzeit des Gerätes:
 - Die Zeit, in der das Gerät – trotz einfallender Photonen – diese nicht registriert, da bereits ein anderes Photon den „Registrierungsprozess“, der ca. 1 ns dauert, durchläuft

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

30

Halbleiter

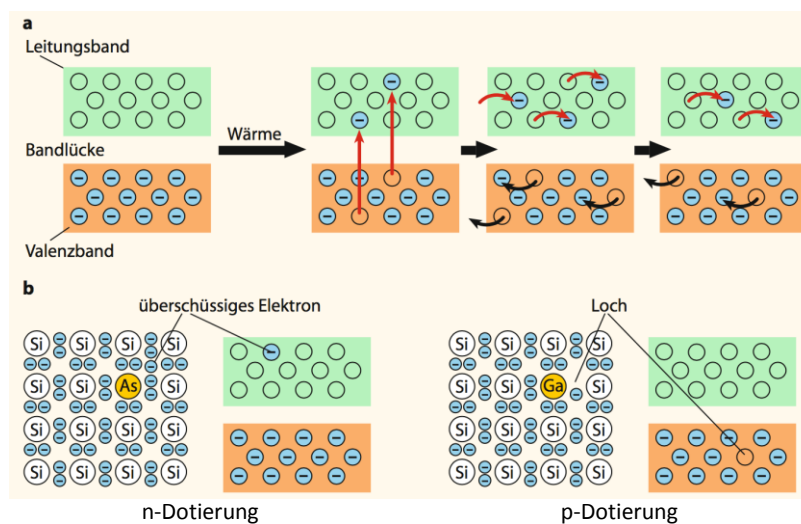
- Stoffe, bei denen das Valenzband voll besetzt und das Leitungsband leer ist
- Leiten unter den oben genannten Bedingungen (liegen bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes vor) keinen Strom = Isolator
- Der Abstand von Valenz- und Leitungsband ist jedoch klein genug, um Elektronen unter Energieeinfluss auf das Leitungsband zu heben = Leiter



Quelle: Angelehnt an <http://www.chem.tu-freiberg.de/~isohme/materialien/halbleiter/gr/halbleiter1.gif>

31

Dotierung von Halbleitern



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer, Spektrum Vorlag

32

Begriffe

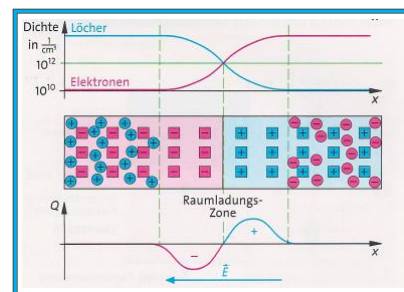
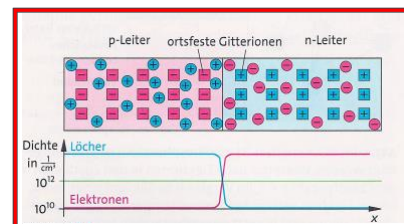
- (Elementar)Halbleiter: Elemente aus der 4. Hauptgruppe, die eine stark von der Temperatur abhängige Leitfähigkeit aufweisen (z.B. Silicium)
- Dotieren: Einbringen von Fremdatomen in einen anderen Atomverband
- p-Dotierung: Einbringen von 3-wertigen Elementen (Akzeptoren) in das Gitter des Halbleiters
- n-Dotierung: Einbringen von 5-wertigen Elementen (Donatoren) in das Gitter des Halbleiters
- Diode: Zusammenbringen eines p- und eines n-dotierten Halbleiters

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

33

Rekombination

- Zustand **vor** Rekombination:
 - p- und n-Leiter sind neutral geladen
 - Über die gesamte Diode sind freie Ladungsträger verteilt
- Zustand **nach** Rekombination:
 - p- und n-Leiter sind – sofern sie alleine betrachtet werden – geladen
 - Die gesamte Diode ist jedoch neutral geladen
 - In der Raumladungszone sind keine freien Ladungsträger mehr vorhanden



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Metaller Physik 4, Auflage J. Grehn, J. Braun, Schroedel Verlag

34

Rekombination – Details

- Beim Zusammenbringen der beiden dotierten Halbleiter findet Rekombination statt:
 - Die frei beweglichen Elektronen des n-dotierten Halbleiters „fallen“ in die Löcher des p-dotierten Halbleiters
 - Bei diesem Vorgang fließt kurzzeitig ein Strom (bewegte Ladungsträger) = Diffusionsstrom
 - Durch die Umverteilung der Ladungsträger baut sich ein elektrisches Feld = Diffusionsfeld mit Potenzialdifferenz = Diffusionsspannung auf
 - Das sich aufbauende Diffusionsfeld wirkt dem Stromfluss entgegen, sodass dieser nach kurzer Zeit stoppt (daher rekombinieren nicht alle freien Ladungsträger)
 - Durch den Vorgang ist in der Mitte der Diode eine entleerte/ladungsträgerarme Zone entstanden = Sperrzone
- Anlegen einer externen Spannung an die Diode:
 - Pluspol an p-dotierten, Minuspol an n-dotierten Teil: Durchlassrichtung
 - Pluspol an n-dotierten, Minuspol an p-dotierten Teil: Sperrrichtung

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

35

Polung der Diode

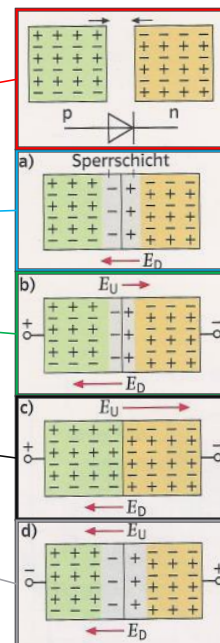
p- und n-dotierter Halbleiter vor Rekombination

Zustand nach Rekombination mit Diffusionsfeld E_D

Anlegen einer externen Spannung in Durchlassrichtung und Aufbau eines elektrischen Feldes der Stärke E_U , das E_D entgegen gerichtet ist: Verkleinerung der Sperrschicht

Kompensation des Diffusionsfeldes durch das elektrische Feld E_U : Sperrschicht ist vollständig aufgehoben

Anlegen einer externen Spannung in Sperrrichtung und Aufbau eines elektrischen Feldes der Stärke E_U , das gleichgerichtet ist mit E_D : Vergrößerung der Sperrschicht



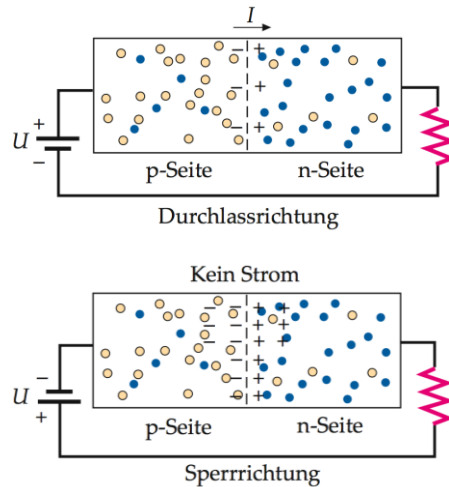
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Impulse Physik 11/12, 1. Auflage, Klett Verlag

