

Kapitel 13: IONISIERENDE UND NICHT IONISIERENDE STRAHLEN

Inhalt:

ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG	201
SCHALLWELLEN	202
PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN IONISIERENDER STRAHLUNG	203
RADIOAKTIVER ZERFALL	208
PHOTOGRAPHIE	218
AUTORADIOGRAPHIE	220
LITERATUR	221
LINKS	221

Elektromagnetische Strahlung

Frequenz	Wellen-		
ν / s^{-1}	Länge		
	λ / m		
		Kosmische Strahlung	
10^{20}	10^{-12}		
	10^{-11}		
	10^{-10}	γ -Strahlung	
10^{17}	10^{-9}	Röntgen Strahlung	Ionisierende
	10^{-8}		Strahlung
	10^{-7}	Ultraviolett	
	10^{-6}	Licht	
10^{13}	10^{-5}	Infrarot	Optik
	10^{-4}		
	10^{-3}		
	10^{-2}	Mikrowelle	
10^9	10^{-1}		
	10^0		
	10^1	Kurzwelle	Hochfrequenz
	10^2		
10^5	10^3	Mittelwelle	
	10^4		
	10^5	Langwelle	
	10^6	Netzfrequenz	

10 ¹	10 ⁷	Atmospherics	Niederfrequenz
-----------------	-----------------	--------------	----------------

Die Wellenlänge von elektromagnetischer Strahlung berechnet sich wie folgt:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$c \cong 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ Lichtgeschwindigkeit; ν = Frequenz

Je höher die Frequenz einer elektromagnetischen Strahlung ist, desto energiereicher ist sie. Man spricht dann von **ionisierender Strahlung** (oder auch von Korpuskeln), da bei ihrer Wechselwirkung mit Materie Ionisierung erfolgt. Die Grenzen zwischen den einzelnen Strahlenarten sind fließend, so unterscheiden sich γ - und Röntgenstrahlung lediglich durch ihre Entstehung.

Nicht-ionisierende elektromagnetische Strahlen haben eine niedrigere Frequenz (obwohl sie in der Radiotechnik "Hochfrequenz-Strahlen" heißen) und transportieren geringe Energie. Stromtransport über Hochspannungs- und Haushaltsleitungen geschieht über sehr geringe Frequenzen. Die dabei abgestrahlte Strahlung wird umgangssprachlich auch als Elektromog bezeichnet.

Schallwellen

Eine zweite Gruppe der nicht-ionisierenden Strahlung wird von den Schallwellen gebildet. Diese Longitudinalwellen sind Druckschwankungen in Gasen, Flüssigkeiten oder elastischen festen Stoffen, die sich durch periodische Schwingungen einzelner Moleküle des Mediums ausbreiten. Diese Bewegung wird auf benachbarte Teilchen durch Anstoßen übertragen, wodurch es zur Verdichtung und Verdünnung der Materie und zur Fortpflanzung des Schalls kommt. Treten diese Schwingungen in Luft auf, spricht man von Luftschall. Breiten sich Schwingungen in festen Körpern aus, nennt man dies Körperschall. Auch in Flüssigkeiten kann sich Schall ausbreiten. Im Vakuum gibt es keine Schallausbreitung, da keine Materie vorhanden ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Schallwellen ist:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

c = Schallgeschwindigkeit E = Elastizitätsmodul ρ = Dichte

Die Schallgeschwindigkeit nimmt von den Gasen (Luft ca. 330 m/s) über Flüssigkeiten (Wasser ca. 1400 m/s) zu den Festkörpern (Stahl ca. 5000 m/s) hin zu.

Was wir als Schall wahrnehmen, sind also Luftdruckunterschiede, die dem natürlichen Luftdruck überlagert sind. Sie können als Ultraschall oder als Stoßwellen hohe Energie in Flüssigkeiten und Gewebe übertragen. Dies kann beispielsweise Kavitation verursachen, wodurch lokal hohe Temperaturen entstehen und zahlreiche freie Radikale gebildet werden. Stoßwellen und gepulster Hochenergie-Ultraschall werden unter anderem zur Zertrümmerung von Nierensteinen verwendet. Ultraschall wird zur Therapie von Verletzungen und Erkrankungen des Bewegungsapparats, wie z. B. Rheuma, eingesetzt. Weite Verbreitung hat Ultraschall in der Diagnostik gefunden, jedoch bei entsprechend hoher Dosierung können auch Nebenwirkungen nicht ausgeschlossen werden. Unsinnige Untersuchungen, wie Serienaufnahmen Ungeborener für das Familienalbum, sollten daher vermieden werden.

