

Vorlesung 4

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

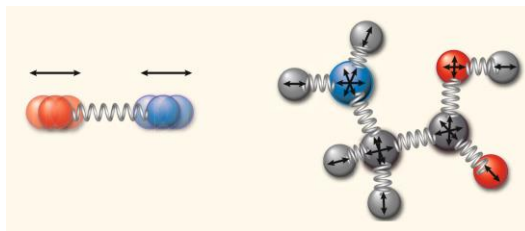
(I) Strukturuntersuchungsmethoden

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

Infrarotspektroskopie

- Physikalisches Analyse-Verfahren das mit infraroter Strahlung ($\lambda = 800 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$) arbeitet
- Für die Infrarotspektroskopie ist v.a. das mittlere Infrarot (MIR) interessant: $\lambda = 2,5 - 50 \text{ }\mu\text{m}$
- Licht dieser Wellenlänge kann von Molekülen absorbiert werden, was zu einer Schwingungsanregung der Bindungen des Moleküls führt (Molekülschwingungen)
- Die kovalente Bindung zwischen Atomen kann dabei aus mechanischer Sicht am ehesten mit einer Feder verglichen werden, für die das Hooke'sche Gesetz gilt



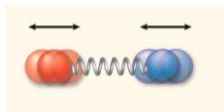
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

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

3

Infrarotspektroskopie

- Die Frequenz der Schwingung hängt von der Federkonstanten (hier auch als Kraftkonstante bezeichnet) und der sogenannten reduzierten Masse (m_{red}) der Atome ab
- Mit Hilfe der reduzierten Masse kann man die beiden Massen, die an der kovalenten Bindung beteiligten Atome, behandeln, als wären sie eine einzige Masse:



$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{D}{m_{red}}}$$

$$m_{red} = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

Beispiel-Rechnung für CO:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}}{\frac{2 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}{2 \cdot 10^{-26} \text{ kg} + 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}}} \approx 4,7 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4,7 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s}}} \approx 6,4 \text{ }\mu\text{m}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

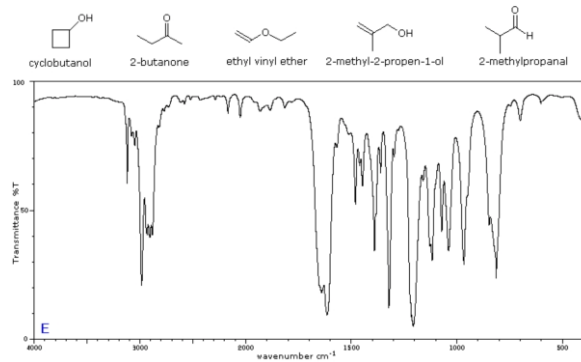
Quelle: Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

4

Infrarotspektroskopie

- Durch die Energieübertragung der Strahlung auf die Moleküle wird die Strahlungsintensität geschwächt (absorbiert)
- Innerhalb eines Moleküls führen kleine Atomgruppierungen lokalisierte Schwingungen mit scharf begrenzter Frequenz durch
- Bei der Infrarotspektroskopie ist es üblich, statt der Photonenenergie die Frequenz bzw. die Wellenzahl, bei der die Schwingung auftritt, anzugeben:

$$\text{Wellenzahl} = \frac{1}{\lambda}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

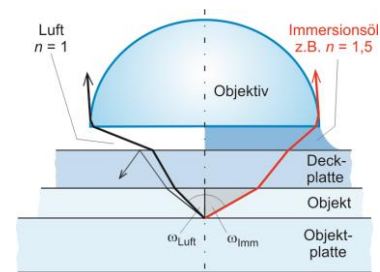
5

Immersionsobjektive

- Nach der Abbe'schen Formel berechnet sich die Auflösungsgrenze eines Lichtmikroskops wie folgt:

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

Numerische Apertur



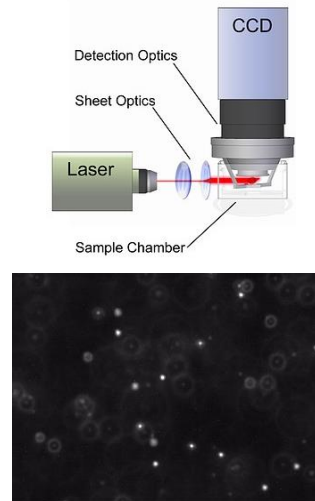
- Die Auflösung kann verbessert werden durch:
 - Verwendung von Licht mit kleinerer Wellenlänge
 - Verwendung von Medien mit größerer Brechzahl (**Immersionsöle**)
 - Erhöhung des Halboffnungswinkels

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

6

Ultramikroskop (Dunkelfeldmikroskop)

- Verwendung: Betrachtung von sehr kleinen Objekten (z.B. kolloide Teilchen), die mit einem LM nicht zu erkennen wären
- Prinzip:
 - Beleuchtung des Objektes senkrecht zur Beobachtungsachse mit einem hellen, konvergenten Lichtbündel (z.B. Laserlicht)
 - Objekte sind in Flüssigkeit oder Gas suspendiert
 - Beobachtung in einer möglichst dunklen, absorbierenden Umgebung mit einem abbildenden LM
 - Lichtbündel erzeugt im Beobachtungsvolumen einen leuchtenden Kegel, den Tyndall-Kegel
 - Objekte erzeugen Beugungsringe, die als helle Flecken zu beobachten sind
 - Es sind (kaum) keine Details sichtbar, jedoch ist die Anwesenheit der Teilchen nachweisbar



Wird z.B. zur Untersuchung der Brown'schen Molekularbewegung verwendet.

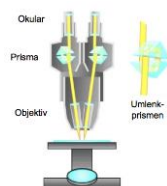
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik 1 Sommersemester Universität Wuppertal WS2016

7

Stereomikroskop

- Verwendung: Operationsmikroskope, Augenheilkunde,...
- Prinzip:
 - Mikroskop, das eigentlich aus zwei Mikroskopen besteht (getrennte Strahlengänge für beide Augen)
 - Mikroskope sind in einem Winkel von rund 14° zueinander montiert (Winkel unter dem man einen Gegenstand in der deutlichen Sehweite beobachtet) – räumlicher Eindruck entsteht
 - Zusätzliche Umlenkprismen sorgen dafür, dass das Bild nicht umgekehrt wahrgenommen wird

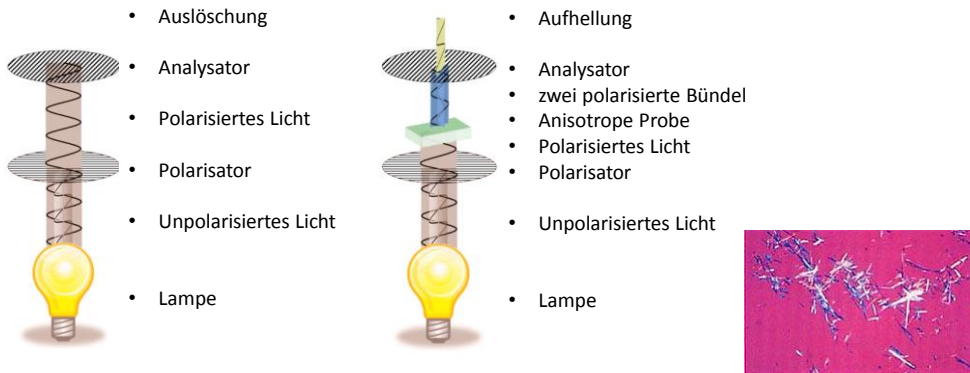


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.schlegel-medice.de>; <http://www.at-moermed.com>; Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommersemester Universität