36

Polung der Diode – Details

- Durchlassrichtung:
 - Die freien Ladungsträger werden in die Mitte der Diode „gedrückt“ und stehen zum Leiten des Stroms zur Verfügung
 - Die Sperrzone ist verkleinert/aufgehoben
 - Die Diode leitet den Strom
- Sperrrichtung:
 - Die freien Ladungsträger werden an die Außenseite der Diode „gezogen“
 - Die Sperrzone ist vergrößert
 - Die Diode leitet den Strom (ohne äußere Einflüsse) nicht (CAVE: Sperrstrom)



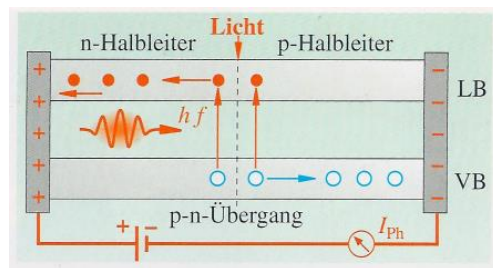
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure 7. Auflig. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

37

Fotodiode

- In Sperrrichtung gepolte Diode
- Fällt Licht ausreichender Energie auf die Sperrzone, so kann dies den inneren lichtelektrischen Effekt auslösen
- Dieser hebt die Elektronen aus ihren Löchern (Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband), sodass diese jetzt für den Stromfluss zur Verfügung stehen
- Elektronen kehren zum n-dotierten Teil, Löcher zum p-dotierten Teil zurück
- Solange der Lichteinfall vorhanden ist, leitet die Fotodiode den Strom
- Der Fotostrom ist proportional zur Lichtintensität



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physik Gesamtaum Gesamtband Sek II; Don, Rüdiger; Schroedel

38

Technische Probleme der Lichtdetektoren

- Dunkelstrom/Rauschen/(Sperrstrom):

- Auch wenn kein Licht auf die Fotodiode fällt, ist ein Stromfluss messbar = Dunkelstrom
- Der Fotostrom ist stark abhängig von der Umgebungstemperatur und mit Hilfe der Boltzmann-Statistik erklärbar:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{k \cdot T}}$$

- Ist die Umgebungstemperatur des Messgeräts hoch genug, so können:
 - Elektronen das Metall spontan verlassen (thermische Emission von Elektronen)
 - Auf höhere Energieniveaus angehoben werden, was schließlich zu einem Dunkelstrom führt
- Maßnahme: Kühlen der Detektoren

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

39

Technische Probleme der Lichtdetektoren

- Effizienzkurve der Detektoren:

- Die Empfindlichkeit der Detektoren hängt von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ab
- Einige Wellenlängen werden „besser“ detektiert als andere – dies führt zur Verfälschung/Verzerrung der Messung

- Maßnahme: Sofern der Messfehler bekannt ist, kann diesem durch mathematische Korrektur einfach entgegengewirkt werden (gemessenes Spektrum wird durch Fehlerkurve korrigiert)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

40

(III) Optik

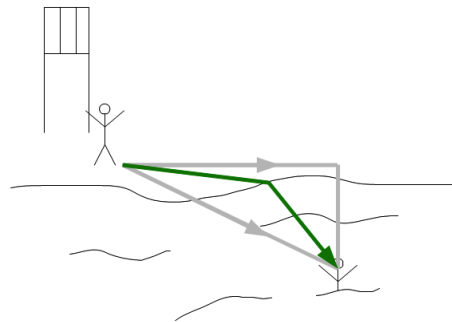
Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

Fermatsches Prinzip

- Die Lichtgeschwindigkeit ist in verschiedenen Medien unterschiedlich groß
- Der Weg, den das Licht nimmt, um von einem Punkt zu einem anderen zu gelangen, ist stets so, dass die dafür benötigte Zeit minimal ist

Der Rettungsschwimmer ist schneller am Ziel, wenn er einen längeren Weg am Strand läuft und nur einen kurzen Weg schwimmt. Obwohl der Weg so insgesamt länger ist, als der direkte Weg zum Ziel, ist er zeitlich kürzer, da weniger Zeit mit dem langsameren Schwimmen verbracht wird.



Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Fermatsches_Prinzip

Brechungsindex (n)

- Gibt an, um welchen Faktor die Wellenlänge und die Phasengeschwindigkeit des Lichts kleiner sind als im Vakuum
- Beachte:
 - Da $c_0 \geq c_M$ ist $n \geq 1$
 - n ist dimensionslos

$$n = \frac{c_0}{c_M}$$

n : Brechungsindex/Brechzahl
 c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
 c_M : Lichtgeschwindigkeit im Medium

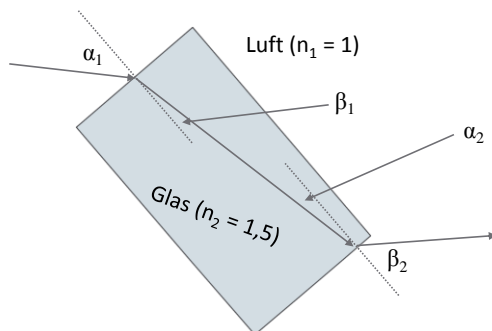
- Beispiel:
 - $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 - $c_{\text{Wasser}} \approx 2,25 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$$n_{\text{Wasser}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,25 \cdot 10^8} = 1,3$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

43

Lichtbrechung (Refraktion)

- Beim Durchgang von Licht durch eine Grenzfläche zweier Ausbreitungsmedien ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Welle – es findet Brechung statt



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = n_{21} = \frac{c_1}{c_2}$$

- $n_1 < n_2$: Strahl wird zum Lot hingebrochen
- $n_1 > n_2$: Strahl wird vom Lot weggebrochen
- Die Frequenz einer Welle verändert sich bei dem Übergang von einem Medium in ein anderes nicht, die Wellenlänge verändert sich
- Beim senkrechten Einfall des Strahls findet keine Brechung statt

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

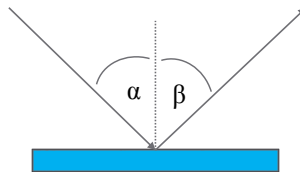
Quelle: Karim Kouz (September 2014)

44

Reflexion

- Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Ausbreitungsmedien (z.B. Licht auf Luft-Glas-Grenzfläche), so wird die Welle reflektiert
- Das Reflexionsgesetz stellt diesen Zusammenhang für ebene Wellen dar:

$$\alpha = \beta \text{ (Einfallswinkel = Ausfallswinkel)}$$



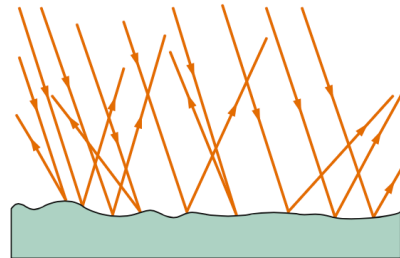
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

45

Reflexion

- Das Reflexionsgesetz stellt einen Idealfall dar, der in Wirklichkeit nicht vorkommt, da es keine perfekt reflektierenden Oberflächen gibt
- Ein Teil der Lichtstrahlen folgt also nicht dem Gesetz
- Arten der Reflexion:
 - Gerichtete Reflexion (ideale Reflexion)
 - Diffuse Reflexion (matte Oberflächen reflektieren Lichtstrahlen in jede Richtung und nicht unbedingt gleichmäßig)
 - Gemischte Reflexion (sowohl gerichtet als auch diffus)