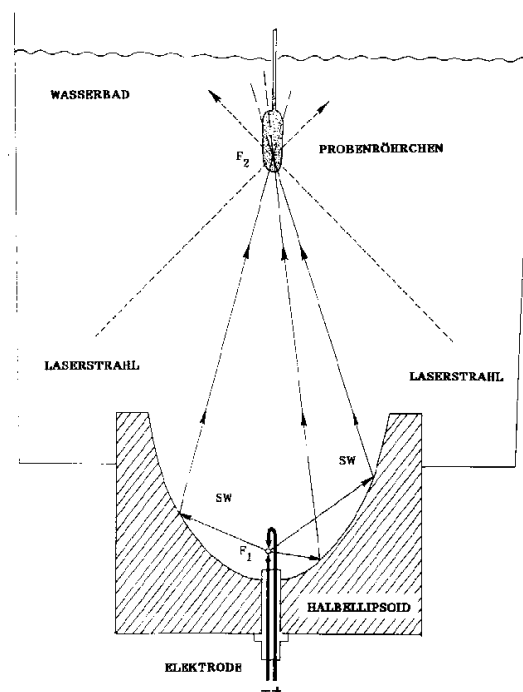


Abb. 151: Erzeugung von Stoßwellen:
Unterwasserfunkenstrecke

Physikalische Grundlagen ionisierender Strahlung

Für die Aktivität einer radioaktiven Strahlung gilt die Einheit $s^{-1} = 1 \text{ Bq}$ (Becquerel). Dies gibt nur die Anzahl radioaktiver Kernumwandlungen pro Sekunde an. Da mit der Strahlung Energie transportiert wird, kann man unabhängig von ihrer Wirkungsart über die in Materie absorbierte Energie eine Dosis angeben, dies ist eine "Äquivalent"dosis. Da es Strahlenarten gibt (Neutronen, α -Teilchen), die ihre Energie in den Körperzellen kompakter und daher wirksamer abgeben als β - und γ -Strahlen, hat man einen physikalischen Qualitätsfaktor eingeführt, der von 1 (für β - und γ -Strahlen: Photonen, Elektronen, Positronen) über 10

(Neutronen) bis zu 20 (α -Teilchen aus Radionukliden) reicht.

Größen und Einheiten ionisierender Strahlung

Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Aktivität

Die Aktivität eines Radionuklids gibt die Anzahl der spontanen Kernumwandlungen pro Zeiteinheit an.

Einheit: "Becquerel" $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$

Energiedosis

Auf das Material in einem Volumenelement übertragene Energie der Strahlung geteilt durch die Masse dieses Volumenelements.

Einheit: "Gray" $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$

Äquivalentdosis

Produkt aus der Energiedosis in Weichteilgewebe und dem Qualitätsfaktor der Veröffentlichung Nr. 51 der International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU Publications, 7910). Der Zahlenwert des Qualitätsfaktors hängt vom unbeschränkten linearen Energieübertragungsvermögen der jeweiligen Strahlungsart in Wasser ab. Für Photonen und Elektronen aller Energien hat der Qualitätsfaktor den Wert 1.

Einheit: "Sievert" $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$

Strahlenbelastung

Die maximal zulässige Strahlendosis ist 0,32 mSv/Jahr, deren Höhe durch natürliche Belastung, Röntgendiagnostik, Bildschirmgeräte, und Kerntechnische Anlagen nicht überschritten werden sollte. Dies entspricht etwa 1.000 Bq Jod 131 oder 10.000 Bq Cs 137. Bei dem Reaktorunfall in Tschernobyl wurde Radioaktivität freigesetzt, die auf die 200 - 400fache Menge der bei den Atombombenabwürfen auf Hiroshima oder Nagasaki freigesetzten Strahlung geschätzt wird. Die Folgen dieser nuklearen Katastrophe sind immer noch nicht in ihrer ganzen Tragweite absehbar. Die Strahlung konnte dabei von außen und von innen auf Mensch, Tier und Pflanzen wirken. Von außen drang dabei fast ausschließlich γ -Strahlung in die Körper ein (Fallout, verstrahlte Pflanzen). Von innen konnte z.B. inkorporiertes Cäsium (über Milch) oder Iod (über Atemluft) wirksam werden. Radioaktive Stoffe können sich in einigen Organen ansammeln, wo dann die α - und die β -Strahlung den Zellen besonders

gefährlich wird. Radioaktives Iod kann zu Schilddrüsenerkrankungen führen, Strontium kann sich im Knochenmark ablagern.