8

Polarisationsmikroskop



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org>; <http://www.krankenhaus-st-josef-wuppertal.de>

9

Polarisationsmikroskop

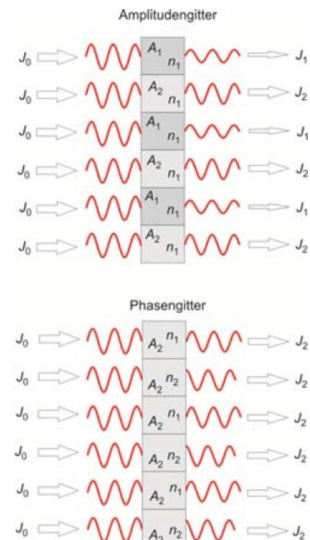
- Verwendung: Materialforschung/-untersuchung, Nachweis von Kristallen im Serum, z.B. bei der Diagnostik von Gicht
- Prinzip:
 - Licht aus der Lichtquelle wird linear polarisiert (1. Polarisator)
 - Linear polarisiertes Licht trifft auf doppelbrechendes Objekt
 - Hinter dem Objekt befindet sich ein 2. Polarisator (Analysator), der um 90° gedreht zum ersten Polarisator steht
 - Ist das untersuchte Objekt optisch nicht aktiv, so erscheint kein Bild (dunkles Bild)
 - Ist das untersuchte Objekt optisch aktiv, so ist ein Bild zu sehen

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

10

Phasenkontrastmikroskop

- Verwendung: Histologische/zellbiologische Untersuchungen, Pollenuntersuchungen,...
- Prinzip:
 - Beim Durchgang von Licht durch ein Medium ändert sich neben der Amplitude auch die Phase der Lichtquellen abhängig vom Brechungsindex (Licht wird „abgebremst“)
 - Intensitätsunterschiede können mit dem menschlichen Auge wahrgenommen werden, Phasenunterschiede nicht
 - „Unsichtbare“ Phasenunterschiede werden in Helligkeitsunterschiede umgewandelt
 - Es eignen sich nur dünne, transparente bzw. schwach gefärbte Objekte für dieses Verfahren

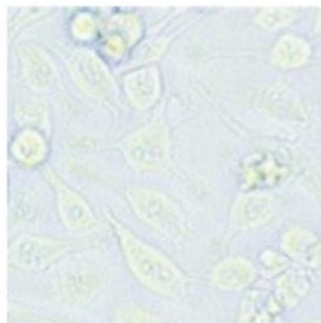


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

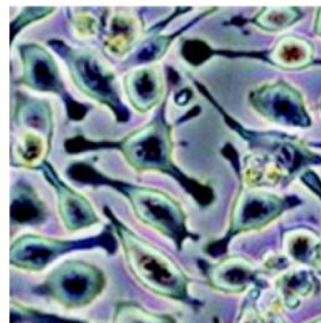
Quelle: Vorlesungsskript Biophysik Sommersemester 2012

11

Phasenkontrastmikroskop



Gliazelle im LM



Gliazelle im Phasenkontrastmikroskop

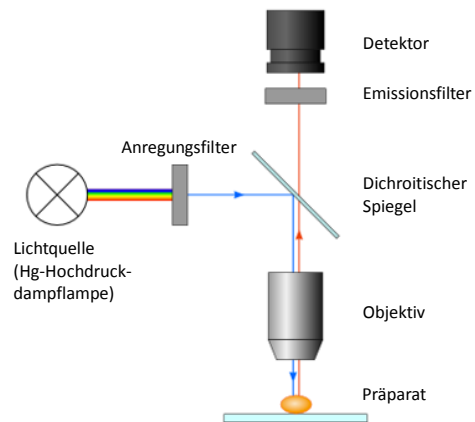
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommersemester 2012

12

Fluoreszenzmikroskopie

- Verwendung: Histologie, Genetik, Zellbiologie,...
- Prinzip:
 - Betrachtung von fluoreszierenden Objekten (extrinsische und/oder intrinsische Fluoreszenz)
 - Anregungslicht von der Seite wird mit Spiegeln auf das Objekt fokussiert (Vorteil: starkes Anregungslicht stört nicht bei der Bildentstehung)
 - Fluoreszenzlicht wird durch das Objektiv abgebildet
 - Dichroitischer Spiegel reflektiert Anregungslicht zu fast 100%, das spektral verschobene Fluoreszenzlicht fast gar nicht (Epifluoreszenzanordnung)



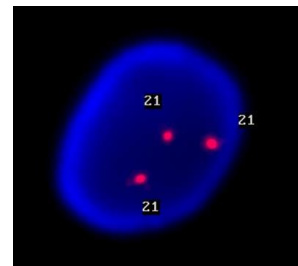
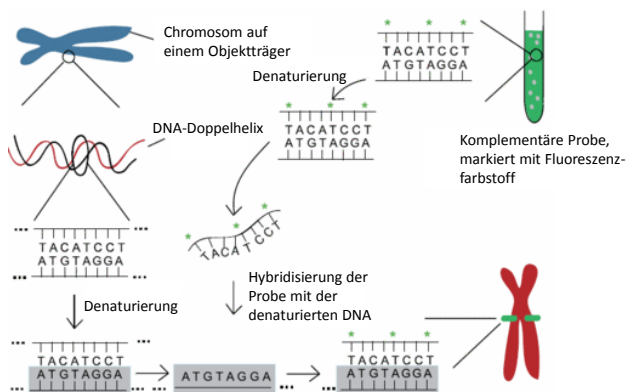
Quelle: verändert nach <https://ja.uni-goettingen.de>

13

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Fluoreszenzmikroskopie

- FISH: Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung



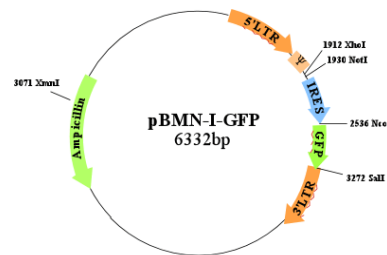
Quelle: <http://www.medizinische-genetik.de>; <http://www.humangenetik-hannover.de>

14

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Fluoreszenzmikroskopie

- Grün fluoreszierendes Protein (GFP)



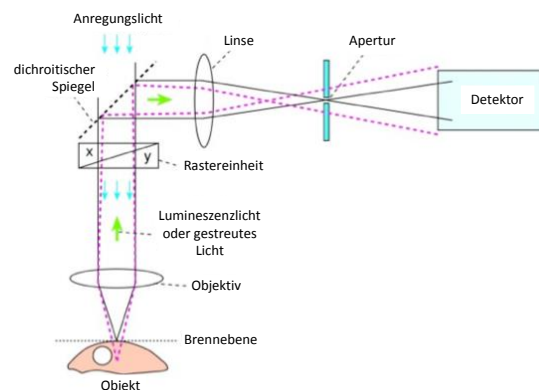
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://dx.wikiplasma.org: http://www.addgene.org>

15

Konfokales Laser Rastermikroskop (CLSM)

- In den meisten Fällen wird Fluoreszenzlicht betrachtet (Gruppe der Fluoreszenzmikroskope): Epifluoreszenzanordnung
- Gezielte Beobachtung einer Schicht ist möglich (vs. LM immer mehrere Schichten überlagert)
- Andere Schichten senden zwar auch Lichtstrahlen aus, sie werden aber aufgrund der speziellen Anordnung herausgefiltert (Strahlen kommen nicht aus der Brennebene und sind daher konvergent und können Apertur somit nicht passieren)