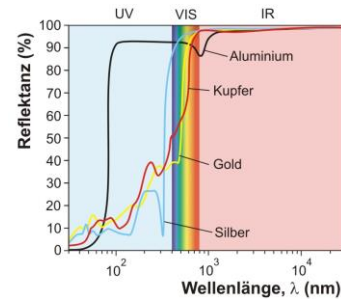
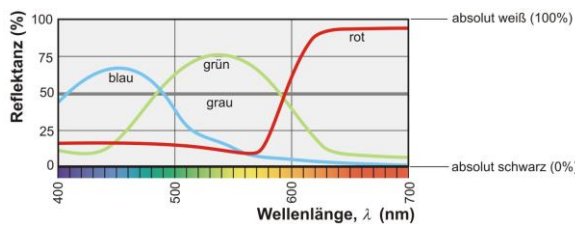
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hb. v. Jerry Wagner. Springer Spektrum

46

Reflexionskoeffizient (ρ)

- Der Reflexionskoeffizient ist neben der Wellenlänge auch von dem reflektierenden Material und dem Einfallswinkel abhängig
- Die Materialabhängigkeit ist der Grund dafür, warum Gegenstände farbig, weiß oder schwarz erscheinen
- Als Reflexionsspektrum bezeichnet man die Auftragung von ρ gegen λ



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik | Sommersemester Universität Bayreuth WS2016

49

Totalreflexion

- Ein Lichtstrahl, der aus einem optisch dichteren Medium auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium fällt, wird vom Einfallslot weggebrochen (Brechungswinkel ist größer als Einfallswinkel)
- Bei einem bestimmten Einfallswinkel verläuft der gebrochene Strahl parallel zur Grenzfläche = Grenzwinkel der Totalreflexion/kritischer Winkel
- Wird der Grenzwinkel überschritten, so wird die Welle nahezu vollständig reflektiert und kaum (nicht) mehr gebrochen
- Vor dem Erreichen des kritischen Winkels wird das einfallende Licht teilweise gebrochen und zu einem gewissen Teil bereits reflektiert



$$\alpha_{krit} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

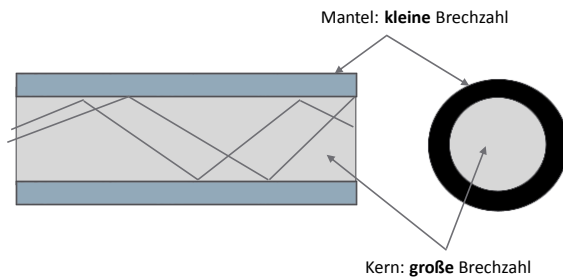
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik | Sommersemester Universität Bayreuth WS2012/2013

50

Endoskopie

- Das Phänomen der Totalreflexion wird bei der Endoskopie verwendet, um Licht über ein Lichtleiterkabel in die zu untersuchenden Körperhöhlen zu bringen



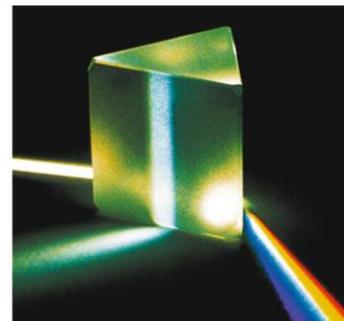
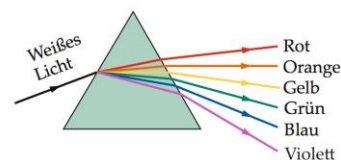
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014); http://de.wikipedia.org/wiki/Endoskopie#/media/Datei:Endoskopie_Faseroptik_kabel.jpg; http://www.online-magazin.org/Endoskopie_Faseroptik_kabel/115/Endoskopie_Faseroptik_kabel/ohne-steckern.html

51

Dispersion

- Licht wird, abhängig von seiner Wellenlänge, unterschiedlich stark gebrochen
- Weißes Licht (polychromatisch) wird mit einem Prisma in seine Spektralfarben zerlegt
- Blaues Licht wird stärker gebrochen als rotes Licht
- Nimmt die Brechzahl mit wachsender Wellenlänge ab, spricht man von normaler Dispersion
- Nimmt die Brechzahl mit wachsender Wellenlänge zu, spricht man von anormaler Dispersion



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., H. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

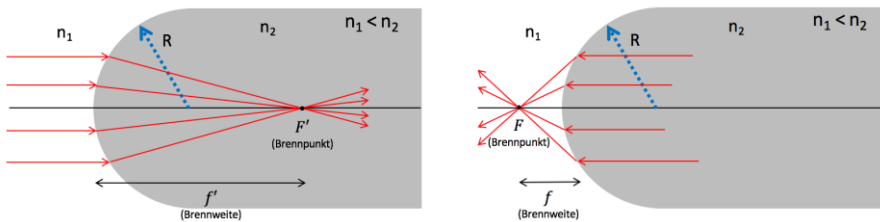
52

Brechung an sphärischen Grenzflächen

- Sphärische Grenzfläche: Grenzfläche ist Ausschnitt einer Kugeloberfläche mit Krümmungsradius R
- Je unterschiedlicher die beiden Medien, desto stärker ist die Brechkraft
- Brechkraft:

$$D = \frac{n_2}{f'} = \frac{n_1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad \left[\frac{1}{\text{m}} = \text{dpt (Dioptrie)} \right]$$

- Positive Brechkraft und positive Brennweite: Fokussierung
- Die Formel gilt nur für achsennahe Strahlen

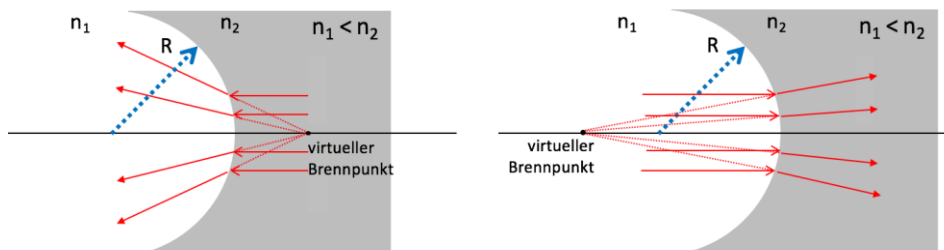


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2016)

53

Brechung an sphärischen Grenzflächen



Negative Brechkraft und negative Brennweite: Zerstreuung

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2016)

54

Brechung an sphärischen Grenzflächen

- Die Brechkraft hängt von den Brechzahlen der beiden Medien und dem Krümmungsradius (R) der sphärischen Grenzfläche ab:

$$D = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$n_2 - n_1$	R	D
+	Konvex (+)	+
+	Konkav (−)	−
−	Konvex (+)	−
−	Konkav (−)	+

- Negative Brechkraft: Streuung der Strahlen
- Positive Brechkraft: Fokussierung der Strahlen
- Für naheliegende Grenzflächen gilt:

$$D_{\text{gesamt}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

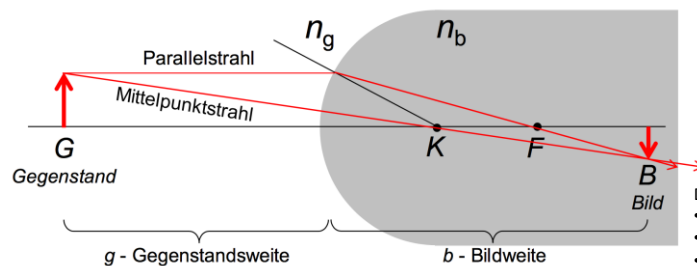
55

Abbildungsgesetz

- Strahlen, die durch den Knotenpunkt K gehen, ändern ihre Richtung nicht (Mittelpunktstrahl)
- Strahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, werden im Brennpunkt fokussiert (Parallelstrahl)
- Abbildungsgesetz:

$$D = \frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b} = \left(\frac{n_g}{f_g} = \frac{n_b}{f_b} \right)$$

Das Abbildungsgesetz gilt nur für achsennahe Strahlen.