Für den tatsächlichen Einbau sind jedoch nur Abschätzungen möglich. Bei Strahlenwirkung in lebenden Zellen unterscheidet man als primäre Strahlenreaktion direkt ionisierende Strahlung (Elektronen und andere geladene Teilchen) und indirekt ionisierende Strahlung (Photonen, Neutronen und andere ungeladene Teilchen). In vielen Schadensfällen ist Reparatur durch die Zelle möglich, irreparable Fälle können oft erst nach langer Zeit sichtbar werden (Tumorentstehung, Unfruchtbarkeit, vorzeitiges Altern). Die Festlegung von Grenzwerten ist schwierig und wird kontrovers diskutiert, da es sich hierbei um "Ein-Treffer-Prozesse" handelt, d.h. ein "richtiger" Treffer kann fatale Folgen haben, wenn er vom körpereigenen Reparatursystem nicht erkannt oder nicht wirksam ausgeglichen wird.

Wir kennen auf Grund der beobachtbaren Effekte vier Phasen der Strahlenwirkung, die sich beträchtlich in ihrer Dauer unterscheiden:

- physikalisch: 10^{-13} s
- physiko-chemisch: 10^{-10} s
- chemisch: 10^{-6} s
- biologisch: Jahre

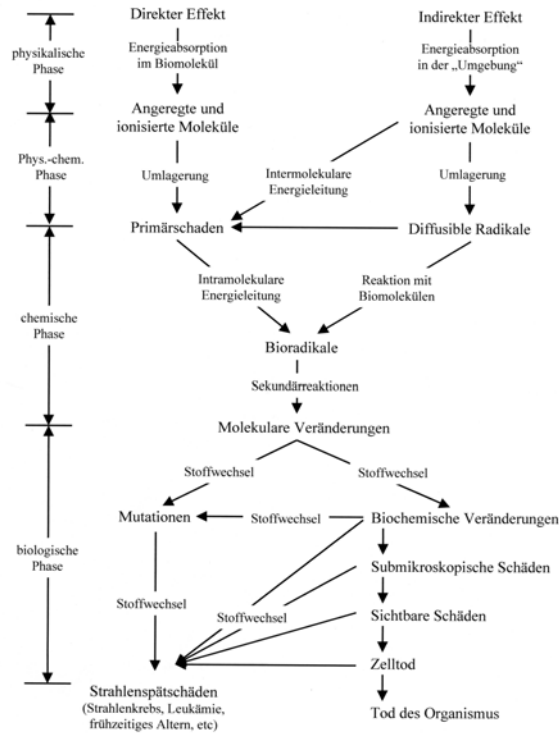


Abb. 152: Zeitliche Phasen der Strahlenwirkung (nach: Dertinger und Jung: "Molekulare Strahlenbiologie" Springer Verlag)

Stabile und radioaktive Isotope

Elemente sind aus Atomen aufgebaut und alle Atome bestehen aus einem dichten Kern, der von umlaufenden Elektronen umgeben ist. Chemische Eigenschaften eines Atoms werden durch die Elektronenhülle bestimmt, diese wiederum hängt von der Zahl der Protonen im Kern ab. Gleiche Ladungen stoßen sich ab, daher sind die Protonen im Kern eigentlich in einem instabilen Zustand und sollten auseinander streben. Lokale Kernkräfte halten jedoch die Nukleonen (Protonen und Neutronen) zusammen. Ist das Gleichgewicht von Protonen, Neutronen und Kernkräften gestört, dann kommt es zum Zerfall dieser "radioaktiven" Isotope. Durch Abgabe von Energie ("radioaktiver Zerfall") gehen sie in einen anderen und letztlich in einen stabilen Zustand über.



Ordnungszahl **Z**: Anzahl der Protonen im Atomkern

Neutronenzahl **N**: Anzahl der Neutronen im Atomkern

Massenzahl **A**: Summe der Protonen und Neutronen

Wir unterscheiden **vier natürliche Zerfallsreihen** ausgehend von Thorium, Neptunium, Uran-Radium und Uran-Aktinium.

Atome mit gleicher Protonen- aber unterschiedlicher Neutronenzahl bezeichnet man als Isotope eines chemischen Elements (gleiche Stelle im periodischen System, jedoch unterschiedliche Masse). Sie zeigen chemisch gleiches Verhalten, denn sie besitzen die gleiche Anzahl Protonen und die gleiche Anzahl Elektronen in der Hülle.