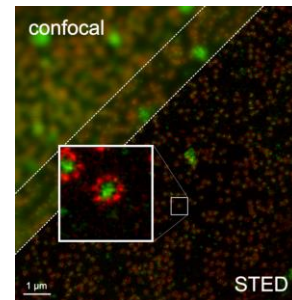
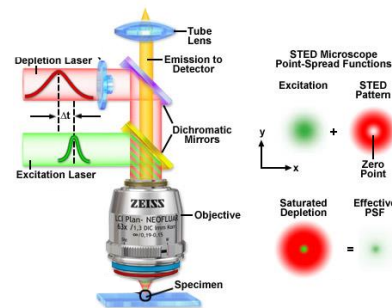
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012, Sommersemester Universität

16

STED-Mikroskop

- Das STED-Mikroskop (STED = Stimulated Emission Depletion) gehört zur Gruppe der Superresolutionsmikroskope, deren Auflösung nicht beugungsbegrenzt ist
- Normalerweise lassen sich mit herkömmlichen Lichtmikroskopen keine Details auflösen, die kleiner als circa die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts sind
- Dem STED-Mikroskop sind diese Grenzen nicht gesetzt, sodass Auflösungen von bis zu 2,4 nm (lateral) erzielt werden können
- Funktionsprinzip:
 - Die zu untersuchenden Strukturen des Präparats werden mit Fluoreszenzstoffen markiert
 - Die Anregung des Bereichs erfolgt mit einem 1. Laser („Anregungsstrahl“)
 - Ein 2. Laser („Ausschaltstrahl“) wird ebenfalls auf den Ausschnitt fokussiert, in dessen Mitte ist dieser Strahl jedoch dunkel
 - Der 2. Laser schaltet über stimulierte Emission in dem Randbereich die spontane Emission von Licht aus, sodass nur noch die Farbstoffmoleküle im Zentrum leuchten
 - Auf diese Weise wird das Präparat abgerastert und ein Bild entsteht



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/tutorial/tutorial/superresolution/zeissconfocal/indexflash.html>; <https://de.wikipedia.org/wiki/STED-Mikroskop>

17

Rastersondenmikroskope (SPM)

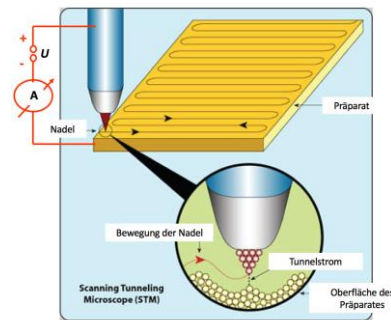
- Überbegriff für alle Mikroskope, die ein Bild über die Wechselwirkung einer Sonde mit einer Probe erzeugen
- Beispiele:
 - Rastertunnelmikroskop (RTM)
 - Rasterkraftmikroskop (RKM)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

18

Rastertunnelmikroskop

- Wechselwirkung zwischen Sonde und Präparat: elektrischer Strom
- Prinzip:
 - Enger Kontakt zwischen Sonde und Objekt
 - Anlegen einer Spannung zwischen Sonde und Objekt
 - Nach klassischen Gesetzen dürfte kein Strom fließen, da zwischen Sonde und Objekt ein Nichtleiter liegt
 - Es fließt jedoch auf Grund des quantenmechanischen Phänomens des Tunneleffekts ein Strom – der Tunnelstrom
 - Der Tunnelstrom ist stark abhängig vom Abstand der Sonde und dem Objekt
 - Anhand der Stromflussänderung kann ein Bild rekonstruiert werden
 - Eine andere Möglichkeit ist die Konstant-Haltung des Tunnelstroms und die Höhenvariation der Sonde um „Crashes“ zu vermeiden



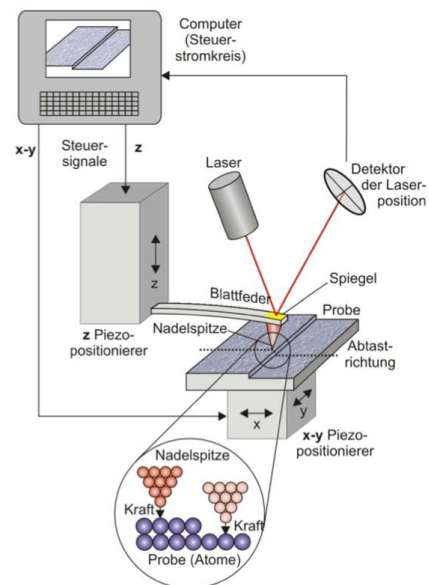
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2015 Sommersemester Universität

19

Rasterkraftmikroskop

- Wechselwirkung zwischen Sonde und Präparat: atomare Wechselwirkungen (Anziehung und Abstoßung)
- Sonde ist an einer Blattfeder fixiert, deren Auslenkung beobachtet und aufgezeichnet wird (z.B. mittels Lasers)



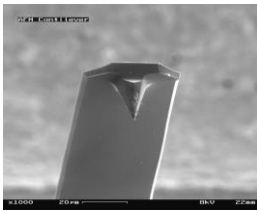
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik WS2015 Sommersemester Universität

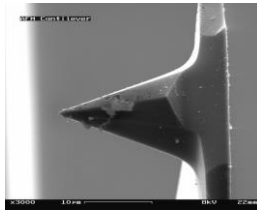
20

Auflösungsvermögen der Rastersondenmikroskope

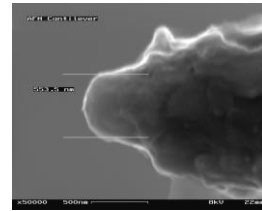
- Das Auflösungsvermögen kann u.a. durch folgende Faktoren beeinflusst werden:
 - Feinheit der Sonde
 - Feinheit der Beweglichkeit des Rasterns (Piezopositionierer)



1000-fache Vergrößerung der Sonde



3000-fache Vergrößerung der Sonde



50000-fache Vergrößerung der Sonde

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

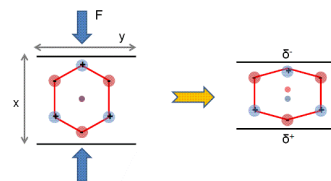
Quelle: <http://de.wikipedia.org>

21

Piezoelektrischer Effekt

- **Direkter Piezoeffekt:** Beschreibt das Auftreten einer elektrischen Spannung (Ladungstrennung) an speziellen Festkörpern (piezoelektrische Kristalle), wenn sie elastisch verformt werden
- Die entstehende Spannung ist proportional zu der Deformation des Festkörpers:

$$U = \delta \cdot \Delta x$$



- Erscheinung des Piezoeffekts kann sich auch umgekehrt abspielen: beim Anlegen einer elektrischen Spannung an den Festkörper ändert sich die Dicke des Festkörpers = **inverser Piezoeffekt**
- Die Verformung des Kristalls durch das Anlegen einer Spannung kann zur exakten Positionierung des Objektes genutzt werden

Karim Kouz, Biophysik SS2014

Quelle: http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/chemie/piezoe/piezoe_effekt.htm

22

Elektronenmikroskope (EM)