Das Bild ist...

- ...umgekehrt
- ...verkleinert
- ...reell

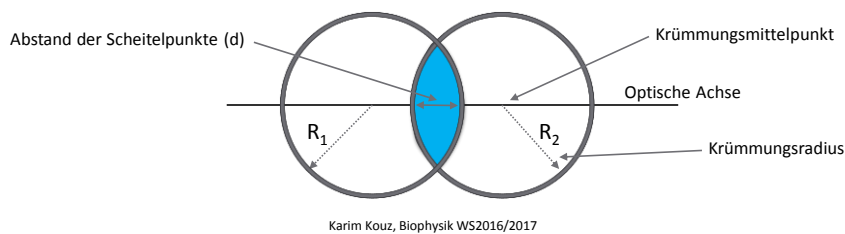
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik, Sommersemester Universität Bayreuth WS2016

56

Linsenoptik: Begriffe

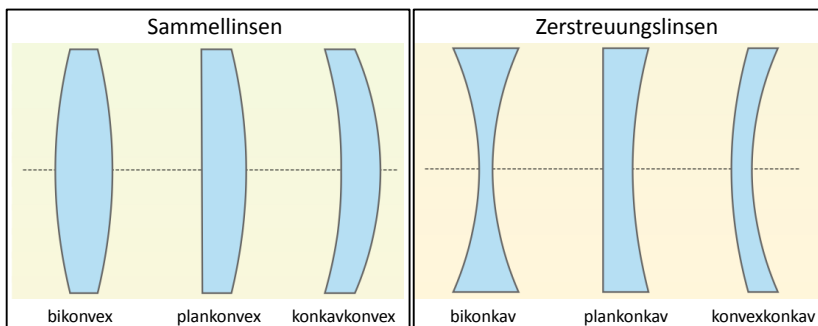
- Linse: optisches Bauelement mit zwei lichtbrechenden Flächen, von denen mindestens eine Fläche konvex oder konkav gewölbt ist
- Konvex: nach außen gewölbt
- Konkav: nach innen gewölbt
- Dünne Linse: Linse mit kleiner Dicke; Krümmung der Grenzflächen ist sehr gering, sodass die Flächen nahe beieinander liegen ($d \ll R_1$ und $d \ll R_2$)
- Sphärische Linse: beide optisch aktiven Flächen der Linse sind Oberflächenabschnitte einer Kugel (vs. asphärische Linsen)



Quelle: Karim Kouz (November 2013)

57

Linsenarten



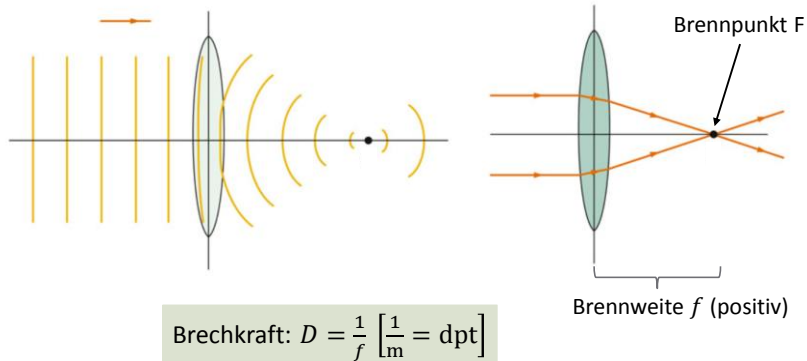
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer, Spektrum Verlag

58

Sammellinse

- Parallel zur optischen Achse einfallende Lichtstrahlen werden in einem Punkt hinter der Linse (Brennpunkt/Fokus) gesammelt



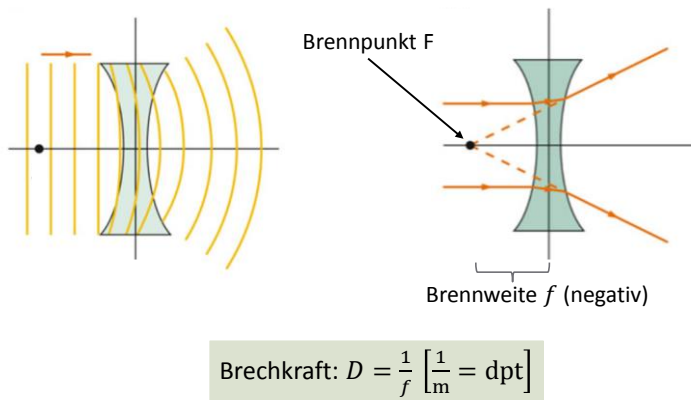
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Armin Wagner, Springer Spektrum

59

Zerstreuungslinse

- Parallel zur optischen Achse einfallende Lichtstrahlen laufen hinter der Linse so auseinander, als kämen sie von einem Punkt auf der Einfallsseite des Lichts



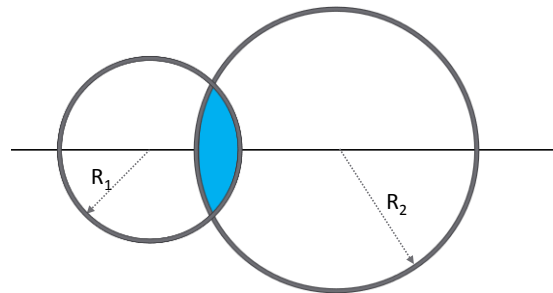
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2013) Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Armin Wagner, Springer Spektrum

60

Linsenschleiferformel

- Gibt an, wie die Brechkraft einer dünnen sphärischen Linse mit ihrer Form zusammenhängt



$$D = \frac{1}{f} = (n_{rel} - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$n_{rel} = \frac{n_{Linse}}{n_{Umgebung}}$$

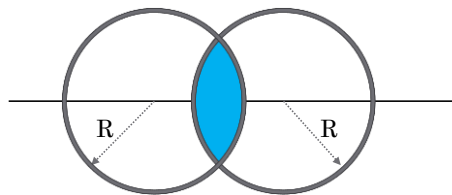
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

61

Linsenschleiferformel

- Eine symmetrische Linse ist eine Linse mit gleich großen Krümmungsradien
- Für symmetrische Linsen kann die Linsenschleiferformel vereinfacht werden



$$D = \frac{1}{f} = (n_{rel} - 1) \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} \right) = \frac{2 \cdot (n_{rel} - 1)}{R}$$