Wasserstoff hat z.B. die Isotope: Deuterium und Tritium:

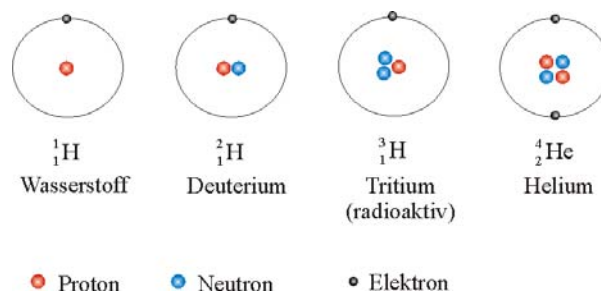
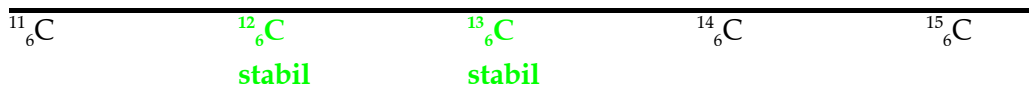


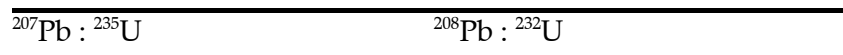
Abb. 153: Verschiedene Isotopenformen

Aufgrund der großen Massenunterschiede kann man radioaktive Markierungen auch zur Auftrennung von Molekülen nutzen.

Isotope des Kohlenstoffs:



Mit Hilfe des β^- -Strahlers ${}^{14}_6\text{C}$ können Altersbestimmungen durchgeführt werden. Ausschlaggebend hierfür ist das Verhältnis von ${}^{12}_6\text{C} : {}^{14}_6\text{C}$. Jüngere Pflanzen (Hölzer) haben einen höheren ${}^{14}\text{C}$ -Anteil als ältere. Über die ${}^{14}_6\text{C}$ Halbwertszeit von $T_{1/2} = 5590$ Jahre lassen sich damit "archäologische" Zeiträume recht gut bestimmen. Für Altersbestimmungen der Erde benutzt man die natürlichen Zerfallsreihen und bestimmt das Verhältnis von Uran : Blei (Halbwertszeiten von etwa 109 Jahren).



Es gibt mehr als 40 natürlich vorkommende radioaktive Substanzen. Alle Elemente mit einer Ordnungszahl größer als 83 sind natürlich radioaktiv. Außerdem gibt es mehr als 1000 künstlich radioaktive Substanzen. Radioaktive Isotope sind instabil und zerfallen spontan unter Energieabgabe (Aussendung von α -, β - oder γ -"Strahlen").

Nuklid: Menge gleicher Atome

Element: natürliche Mischung der Nuklide

Radioaktiver Zerfall

α -Zerfall

Beim α -Zerfall emittiert ein Atomkern ein aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehendes α -Teilchen (= Heliumkern) mit einer bestimmten kinetischen Energie. Diese kinetische Energie des α -Teilchens entsteht durch einen Massenverlust Δm . Deshalb ist die Energie des α -Teilchens genau definiert und für alle Teilchen gleich groß. Man erhält eine diskrete Energieverteilung. α -Zerfall tritt hauptsächlich bei den schweren Kernen auf.

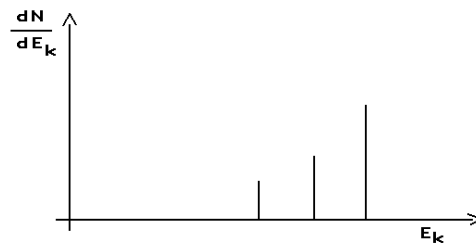
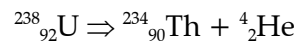


Abb. 154: Diskretes Energiespektrum von alpha-Teilchen



Ordnungszahl $Z \Rightarrow Z - 2$ Massenzahl $A \Rightarrow A - 4$

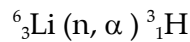
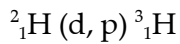
Ladung der α -Teilchen: freie Elektronen diffundieren oder wandern im Element. Das α -Teilchen gibt beim Durchqueren von Materie seine Energie im wesentlichen durch Ionisation in vielen Schritten ab. Streuungen treten praktisch nicht auf, so dass ihre Bahn im allgemeinen geradlinig verläuft und ihre Reichweite genau definierbar ist. α -Strahler liefern Teilchen von 2 bis ca. 10 MeV Energie. 1 eV entspricht der kinetischen Energie eines Teilchens mit einer Elementarladung ($1,602 \times 10^{-19}$ C), das die Potentialdifferenz von 1 V durchlaufen hat. Das Elektronenvolt (eV) ist in der Atom- und Kernphysik die Einheit für die Größe Energie.