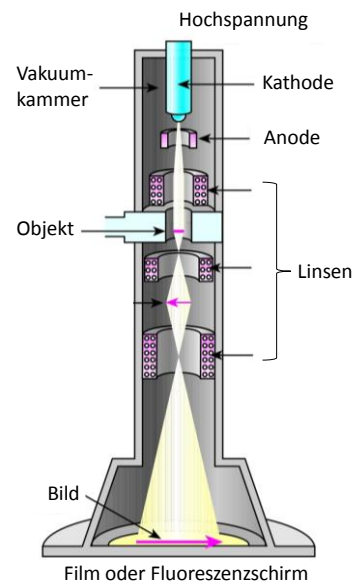
- Auch Teilchenstrahlungen besitzen einen Wellencharakter
- Dieser Wellencharakter gibt uns die Möglichkeit, die Wellenlänge der Strahlungsquelle eines Mikroskops sehr stark zu verkleinern und somit die Auflösungsgrenze zu erniedrigen (Abbe'sche Formel)
- 2 Arten von Mikroskopen:
 - Transmissionselektronenmikroskop (TEM)
 - Rasterelektronenmikroskop (REM)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

23

TEM

- Ähnelt dem Aufbau eines LM
- Wesentliche Unterschiede:
 - Lichtstrahl vs. Elektronenstrahl
 - Optische Linse vs. Elektronenlinse (elektrische bzw. magnetische Felder)
- Strahlungsquelle: Glühkathode (glühelektrischer Effekt)
- Elektronen werden durch Anode beschleunigt und durch Elektronenlinsen fokussiert
- Trifft die Strahlung auf das Objekt, wird diese teilweise gestreut und teilweise durchdringt sie das Objekt, sodass das Bild auf dem Fluoreszenzschirm entsteht



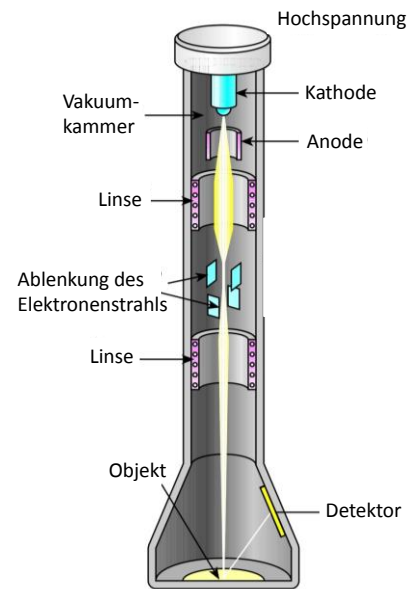
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012, Semmelweis Universität

24

REM

- Objekt wird nicht mit Elektronenstrahlung durchleuchtet, sondern mit einem sehr schmalen Strahl „abgetastet“
- Mithilfe von Ablenkungssystemen kann der Strahl an bestimmte Stellen des Objektes gelenkt werden
- Detektiert werden können:
 - Reflektierte Elektronen
 - Gestreute Elektronen
 - Sekundärelektronen
 - Röntgenstrahlen
 - Andere Signale



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommersemester Universität

25

Auflösungsgrenze des EM

- Die Abbe'sche Formel gilt näherungsweise auch für das EM:

$$\delta \approx \frac{\lambda}{A} \approx \frac{0,005 \text{ nm}}{0,03} \approx 0,2 \text{ nm}$$

- Die Wellenlänge des Elektronenstrahls lässt sich mit Hilfe der De-Broglie-Gleichung und des Energieerhaltungssatzes berechnen:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = U \cdot e$$

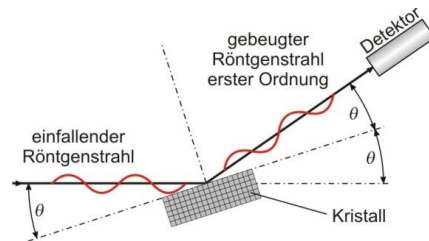
$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot U}}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

26

Röntgendiffraktion (Beugung)

- Röntgenstrahlung hat eine sehr kleine Wellenlänge ($\lambda \approx 0,01 - 0,1 \text{ nm}$)
- Aufgrund der kleinen Wellenlänge ist kein herkömmliches Gitter verwendbar
- Atomgitter (Kristalle) haben geeignete „Gitterabmessungen“ (sehr kleine Gitterkonstante)
- Röntgenbeugungsexperimente dienen der Strukturanalyse von Kristallen
- Proteine/DNA können auskristallisiert werden – so wurde z.B. die Struktur von Natriumkanälen analysiert

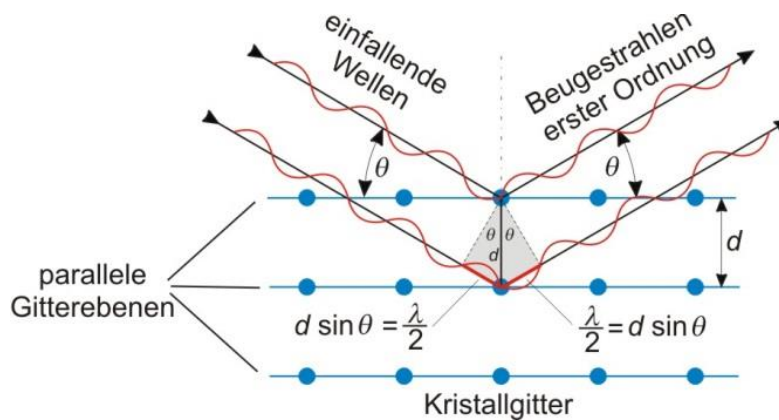


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommerwest Universität

27

Röntgendiffraktion



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommerwest Universität

28

Herleitung der Bragg-Gleichung

- Je nach Phasenbeziehung der beiden Strahlengänge tritt konstruktive oder destruktive Interferenz auf
- Bei konstruktiver Interferenz muss gelten:

$$2 \cdot \delta = n \cdot \lambda$$

- Der Gangunterschied δ lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$\delta = d \cdot \sin(\theta)$$

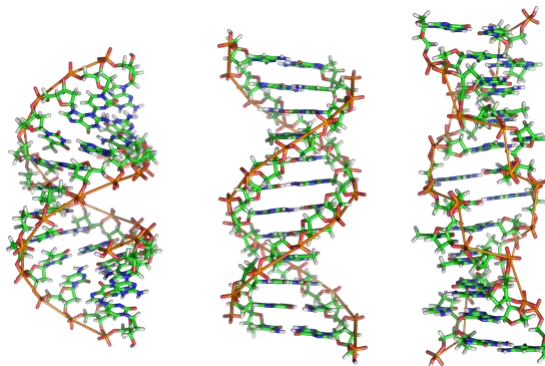
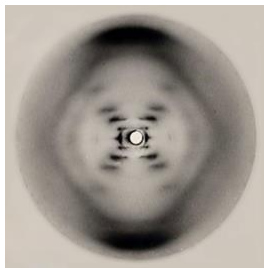
- Durch Einsetzen erhält man die Bragg-Gleichung:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta)$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

29

Röntgendiffraktion



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: http://www.allmyterry.de/VO11hg_2-form.jpg; <http://academic.oup.com/doi/10.1093/academic/9780198504000/001/001>

30

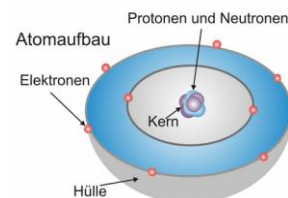
(II) Radioaktivität

Karim Kouz

WS 2016/2017 1. Semester Biophysik

Atomaufbau

- Ein Atom besteht aus:
 - Atomkern (Protonen und Neutronen)
 - Atomhülle (um den Atomkern auf Elektronenschalen kreisenden Elektronen)
- Für die chemischen Eigenschaften der Atome sind die Elektronen von großer Bedeutung, vor allem die Elektronen der äußeren Schale (Valenzelektronen)
- Masse eines Elektrons: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Ladung eines Elektrons (Elementarladung): $q = -1e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Atome sind im Normalfall elektrisch neutral, d.h. es kommen genauso viele Elektronen wie Protonen vor