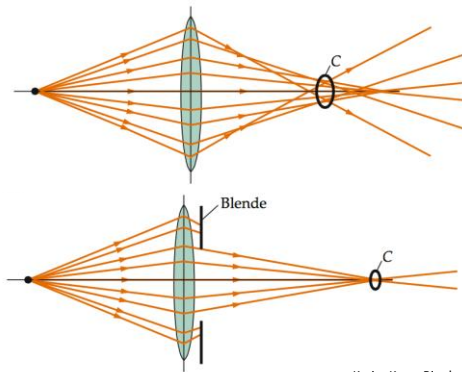
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (November 2014)

62

Linsenfehler – Sphärische Aberration

- Sphärische Aberration = Öffnungsfehler:
 - Schärfefehler
 - Ursache: Teilnahme von achsenfernen Strahlen an der Bildentstehung
 - Ergebnis: Abweichende Brennweite der nicht paraxialen (achsenfernen) Strahlen



Positive sphärische Aberration: Randnahe Strahlen werden stärker gebrochen
Negative sphärische Aberration: Randnahe Strahlen werden schwächer gebrochen

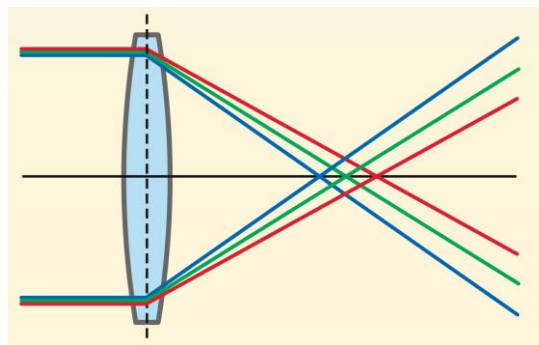
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene: Komme, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hg. v. Jenny Wagner, Springer Spektrum

63

Linsenfehler – Chromatische Aberration

- Chromatische Aberration:
 - Ursache: Dispersion
 - Ergebnis: Abweichende Brennweite der verschiedenen Farben (Wellenlängen) – jede Wellenlänge hat ihren eigenen Brennpunkt



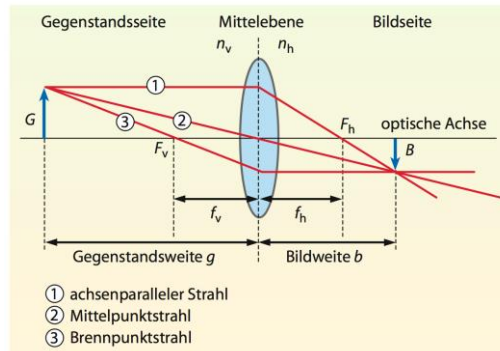
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verbeider nach Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

64

Abbildungen mit Linsen

- Strahlen, die durch den Mittelpunkt der Linse gehen, ändern ihre Richtung nicht = Mittelpunktstrahl
- Strahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, werden im Brennpunkt fokussiert = Parallelstrahl
- Strahlen aus dem Brennpunkt werden zu achsenparallelen Strahlen = Brennpunktstrahl



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

65

Abbildungen durch Linsen

- Es gibt fünf Möglichkeiten, den Gegenstand in Bezug auf eine Linse zu positionieren:

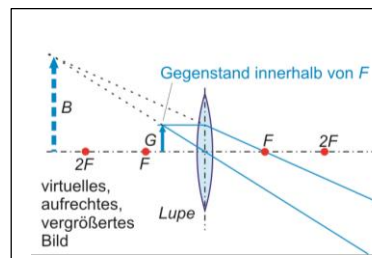
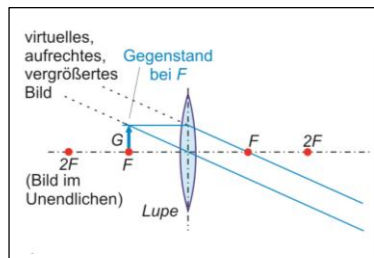
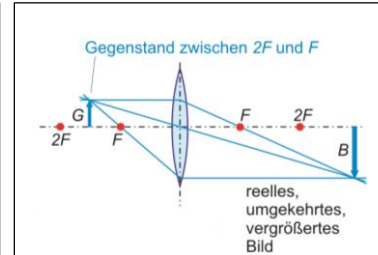
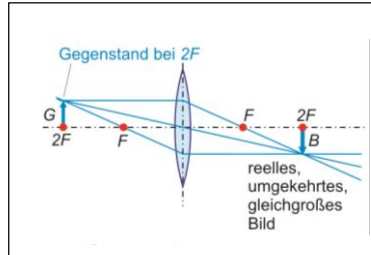
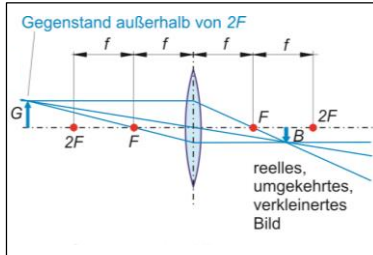
Gegenstandslage	Bildlage	Art, Stellung & Größe des Bildes
$g > 2f$	$f < b < 2f$	Reell, umgekehrt, verkleinert
$g = 2f$	$b = 2f$	Reell, umgekehrt, gleichgroß
$f < g < 2f$	$b > 2f$	Reell, umgekehrt, vergrößert
$g = f$	Bild im Unendlichen	Virtuell, aufrecht, vergrößert
$g < f$	Auf der Gegenstandsseite	Virtuell, aufrecht, vergrößert

Bei einem virtuellen Bild sind b und B negativ.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

66

Abbildungen durch Linsen



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik I Semmelweis Universität Budapest WS2016

67

Abbildungen durch Linsen

- Linsengleichung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

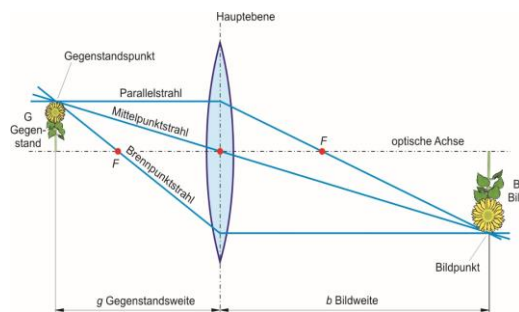
$$D = \frac{n_g}{g} + \frac{n_b}{b} = \left(\frac{n_g}{f_g} = \frac{n_b}{f_b} \right)$$

$$n_g = n_b = 1$$

$$f_g = f_b = f$$

- Vergrößerung:

$$V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

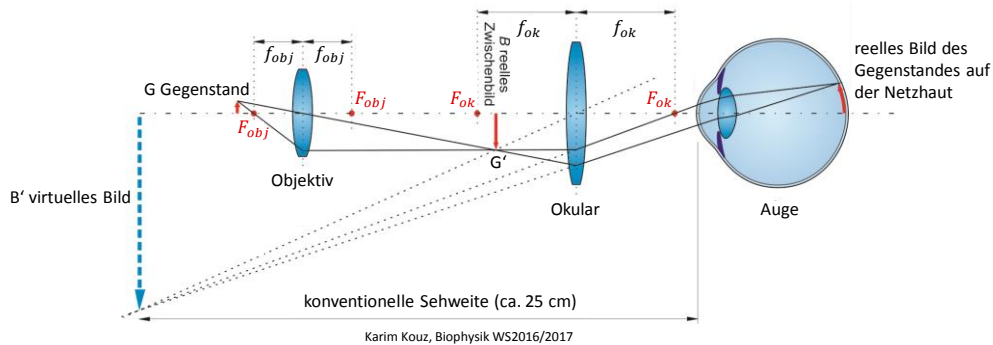
G : Gegenstandsgröße
 B : Bildgröße
 F : Brennpunkt
 g : Gegenstandsweite
 b : Bildweite
 f : Brennweite