β -Zerfall

Beim β -Zerfall gibt ein Atomkern Energie ab, indem er ein Elektron und ein Anti-Neutrino bildet und beide mit kinetischer Energie emittiert, wie bei Tritium:



${}^{14}\text{C}$ ist das einzige sich ständig neu bildende radioaktive Isotop. Es entsteht aus Stickstoff in den oberen Schichten der Erdatmosphäre als Folge der kosmischen Strahlung. Viele (radioaktive) Isotope werden durch Bestrahlung hergestellt:



Beim Zerfall wandelt sich im Kern ein Neutron in ein Proton um, wobei, wie beim α -Zerfall, aus einem Massenverlust Δm Energie entsteht. Das Anti-Neutrino $\bar{\nu}$ hat die Ruhemasse 0, bewegt sich stets mit Lichtgeschwindigkeit und teilt mit dem Elektron die Energie $\Delta m c^2$ statistisch auf. Damit entstehen Elektronen aller Energien von $E_e = 0$ bis $E_e = E_{\text{max}} = \Delta m c^2$

Deshalb ist der β -Zerfall immer durch ein Energiespektrum gekennzeichnet und man erhält eine kontinuierliche Energieverteilung. Die Energie des Anti-Neutrinos ist praktisch verloren, da es nur eine verschwindend geringe Wechselwirkung mit Materie zeigt.

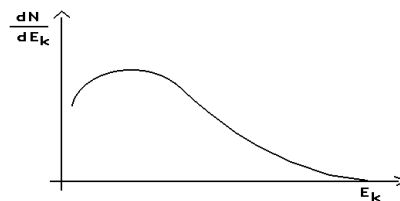


Abb. 155: Kontinuierliches Energiespektrum bei β -Teilchen

Die Elektronen, die ein β -Strahler aussendet, haben aufgrund ihrer unterschiedlichen Energie auch verschieden große Reichweiten in Materie. Die Schwächung der Energie erfolgt hauptsächlich durch Ionisationsprozesse, wobei β -Teilchen (also Elektronen) bei der Wechselwirkung mit dem Absorbermaterial beträchtlich aus ihrer Flugbahn abgelenkt werden, die deshalb zickzackförmig verläuft.

Eigenschaften einiger β -Strahler, die häufig in der Biologie oder Medizin eingesetzt werden

	Symbol	Halbwertszeit	Partikelenergie (MeV)	Maximale Reichweite in Wasser (μm)
Wasserstoff	${}^3\text{H}$ (Tritium)	12,26 Jahre	0,0186	8
Kohlenstoff	${}^{14}\text{C}$	5760 Jahre	0,156	300
Natrium	${}^{24}\text{Na}$	15,5 Stunden	1,389	6000
Phosphor	${}^{32}\text{P}$	14,3 Tage	1,710	8000
Schwefel	${}^{35}\text{S}$	86,35 Tage	0,1674	300
Kalium	${}^{42}\text{K}$	12,4 Stunden	3,52 (82%); 1,97 (18%)	18000
Kalzium	${}^{45}\text{Ca}$	164 Tage	0,258	700
Strontium	${}^{89}\text{Sr}$	52 Tage	1,463	7000
Iod	${}^{131}\text{I}$	8,07 Tage	0,606 (90%)	2500

1 MeV (Million Elektronvolt) = 1.60×10^{-13} J

γ -Strahlung

γ -Strahlung ist eine energiereiche elektromagnetische Strahlung, die vom Atomkern selbst emittiert wird oder bei Wechselwirkung von Elementarteilchen entsteht (z.B. Röntgenstrahlung in der Atomhülle bzw. im Feld des Kerns). γ -Strahlung kann - ebenso wie α - und β -Zerfall - sowohl als Quant als auch als Welle betrachtet werden (Dualismus). Sie ist eine Begleiterscheinung von α - oder β -Zerfällen. Aus vielen α - und β -Zerfällen resultiert ein Tochterkern, der nicht in seinem niedrigsten Energiezustand, dem Grundzustand, vorliegt, sondern in einem angeregten Zustand mit bestimmter Lebensdauer und Restenergie. Diese Energie wird in Form eines γ -Quants genau definierter Energie E abgegeben. Es ist auch möglich, dass die Restenergie einem höheren angeregten Zustand entspricht und in mehreren γ -Quanten, einer Kaskade, abgegeben wird.