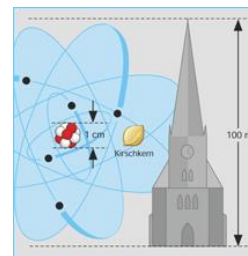
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: http://www.medcollege.at/de/fakultät/Grundlagen_der_Biologie/O2.jpg

32

Atomaufbau

- Protonen und Neutronen haben eine Masse von: $m_{p,n} = 1 u$
- Neutronen tragen keine elektrische Ladung
- Protonen tragen eine Ladung von: $q_{proton} = 1,6 \cdot 10^{-19} C = +1 e$
- Für die Radioaktivität ist ausschließlich der Atomkern verantwortlich
- Der Massenschwerpunkt eines Atoms konzentriert sich im Atomkern (99,9% der Masse)



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

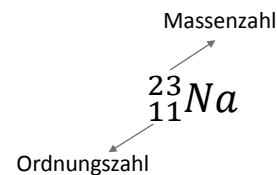
Quelle: http://www.kernfragen.de/kernfragen/physik/01_Das_Atom/1.3_Wie-sind-Atome-aufgebaut_digital2020

33

Charakterisierung von Atomen

- Ein Atom wird mit Hilfe von zwei charakteristischen Zahlenwerten beschrieben:
 - Massenzahl A
 - Ordnungszahl Z
- Massenzahl: Anzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen)
- Ordnungszahl: Anzahl der Protonen

	3	Li	4	Be	
2		Lithium 6,941 2/1		Beryllium 9,0122 2/2	
3		11	Na	12	Mg
		Natrium 22,990 2/8/1		Magnesium 24,305 2/8/2	
4	19	K	20	Ca	2
	Kalium 39,098 2/8/8/1		Calcium 40,078 2/8/8/2	Sk	4:
	37	Rb	38	Sr	3



11 Protonen
11 Elektronen
23-11 = 12 Neutronen

Massendefekt: $m_K < Z \cdot m_p + N \cdot m_n$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <http://geneu.ics.it/nuclides/facets/bornes/pse/PSE.png>

34

Das Tröpfchenmodell

- Das Tröpfchenmodell beschreibt einen Atomkern wie einen Flüssigkeitstropfen und in guter Übereinstimmung mit gemessenen Werten die Bindungsenergien der betrachteten Atomkerne
- Zwischen den Bestandteilen des Kerns wirkt eine starke anziehende Kernkraft (starke Kraft), die aber nur eine sehr kurze Reichweite hat (wirkt nur zwischen direkt benachbarten Nukleonen)
- Zusätzlich wirkt die gegenseitige elektrische Abstoßung der Protonen (Coulomb-Kraft), die selbst zwischen direkt benachbarten Atomkernen schwächer als die anziehende Kernkraft ist, aber eine lange Reichweite besitzt
- In guter Näherung gilt für den Kernradius r :

$$r = r_0 \cdot \sqrt[3]{A}$$

$$r_0 = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

35

Grundkräfte der Physik

Kraft	wirkt auf...	Reichweite	relative Stärke	Beispiel
Elektromagnetische Kraft	Elektrisch geladene Teilchen	nimmt mit $\frac{1}{r^2}$ ab	10^{-2}	Zusammenhalt des Atoms
Starke Kraft	Nukleonen (Quarks)	10^{-15} m	1	Zusammenhalt des Atomkerns
Schwache Kraft	alle Teilchen	10^{-17} m	10^{-13}	Beta-Zerfall
Gravitationskraft	alle Teilchen	nimmt mit $\frac{1}{r^2}$ ab	10^{-40}	Zusammenhalt des Planetensystems

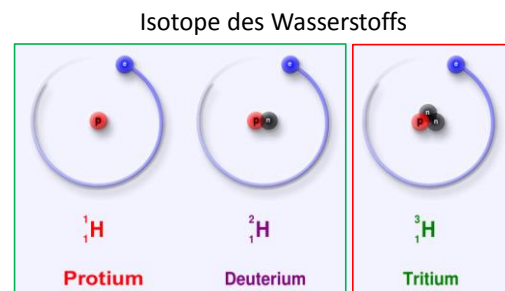
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommersemester Universität

36

Isotope

- Atomkerne, die die gleiche Ordnungszahl, aber nicht die gleiche Massenzahl besitzen
- Sie stimmen also in der Protonenzahl überein, aber nicht in der Neutronenzahl
- Chemisch gesehen verhalten sich Isotope weitgehend identisch
- Einteilung der Isotope:
 - **Stabile Isotope** (nicht radioaktiv)
 - **Instabile Isotope** (radioaktiv)



Quelle: verändert nach <https://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

37

Potentialtopfmodell

- Der Wirkungsbereich der starken Kraft ist auf einen Wirkungsbereich von ca. 1,5 fm begrenzt, bei Vergrößerung des Abstandes sinkt ihr Wert sehr schnell auf Null
- Der Aufenthalt von Nukleonen ist somit auf den Kernbereich beschränkt und kann mit Hilfe eines Topf-Modells beschrieben werden
- Innerhalb dieses Topfes wird das Verhalten der Nukleonen mit einer Wellenfunktion beschrieben (analog zu Elektronen); die Energieniveaus sind diskret

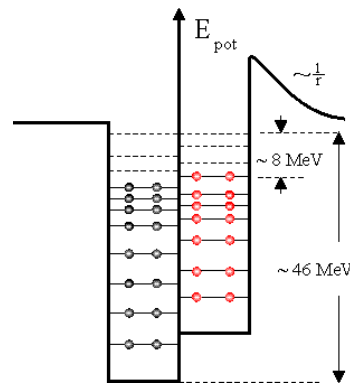
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

38

Potentialtopfmodell

- Für Neutronen und **Protonen** existieren getrennte Töpfe
- Auf Neutronen wirken nur Kernbindungskräfte
- Bei Protonen wirkt die Coulomb-Kraft entgegen: sie haben eine geringere mittlere Bindungsenergie; der Protonentopf liegt höher als der Neutronentopf
- Die Tiefe des Topfes ist vom jeweiligen Atomkern abhängig
- Da Protonen außerhalb des Kerns von diesem abgestoßen werden (Coulomb-Kraft), muss der Potentialtopf für Protonen durch einen Potentialwall ergänzt werden

Für Protonen und Neutronen gilt auch das Pauli-Prinzip



Mit Hilfe des Potentialtopfmodells können die beobachteten Linienspektren des Alpha-Zerfalls und der Gamma-Strahlung erklärt werden

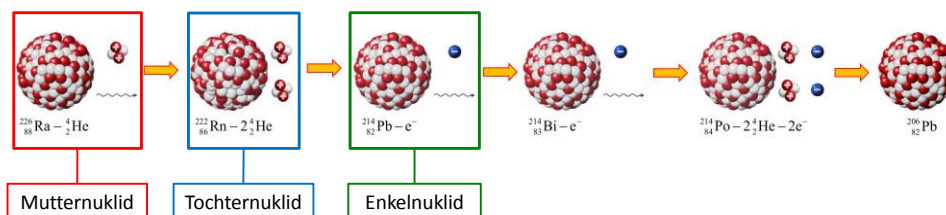
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/kerphysik-grundlagen>