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik I Semmelweis Universität Budapest WS2016

68

Strahlengang beim Lichtmikroskop

- Lage des Gegenstands in Bezug auf das Objektiv: $f < g < 2f$
- Zwischenbild: reell, umgekehrt, spiegelverkehrt, vergrößert
- Lage des Zwischenbildes in Bezug auf das Okular: $g < f$
- Bild (in Bezug auf den Gegenstand): virtuell, umgekehrt, spiegelverkehrt, vergrößert



69

Vergrößerung des Lichtmikroskops

- Die Vergrößerung einer Linse lässt sich wie folgt berechnen:

$$V = \frac{\text{Bildweite}}{\text{Gegenstandsweite}}$$

- Das Lichtmikroskop besitzt zwei Linsen (Objektiv und Okular):

$$V = V_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} \approx \frac{d}{f_{\text{Objektiv}}} \cdot \frac{-a}{f_{\text{Okular}}}$$

Optische Tubuslänge: Abstand der Okularbrennebene von der Brennebene des Objektivs bezeichnet

Verdeutlicht, dass das endgültige Bild virtuell ist

Deutliche Sehweite: Mikroskop ist so gebaut, dass man das Bild angenehm betrachten kann - also in einem Mindestabstand von 25 cm

- Einsetzen von Standardwerten:

$$V = \frac{100 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 500$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

70

Auflösungsvermögen des LM

- Theoretisch könnte man ein Bild mit dem LM (bei Variation der Variablen in der Vergrößerungsformel) nahezu unendlich vergrößern
- Die Grenze wird jedoch durch die Wellennatur des Lichts gesetzt – durch Beugung
- Aus jedem Gegenstandspunkt entsteht ein Beugungsbild (Airy-Scheibe)
- Liegen zwei Gegenstandspunkte sehr nah beieinander, so überlappen die Beugungsbilder und die Punkte sind nicht mehr getrennt wahrnehmbar
- Der minimale Abstand zwischen zwei Punkten, unter dem man diese noch getrennt wahrnehmen kann, wird Auflösungsgrenze δ genannt

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

71

Auflösungsvermögen des LM

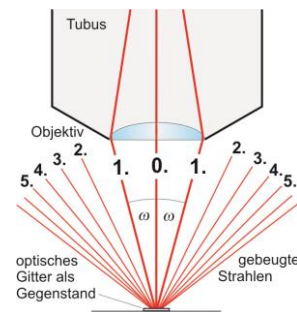
- Nach der Abbe'schen Formel gilt:

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

Numerische Apertur

n : Brechzahl des Mediums, das sich zwischen Präparat und Objektivlinse befindet
 λ : Wellenlänge des Lichts des LM
 ω : Halböffnungswinkel der Eintrittsöffnung

- Die Auflösung kann verbessert werden durch:
 - Verwendung von Licht mit kleinerer Wellenlänge
 - Verwendung von Medien mit größerer Brechzahl (Immersionsöle)
 - Erhöhung des Halböffnungswinkels

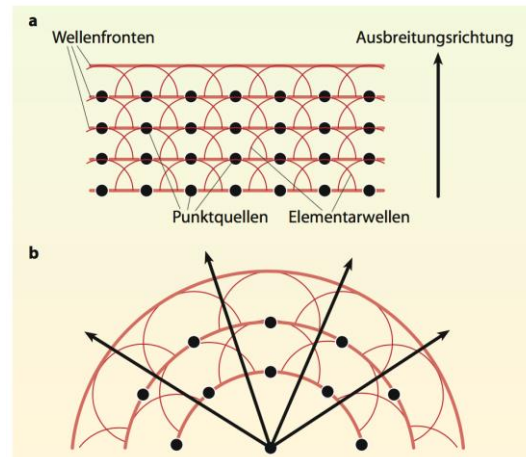


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

72

Huygens'sche Prinzip

- Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer neuen Welle, der so genannten Elementarwelle, betrachtet werden
- Diese Elementarwelle breitet sich mit gleicher Phasengeschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Welle aus
- Die Einhüllende einer Wellenfront ergibt die neue Wellenfront



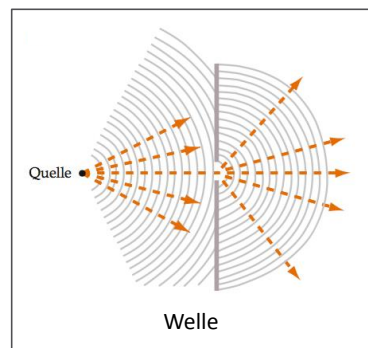
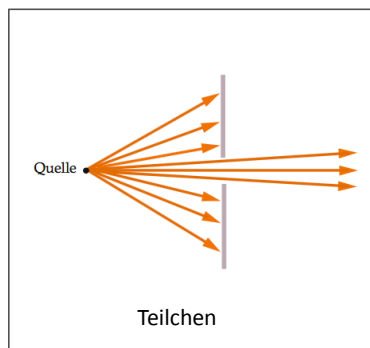
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

73

Beugung – Welle vs. Teilchen

- Eindringen von Wellen in den geometrischen Schattenraum hinter Hindernisse oder Öffnungen



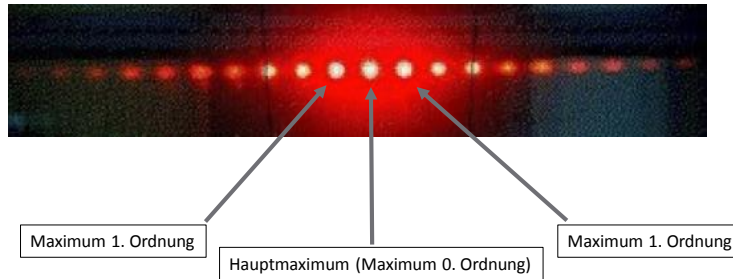
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., Hb. v. Jerry Wagner, Springer Spektrum

74

Beugung am Gitter

- Wird ein Gitter mit einem Laser (monochromatisches Licht) bestrahlt, so sind charakteristische Beugungsmuster auf einem Schirm zu beobachten



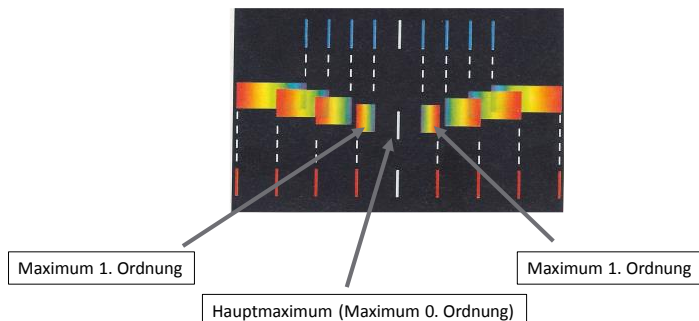
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik, Sommersemester Universität Bayreuth WS 2012/2013

77

Beugung am Gitter

- Wird ein Gitter mit weißem Licht (polychromatisch) bestrahlt, so sind ebenfalls charakteristische Beugungsmuster zu beobachten