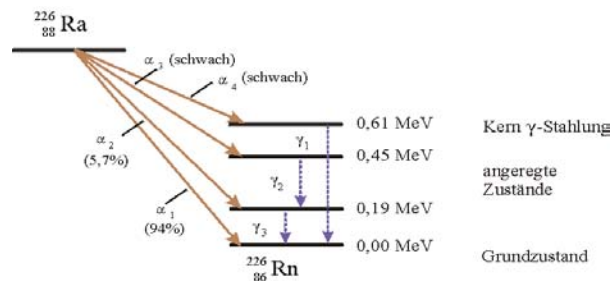


Abb. 156: Entstehung von Gammastrahlung beim Zerfall von Radon.

Röntgenstrahlung

Charakteristische (monochromatische) Röntgenstrahlung ist ein Linienspektrum: Übergang eines Atoms von einem höheren zu einem tieferen Energieniveau (innere Schalen sind beteiligt, daher höhere Energie als bei Fluoreszenzlicht, bei dem nur die Elektronen auf der äußersten Schale beteiligt sind). Anregung erfolgt durch Elektronenstoß oder Absorption (innere Ionisation) im Anodenmaterial.

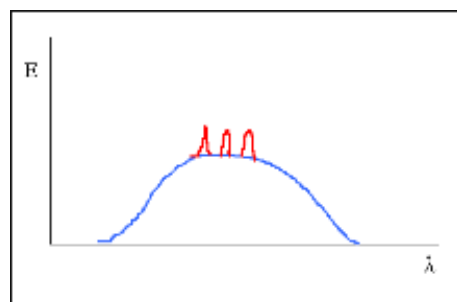


Abb. 157: Kontinuierliches Röntgenspektrum mit diskreten Linien.

Kontinuierliches Röntgenspektrum: durch Abbremsung der Elektronen beim Auftreffen auf ein Hindernis entsteht elektromagnetische Strahlung: Bremsstrahlung

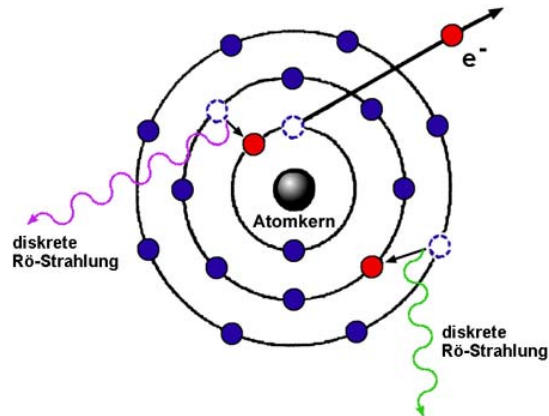


Abb. 158: Durch Abbremsung der Elektronen beim Auftreffen auf ein Hindernis entsteht elektromagnetische Strahlung: Bremsstrahlung



Abb. 159: Medizinische Nutzung von Bremsstrahlung: Röntgenaufnahme eines Ellenbogens.

Reichweite von Strahlung

Beim Eindringen von α - oder β -Teilchen in Materie kommt es zur Wechselwirkung mit den Atomen des bestrahlten Stoffs, wobei die eingedrungenen α - oder β -Teilchen abgebremst und absorbiert werden. Die Teilchenstrahlung kann deshalb nur bis zu einer gewissen Tiefe in die Materie eindringen. Sie hat in Materie also eine begrenzte Reichweite, die einerseits von Masse, Ladung und Geschwindigkeit der Teilchen und andererseits von der Dichte des

Absorbermaterials abhängt. Hauptsächlich geht die kinetische Energie der Teilchen durch Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen des Absorbermaterials verloren. Die Elektronen der Atomhülle werden dabei entweder auf energetisch höhere Bahnen gehoben (Anregung) oder aus dem Atom herausgeschleudert (Ionisation).

Das bei der Ionisation freiwerdende Elektron und den positiven Atomrest bezeichnet man als Ionenpaar, und die Energie, die zur Erzeugung eines Ionenpaars notwendig ist, als Ionisationsenergie. Sie ist für die einzelnen Elemente verschieden und liegt mit wenigen Ausnahmen zwischen 4 und 40 eV. Die Intensität der Strahlung nimmt mit der Absorberdicke exponentiell ab. Die Schwächung ist umso stärker, je niedriger die Energie des Teilchens, je höher seine Ladung und je höher die Ordnungszahl des Absorbermaterials ist.