39

Zerfälle und radioaktive Strahlung

- Prinzipiell wird zwischen drei Arten von radioaktiver Strahlung unterschieden:
 - Alpha-Strahlung
 - Beta-Strahlung
 - Gamma-Strahlung
- Alpha- und betastrahlende Isotope verändern die Zusammensetzung ihres Atomkerns während sie zerfallen, Gamma-Strahler nicht



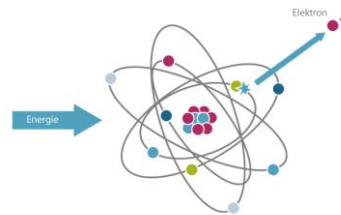
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Verändert nach http://www.klett.de/software/shockwave/prisma_physik_o/fpp_ip04wv230/index.html

40

Einteilung der ionisierenden Strahlungen

- Ionisierende Strahlung: Jede Teilchen- oder elektromagnetische Strahlung, die in der Lage ist, aus Atomen oder Molekülen Elektronen zu entfernen
- Direkt ionisierende Strahlung („Strahlung mit Ladung“):
 - **Alpha-Strahlung** (2-fach positiv geladen)
 - **Beta-Strahlung** (1-fach positiv/negativ geladen)
 - Protonen-Strahlung (1-fach positiv geladen)
- Indirekt ionisierende Strahlung („Strahlung ohne Ladung“):
 - Neutronen-Strahlung
 - **Gamma-Strahlung**
 - Röntgenstrahlung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.medicalradiation.com/wp-content/uploads/ionization.jpg> 17713

41

Direkt ionisierende Strahlung

- Die Ionisation findet unmittelbar entlang der Bahn des ionisierenden Teilchens statt
- Beispiel: Ein Alpha-Teilchen ist sehr groß und schwer und mit seiner relativ großen Masse kann es viel, aber vergleichsweise langsam mit der Umgebung interagieren und viele Atome/Moleküle ionisieren



Alpha-Strahler in der Nebelkammer

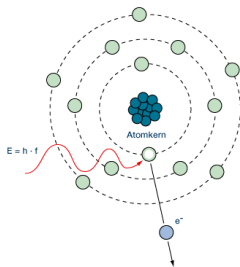
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.leifiphysik.de/themenbereich/nukleonika/strahlung/versuche>

42

Indirekt ionisierende Strahlung

- Bei der indirekt ionisierenden Strahlung erfolgt der Großteil der Ionisation durch ein durch die Strahlung erzeugtes, reaktives Teilchen
- Trifft z.B. Gamma-Strahlung auf einen Körper, so wird diese bei den meisten Wechselwirkungen schnell vernichtet und erzeugt dabei nur wenige Elektronen durch Ionisation (Primärelektronen)
- Die Primärelektronen können jedoch direkt ionisierend wirken und erzeugen dabei Sekundärelektronen



Hochenergetisches Primärelektron, das nun viele weitere Elektronen (Sekundärelektronen) durch Ionisation von Nachbaratomen/Molekülen erzeugen kann.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

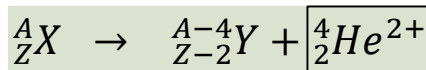
Quelle: <http://www.comet.de/Arbeitskreis/Strahlungmedien>

43

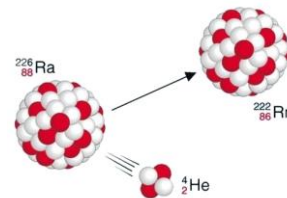
Alpha-Strahlung

- Alpha-Strahlung tritt beim Alpha-Zerfall auf und ist eine Teilchenstrahlung
- Mechanismus:

Alpha-Teilchen



- Eigenschaften des Alpha-Teilchens:
 - Relative Atommasse: 4 u (2 Protonen und 2 Neutronen)
 - Elektrische Ladung: + 2e
 - Kinetische Energie: einige MeV
 - Teilchenenergie: rund 10% Lichtgeschwindigkeit



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.zv-jena.de/Mengen/Alphaentstehung.de>

44

Alpha-Zerfall

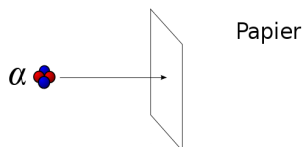
- Bei jedem Zerfall muss die Ladungsbilanz am Ende stets Null ergeben
- Beim Alpha-Zerfall ist der zurückgebliebene Kern scheinbar zweifach negativ geladen
- Die Elektronen werden jedoch an die Umgebung abgegeben, indem der Kern aufgrund des hohen Rückstoßes mit der Umgebung wechselwirkt

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

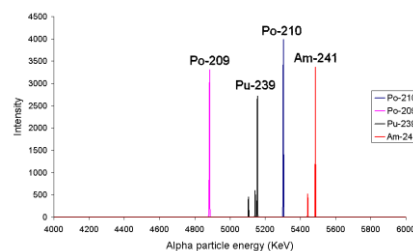
45

Eigenschaften der Alpha-Strahlung

- Direkt ionisierende Strahlung
- Sehr geringe Reichweite und Eindringtiefe, aufgrund ihrer relativ großen Masse und elektrischen Ladung:
 - Reichweite in Luft bei einer Teilchenenergie von 10 MeV: ca. 10 cm
 - Reichweite in Wasser/organischem Material bei einer Teilchenenergie von 5 MeV: 40 μm
- Linienspektrum (charakteristisch für jedes Nukleotid)



Reichweite: Die Distanz, die ein Teilchen in einem Medium zurückgelegt hat, bis seine Anfangsenergie auf den Wert seiner thermischen Energie abgesunken ist.



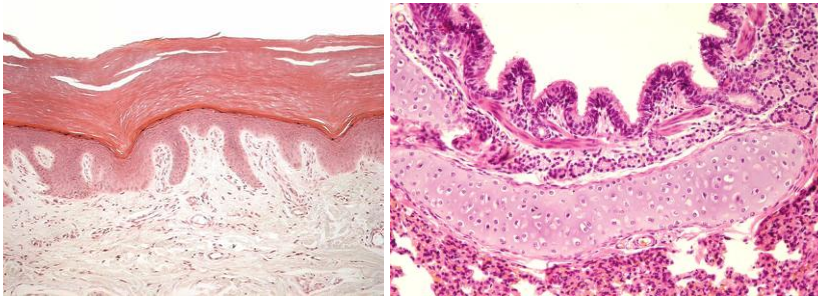
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4f/Alpha_beta_gamma_radiation.png, verändert nach <http://radioactivity.fkit.uni-wuerzburg.de/radiation/radiation.html>

46

Biologische Wirkung

- Alpha-Strahlung wird bereits von einem Blatt Papier abgeschwächt
- Von außen zugeführt dringt die Strahlung nur in die obersten Hornschichten der Haut vor und ist somit (relativ) ungefährlich
- Von innen zugeführt ist sie sehr schädlich, da hier keine toten Hornschichten die schädliche Strahlung abschwächen



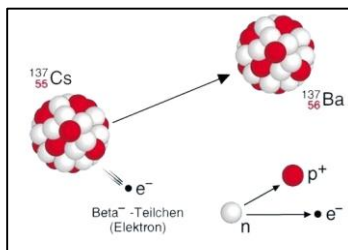
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: http://www.kgu.de/morphologie/Photos/Strahlungsorgane/004_3.jpg <http://www.mh-hannover.de>