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Metzler Physik 4. Auflage, J. Grehn, J. Krause, Schroedel Verlag

78

Beugung am Gitter

- Licht trifft auf das Gitter und Elementarwellen gehen von den Lichtstrahlen aus (Huygens'sches Prinzip)
- Die Elementarwellen können interferieren (positive & negative Interferenz)
- Positive Interferenz: Maxima
- Negative Interferenz: Dunkle Stellen zwischen den Maxima
- Maximum 0. Ordnung = Hauptmaximum: Maximale Verstärkung, da die Wellen aller Spalten diesen Punkt ohne Gangunterschied erreichen
- Die Auffächerung des Lichts bei dem Bestrahlen des Gitters mit polychromatischem Licht ist auf die Abhängigkeit der Beugung von der Wellenlänge zurückzuführen

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

79

Mathematische Erklärung

- Strahlen, die sich auf dem Schirm in einem Punkt treffen, können aufgrund des großen Abstandes zwischen Gitter und Schirm als zunächst parallel angesehen werden
- Es gilt:

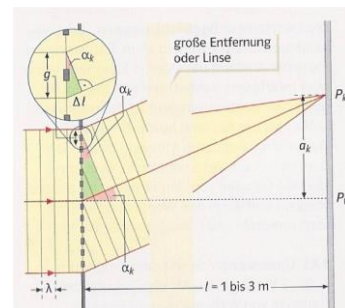
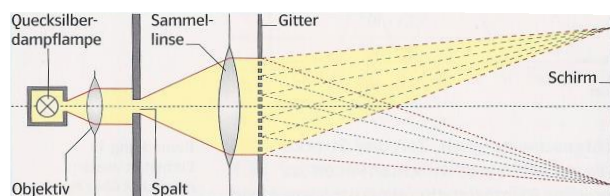
$$\sin(\alpha_k) = \frac{\Delta l}{g}$$

Bei konstruktiver Interferenz muss gelten:

$$\Delta l = n \cdot \lambda \rightarrow \sin(\alpha_k) = \frac{n \cdot \lambda}{g}$$

Weiterhin gilt:

$$\tan(\alpha_k) = \frac{a_k}{l}$$



Quelle: Impulse Physik 11/12 1. Auflage, Klett Verlag

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

80

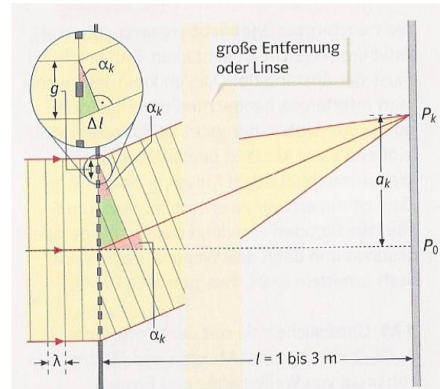
Mathematische Erklärung

- Für Winkel, die kleiner sind als 10° Grad, gilt:

$$\sin(\alpha_k) \approx \tan(\alpha_k) \rightarrow \frac{a_k}{l} = \frac{n \cdot \lambda}{g}$$

- Für Winkel, die größer sind als 10° , gilt die exakte Gleichung:

$$\frac{n \cdot \lambda}{g} = \frac{a_k}{\sqrt{a_k^2 + l^2}}$$



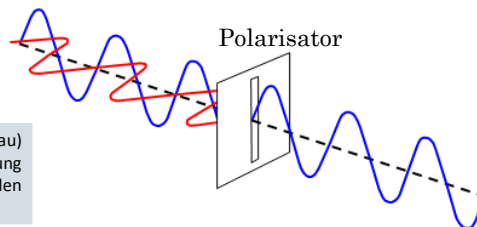
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Impulse Physik 1/2/3 1. Auflage, Klett Verlag

81

(Lineare) Polarisation

- Bei Transversalwellen stehen Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung senkrecht zueinander
- Die Schwingungsrichtung ist dabei aber noch nicht genau definiert, obwohl sie die ganze Zeit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht (= unpolarisierte Welle)
- Die „Auswahl“ einer Schwingungsrichtung (Schwingungsebene) mit Hilfe eines Polarisators wird lineare Polarisation genannt



Exemplarisch sind zwei Schwingungsrichtungen (rot und blau) eingezeichnet, die beide senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (gestrichelte Linie) stehen. Der Polarisator „wählt“ von den vielen Schwingungsrichtungen eine – in diesem Fall die blaue – aus.

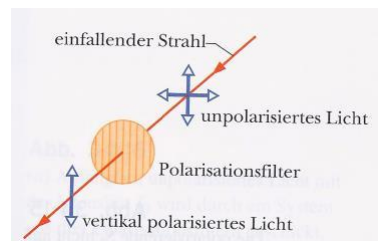
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach http://www.schubphysik.co.uk/ages16-19/when20properties/Polarisation/tee/Polarisation/_index.html

82

Polarisation von Licht

- Das meiste Licht in der Natur ist unpolarisiert (keine feste Schwingungsrichtung)
- Unpolarisiertes Licht kann mit einem Polarisator polarisiert werden:
 - Polarisation durch Absorption, z.B. Polarisationsfilter
 - Polarisation durch Reflexion, z.B. Spiegel
- Stehen zwei Polarisatoren in Bezug auf ihre „Schlitze“ senkrecht zueinander, so lassen sie kein Licht (Welle) mehr durch



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physik, Halliday, Resnick, Walker, Wiley-VCH

83

Polarimeter

- Optisch aktive Stoffe (chirale Moleküle) können die Polarisationsebene des linear polarisierten Lichts drehen
- Der Drehwinkel (α) kann mit einem Polarimeter bestimmt werden
- Es gilt: $\alpha \sim c \cdot l$
- Der Proportionalitätsfaktor ist der Drehwert/Drehvermögen: $[\alpha]_{\lambda}^T \left[\frac{^{\circ} \cdot \text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{dm}} \right]$
- Das spezifische Drehvermögen ist abhängig von:
 - Temperatur
 - Wellenlänge
 - Stoff

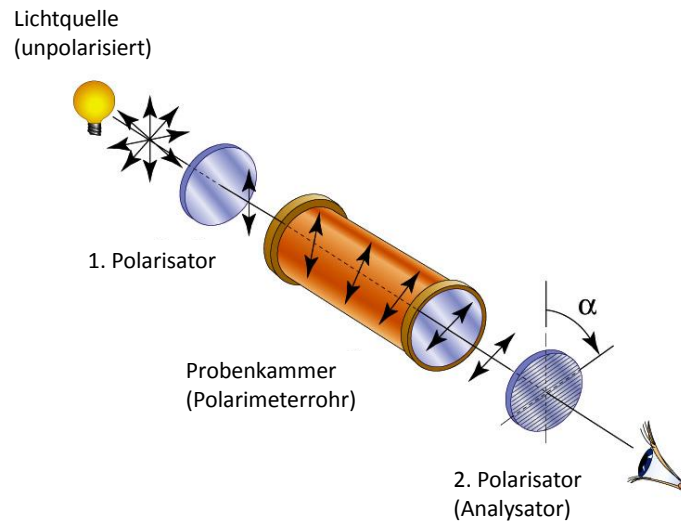
- Biot-Gesetz: $\alpha = [\alpha]_{\lambda}^T \cdot c \cdot l$

c : Konzentration der untersuchten Lösung $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$
 l : Länge der Küvette (dm)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