In biologischen Geweben haben α -Teilchen mit einer kinetischen Energie von 7 MeV eine Reichweite von etwa 100 μm , während β -Teilchen mit einer Energie von 2 MeV ungefähr 10 mm tief eindringen können. Die von ^3H ausgesandten Elektronen ($E_{\text{max}} = 0,018 \text{ MeV}$) haben in biologischem Material eine mittlere Reichweite von ca. 3 μm . γ -Strahlung wird beim Durchgang durch Materie nur geschwächt, nie völlig absorbiert.

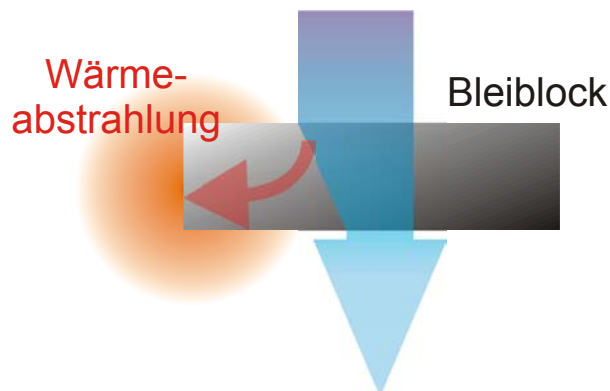


Abb. 160: Abschwächung von radioaktiven Strahlen durch Absorption

Zerfallsgesetz

Der radioaktive Zerfall ist ein statistischer Prozess, d.h. die Zerfälle erfolgen zufällig. Zur Charakterisierung des radioaktiven Zerfalls dient die Zeit, in der die Hälfte der vorhandenen aktiven Isotope zerfallen sind, die Halbwertszeit $T_{1/2}$.

Die Anzahl dN der in der Zeiteinheit dt zerfallenen aktiven Atome ist proportional der Gesamtheit der vorhandenen Atome N , wobei λ der Proportionalitätsfaktor ist und Zerfallskonstante genannt wird. Siehe [Kapitel Mathematik](#).

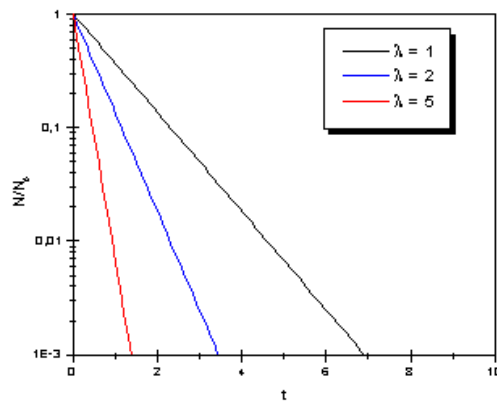
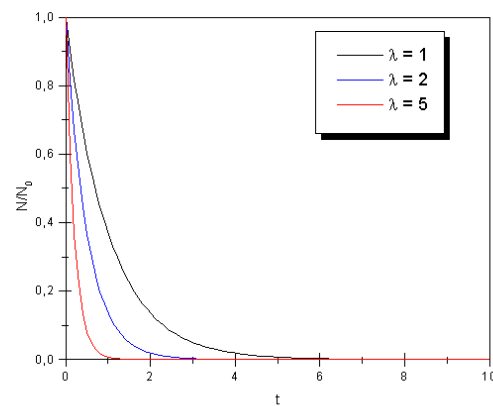


Abb. 161: Darstellung von Zerfallskurven mit unterschiedlicher Zerfallskonstante.

Halbwertszeit

Unter der Halbwertszeit eines Radionuklids versteht man die Zeit, in der die Hälfte der anfangs vorhandenen Zahl der instabilen Kerne zerfallen ist. Physikalische Halbwertszeit: $T_{1/2,P}$ ist die Zeit, nach der die Hälfte des radioaktiven Stoffes zerfallen ist.

$$\text{Physikalische Halbwertszeit: } T_{1/2,P} = \frac{\ln 2}{\lambda_p}$$

Biologische Halbwertszeit: $T_{1/2,B}$ ist die Zeit, nach der die Hälfte des radioaktiven Stoffes aus dem Organismus ausgeschieden wurde.

$$\text{Biologische Halbwertszeit: } T_{1/2,B} = \frac{\ln 2}{\lambda_B}$$

Effektive Halbwertszeit: T_{eff} ist die Zeit, nach der die Hälfte der radioaktiven Substanz aus dem Körper verschwunden ist. Bei diesem Vorgang sind physikalische und biologische Halbwertszeit "parallelgeschaltet".