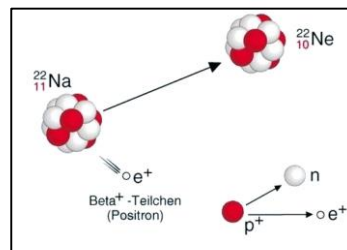
47

Beta-Strahlung

- Beta-Strahlung tritt beim Beta-Zerfall auf und ist eine Teilchenstrahlung
- Es wird unterschieden zwischen:
 - Beta-Minus-Zerfall
 - Beta-Plus-Zerfall



Beta-Minus-Zerfall



Beta-Plus-Zerfall

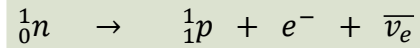
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.zv-jena.de/energie/Atomstrahlung.html>

48

Beta-Minus-Zerfall

- Isotope mit einem Neutronenüberschuss neigen dazu, sich diesem Neutron durch den Beta-Minus-Zerfall zu entledigen
- Mechanismus:



- Das Elektron (e^-) und das Elektron-Antineutrino ($\bar{\nu}_e$) verlassen den Kern
- Das Elektron kommt nicht von den Elektronen der Schale des Atoms

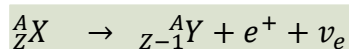
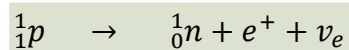
Beim Beta-Minus-Zerfall wird ein Neutron des Kerns in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino umgewandelt. Das dabei entstehende Proton bleibt im Kern zurück.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

49

Beta-Plus-Zerfall

- Isotope mit einem Protonenüberschuss neigen dazu, sich diesem Proton durch den Beta-Plus-Zerfall zu entledigen
- Mechanismus:



- Das Positron (e^+) und Elektron-Neutrino (ν_e) verlassen den Kern

Beim Beta-Plus-Zerfall wird ein Proton des Kerns in ein Neutron, ein Positron und ein Elektron-Neutrino umgewandelt. Das dabei entstehende Neutron bleibt im Kern zurück.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

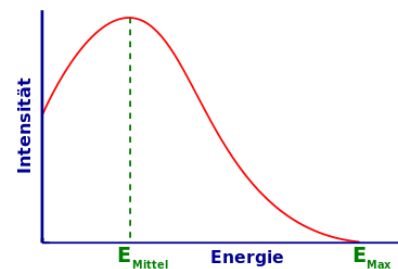
50

Eigenschaften der Beta-Teilchen

- Kein Linienspektrum, sondern kontinuierliches Spektrum mit maximaler Energie, da die Energie auf das Beta-Teilchen und das Neutrino verteilt wird und dies nicht immer gleich
- Direkt ionisierende Strahlung (jedoch ca. 1000-fach geringeres Ionisationsvermögen als Alpha-Strahlung)
- Reichweite bei einer Teilchenenergie von 1 MeV:
 - In Luft: ca. 3 m
 - In Gewebe: ca. 5 mm

Eigenschaft	Elektron (β^- -Zerfall)	Positron (β^+ -Zerfall)
Masse	$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	
Elektrische Ladung	$q = -e$	$q = +e$
Kinetische Energie	Einige MeV	
Teilchengeschwindigkeit	Bis zu 99% Lichtgeschwindigkeit	

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

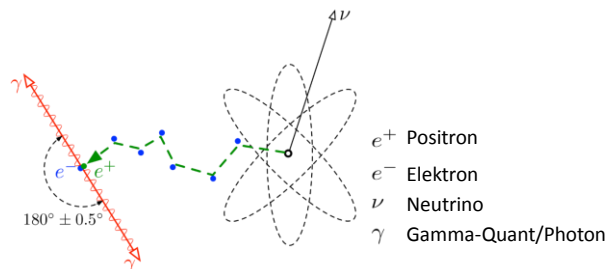


Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Physikalische_Grundlagen_der_Nuklearmedizin/_Interaktion_von_Strahlung_mit_Materie

51

Lebensdauer eines Positrons

- Die beim Zerfall entstandenen Positronen sind sehr kurzlebig
- Bei der Wechselwirkung mit einem Elektron findet Annihilation (Paarvernichtung) statt
- Dabei vernichten sich Elektron und Positron und werden in zwei Gamma-Photonen mit einer Energie von je 510 keV umgewandelt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <https://de.wikipedia.org/wiki/Annihilation>

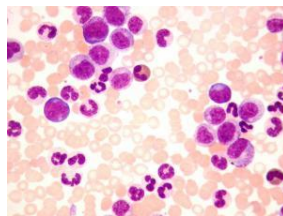
52

Biologische Wirkung

- Von außen zugeführt:
 - Schädigung der oberen Hautschichten: intensive Verbrennungen/Hautkrebs
 - Schädigung der Linse im Auge: Linsentrübung
- Von innen zugeführt:
 - Schilddrüsenkrebs als Folge von radioaktivem Jod, das eingelagert wurde
 - Knochenkrebs und Leukämie als Folge von radioaktivem Strontium, das eingelagert wurde

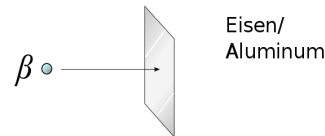


Einlagerung von radioaktivem Jod in die Schilddrüse



Blutkrebs durch Anreicherung von radioaktivem Strontium im Knochen

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017



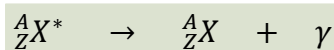
Quelle: <http://www.anatomie-online.com/Media/Jod-Thyroid-Schilddruese.jpg>, <http://www.klinikenkollagen.de>, verändert nach <http://de.wikipedia.org/wiki/Strontium-90#/media/Datei:Strontium-90.jpg>

53

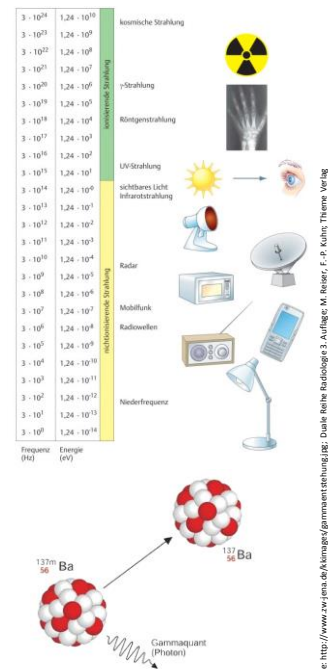
Gamma-Strahlung

- Gammastrahlende Isotope verändern weder ihre Protonen- noch ihre Neutronenzahl

- Mechanismus:



- Es findet also keine Umwandlung von Nukleonen, sondern vielmehr eine Art Neuordnung dieser statt, die dabei von einem energetisch ungünstigen in einen energetisch günstigen Zustand wechseln
- Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von Gamma-Strahlung frei



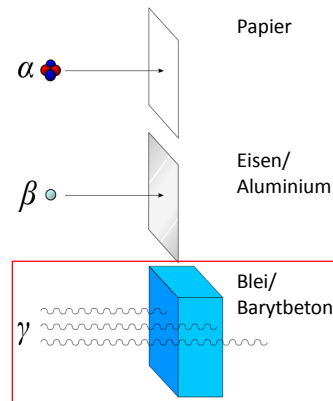
Quelle: <http://www.rv-jena.de/A/Kunze/Gammastrahlung.jpg>, Quelle: Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Heiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