84

Polarimeter: Aufbau



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <http://www.bspphysik.org>

85

Polarimeter: Funktionsweise

- Stehen die beiden Polarisatoren senkrecht zueinander, lassen diese kein Licht hindurch
- Wird zwischen die beiden Polarisatoren ein optisch aktiver Stoff gebracht, so kann dieser das polarisierte Licht um einen bestimmten Winkel drehen, sodass keine vollständige Auslöschung des Lichts mehr zu beobachten ist
- Der 2. Polarisator wird nun so gedreht, dass wieder Dunkelheit herrscht
- Der Winkel, um den dieser Polarisator gedreht wurde, wird als Drehwinkel bezeichnet
- Mit diesem Drehwinkel, der Länge der Probenkammer und der Konzentration der betrachteten Lösung kann das spezifische Drehvermögen berechnet werden

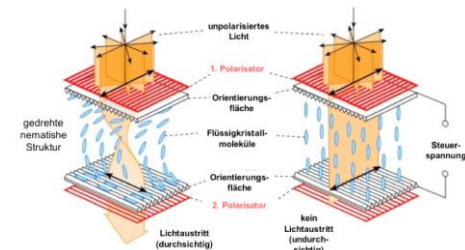
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

86

LCD (liquid crystal display)

Funktionsweise:

- Zwei Polarisatoren stehen senkrecht zueinander, wodurch kein Licht durchtreten kann
- Flüssigkeitskristalle zwischen den beiden Polarisatoren sind optisch aktiv und speziell ausgerichtet (Orientierungsfläche)
- Die Kristalle drehen das Licht um 90° , sodass das Licht trotz der senkrecht angeordneten Polarisatoren durchtreten kann
- Beim Anlegen einer Spannung ändern die Kristalle, abhängig von der angelegten Spannung, ihre Ausrichtung, sodass weniger bzw. kein Licht mehr durchtreten kann
- Durch Variation der Spannung kann somit die Helligkeit eines einzelnen LCD-Elements reguliert werden



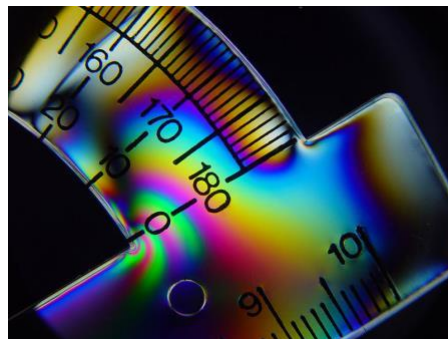
Quelle: Vorlesungsskript Biophysik, Sommersemester Universität Budapest WS 2012/2013

87

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Spannungsoptik

- Viele Stoffe erlangen unter mechanischer Beanspruchung die Fähigkeit, die Polarisationssebene des Lichts zu drehen
- Mit Hilfe eines Polariskops können diese Stoffe untersucht und somit mechanisch beanspruchte Stellen gefunden und Spannungen sichtbar gemacht werden



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsoptik>

88

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

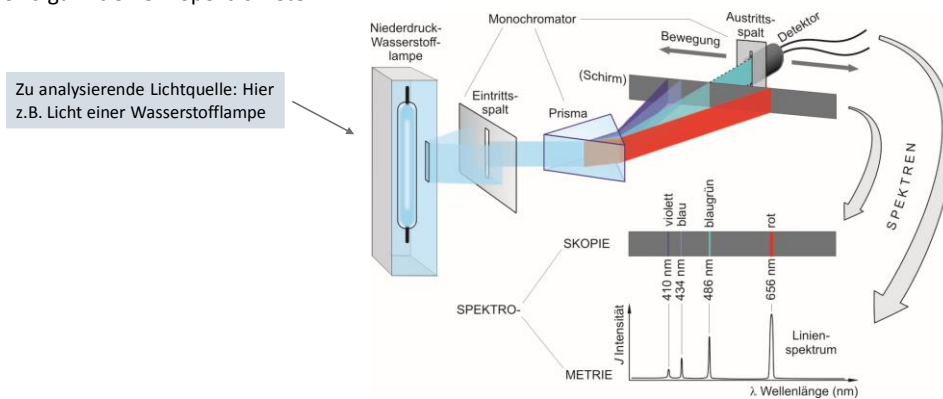
(IV) Emissionsspektrometrie

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

Emissionsspektrometrie

- Basiert auf der Grundlage, dass angeregte Atome/Moleküle eine spezifische elektromagnetische Strahlung aussenden und somit Rückschlüsse auf die analysierte Probe geben
- Analyse erfolgt mit einem Spektrometer:



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik (Semmelweis Universität Budapest WS2016)

Emissionsspektrometer

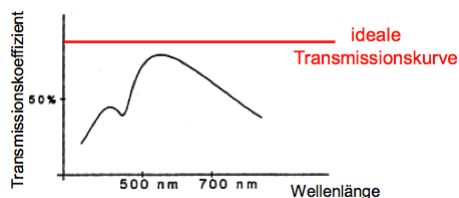
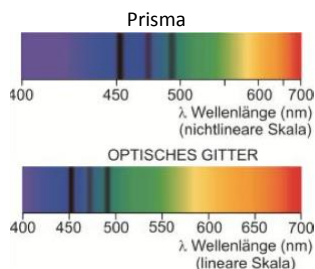
- **Aufbau:**
 - Lichtquelle
 - **Monochromator** (Eintrittsspalt, Prisma/Gitter, Austrittsspalt)
 - Lichtdetektor (SEV oder Photodiode)
 - Analyse-Hardware
- Monochromator zerlegt Licht in seine Spektralfarben:
 - Prisma zerlegt das Licht auf Grund von Dispersion
 - Gitter (Transmissions- oder Reflexionsgitter) zerlegt das Licht auf Grund von Beugung
- Der zu untersuchende Wellenlängenbereich kann ausgewählt werden durch:
 - Bewegung des Austrittsspalt
 - Bewegung des Prismas/Gitters
 - Variation des Abstandes zwischen Prisma/Gitter und Austrittsspalt

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

91

Technische Probleme des Monochromators

- **Prisma im Monochromator:**
 - Dispersion ist stark von der Wellenlänge abhängig – keine lineare Wellenlängenskala
- **Gitter im Monochromator:**
 - Transmission und Reflexion des Gitters müssen beachtet werden, da diese ebenfalls von der Wellenlänge abhängig sind



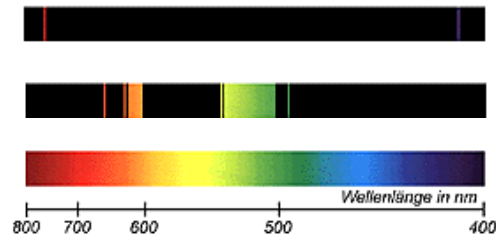
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

92

Quelle: verändert nach Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Semmelweis Universität

Emissionsspektrometer

- Monochromator ist nicht zwangsmäßig Bestandteil, wenn der Detektor die Fähigkeit besitzt, elektrische Signale voneinander zu trennen (Integral- oder Differentialdiskriminator)
- Spektrumarten:
 - Linienspektrum
 - Bandenspektrum
 - Kontinuierliches Spektrum



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <http://www.zelllicht.com>