54

Eigenschaften der Gamma-Strahlung

- Elektromagnetische Welle bzw. Photon
- Ladung: keine elektrische Ladung
- Photonenenergie: MeV-Bereich
- Geschwindigkeit: Lichtgeschwindigkeit
- Linienspektrum (charakteristisch für das jeweilige Isotop)
- Indirekt ionisierende Strahlung
- Stark durchdringende Wirkung: Bleiplatten können die Strahlung abschirmen



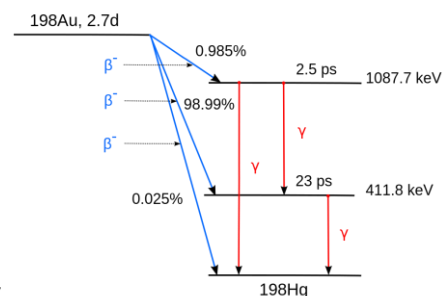
Quelle: Verändert nach https://de.wikipedia.org/wiki/Radioskizze/KM444/mmedia/File:Alpha_beta_gamma_radiation.svg

55

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Prompte Gamma-Strahlung

- Oft verbleibt ein Atom nach dem Alpha- oder Betazerfall in einem angeregten, energetisch ungünstigen Zustand
- Daher emittiert dieses Atom unmittelbar (innerhalb von $10^{-13} - 10^{-18}$ s) nach dem eigentlichen Zerfall Gamma-Strahlung, um sich der überschüssigen Energie zu entledigen (in einem oder mehreren Schritten)
- Es wechselt dabei in einen energetisch günstigeren Zustand



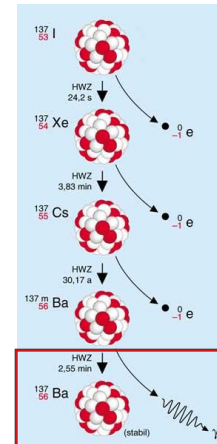
Quelle: Verändert nach <http://de.wikipedia.org/wiki/Zerfallsschema>

56

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Isomerer Übergang

- Isomere: Kerne mit gleicher Massen- und Protonenzahl aber verschiedenen Anregungszuständen
- Findet die Emission von Gamma-Strahlung nicht unmittelbar nach dem eigentlichen Zerfall eines Atoms (Alpha-/Beta-Zerfall), sondern nach einer gut messbaren Zeitspanne statt, so spricht man von einem isomeren Übergang
- Diese Tatsache wird z.B. im Technetium-Generator verwendet



Quelle: Verändert nach <http://www.kernfragen.de/kernfragen/kernov/Nuclide/nucleid.asp>

57

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Biologische Wirkung

- Somatische Schädigungen, z.B. Strahlenkrankheit
- Schädigung des Erbgutes und Vererbung auf Nachkommen
- Schädigung des Erbgutes und Induktion von Tumorstadium (Tumorsuppressorgeninaktivierung bzw. Onkogenaktivierung)



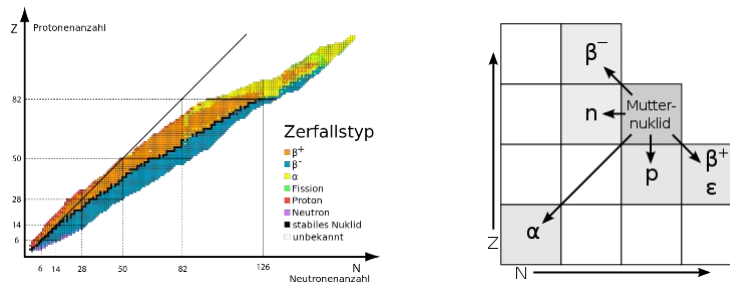
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Victim_of_Atomic_Bomb_002.jpg

58

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Nuklidkarte

- Graphische Darstellung aller bekannten Nuklide (Atomsorten)
- Auf dieser sind die Kernzerfallsprozesse nachvollziehbar



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

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

59

Mathematische Beschreibung der Zerfallsprozesse

- Der radioaktive Zerfall ist ein zufälliger Vorgang
- Es lassen sich jedoch statistische Aussagen über diesen Vorgang für eine große Anzahl von Kernen machen
- Das Zerfallsgesetz gibt an, wie viele instabile Kerne nach einer bestimmten Zeit noch von der ursprünglichen Kernanzahl, die aufgrund von Zerfällen reduziert wurde, vorhanden sind:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Diagram illustrating the decay law equation $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ with labels for each term:

- $N(t)$: Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne zu einer bestimmten Zeit t
- N_0 : Anzahl der instabilen Kerne zur Zeit $t = 0$
- λ : Zerfallskonstante $\left[\frac{1}{s} \right]$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

60

Zerfallszeiten

- Mittlere Lebensdauer: Die Zeit, nach der die Anzahl der instabilen Kerne auf den e-ten Teil des Ausgangswertes gesunken ist:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- Halbwertszeit: Die Zeit, nach der die Anzahl der instabilen Kerne auf die Hälfte des Ausgangswertes gesunken ist:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

$$\text{Es gilt: } N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

61

Aktivität

- Aktivität: Anzahl der Kernzerfälle pro Zeiteinheit (Analogie zur Chemie: negative Zerfallsgeschwindigkeit)

$$\Lambda(t) = -\frac{\Delta N(t)}{\Delta t} \quad [\text{Bq} = \text{Becquerel}]$$

$$\Lambda(t) = \lambda \cdot N(t)$$

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Diagnostik: Je kleiner die Halbwertszeit, desto größer die Aktivität. Große Aktivitäten sorgen für eine große Anzahl von Signalen in einer gewissen Zeitspanne, sodass das Signal-Rauschverhältnis möglichst groß ist. Je größer dieses Verhältnis, desto genauer ist die Messung.

$$\Lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} \cdot N$$

Die Aktivität folgt demselben exponentiellen Verlauf wie die Anzahl der noch nicht zerfallenen Atomkerne.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

62

Aktivitätsbegriffe

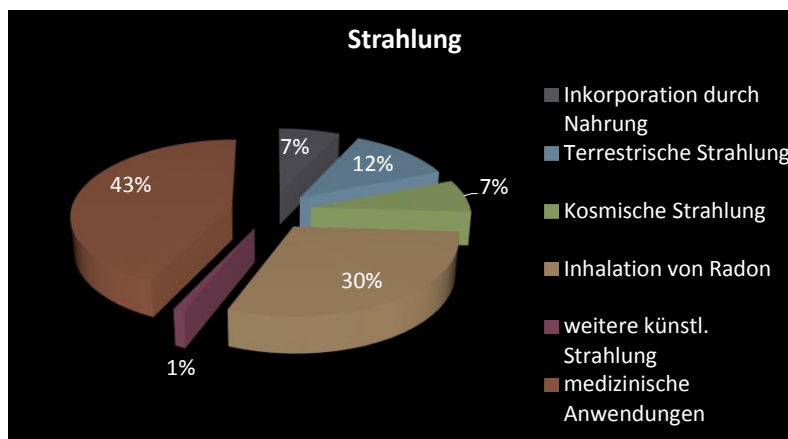
- Aktivität:
 - Zerfälle pro Sekunde
 - Einheit: Bq
- Spezifische Aktivität:
 - Zerfälle pro Sekunde pro Gramm
 - Einheit: Bq/g
- Aktivitätskonzentration:
 - Zerfälle pro Sekunde pro Volumeneinheit
 - Einheit: Bq/ml

1 Bq = 1 Kernzerfall pro Sekunde

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

63

„Aufnahmequellen“ ionisierender Strahlung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: verändert nach <http://www.kifphysik.de>

64