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{B}} + \lambda_{\text{p}}$$

$$\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\ln 2} = \frac{\lambda_{\text{B}}}{\ln 2} + \frac{\lambda_{\text{p}}}{\ln 2}$$

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{1/2, \text{P}}} + \frac{1}{T_{1/2, \text{B}}} = \frac{T_{1/2, \text{P}} + T_{1/2, \text{B}}}{T_{1/2, \text{P}} T_{1/2, \text{B}}}$$

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{1/2, \text{P}} T_{1/2, \text{B}}}{T_{1/2, \text{P}} + T_{1/2, \text{B}}}$$

Aktivität

Die Aktivität $A = dN / dt$ ist ein Maß für die Stärke eines bestimmten Strahlers. Die Einheit ist Becquerel (Bq). Die Aktivität bezogen auf eine Masseneinheit wird als spezifische Aktivität α bezeichnet und es gilt:

$$\alpha = \frac{dA}{dm} \quad \text{Einheit: } \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$$

Beispiel: $^{24}\text{NaCl}$ habe die Aktivität $\alpha = 9,25 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} T_{1/2} = 15 \text{ h} = 54 \times 10^3 \text{ s}$$

$$N_{1/2} = \alpha \times T_{1/2} = 9,25 \times 10^{13} \times 54 \times 10^3 = 5 \times 10^{18} \text{ Atome/g}$$

⇒ Die Hälfte der ursprünglich vorhandenen radioaktiven Atome beträgt

10^{19} radioaktive Atome / g $^{24}\text{NaCl}$

1 g NaCl enthält wieviel Atome?

A_r von Na: 23; A_r von Cl: 35,4 ; M_r von NaCl: 60

⇒ Da pro Mol $6,023 \times 10^{23}$ Atome vorhanden sind,

sind in 1g Na 10^{22} Na-Atome.

$$N_{\text{akt}} : N_{\text{ges}} = 10^{19} : 10^{23} = 10^{-3}$$

⇒ Jedes 1000. Na-Atom ist radioaktiv markiert.

Geiger-Müller-Zähler

Radioaktive Strahlung lässt sich schnell mit einem Geiger-Müller-Zählrohr nachweisen. Es besteht i.a. aus einem Messinggehäuse (Kathode, neg. geladen) und einem gegen das Gehäuse isolierten Wolframdraht (Anode, pos. geladen). An den Elektroden liegt während der Messung eine Spannung von 1100-1500V an, die gerade so gewählt ist, dass noch keine spontanen Überschläge zur Rohrwand hin auftreten. Gefüllt ist das Zählrohr mit Edelgas, dem geringe Zusätze von mehratomigen organischen Dämpfen beigemischt sind um Dauerentladungen zu löschen. Tritt nun ein ionisierendes Teilchen durch das dünnwandige Fenster in das Zählrohr ein, so stößt es mit den Gasmolekülen zusammen und setzt aus diesen Elektronen frei. Die Elektronen werden durch die anliegende hohe Spannung zum Draht hin beschleunigt und setzen ihrerseits wieder Elektronen frei. Dadurch entsteht eine Elektronenlawine. Die darin enthaltene Ladungsmenge wird nach weiterer elektronischer Verstärkung als elektrischer Impuls registriert. Ein einfallendes Teilchen erzeugt nur dann einen Impuls, wenn die Elektronenlawine des vorhergehenden Teilchens schon entladen ist (Totzeit!).

Die Anzahl der Impulse muss daher der Radioaktivität der Probe nicht unbedingt proportional sein und es können keine Angaben über die Energie der ionisierenden Teilchen gemacht werden (d.h. man kann ^3H und ^{14}C nicht unterscheiden, beide lösen denselben Impuls aus). Außerdem erhält man auch keine Aussage über die Art der Kernstrahlung. Geiger- Müller-Zähler werden deshalb vorwiegend in der Strahlenschutzüberwachung eingesetzt. Für genaue und energieauflösende Messungen – insbesondere von β -Strahlern – werden dagegen Flüssigkeits-Szintillationszähler benutzt.

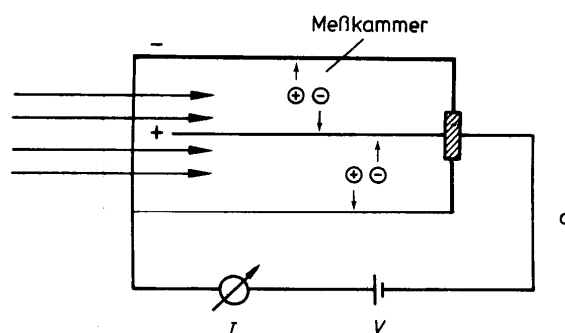


Abb. 162: Prinzip der Ionisationskammer eines Geiger-Müller-Zählers.

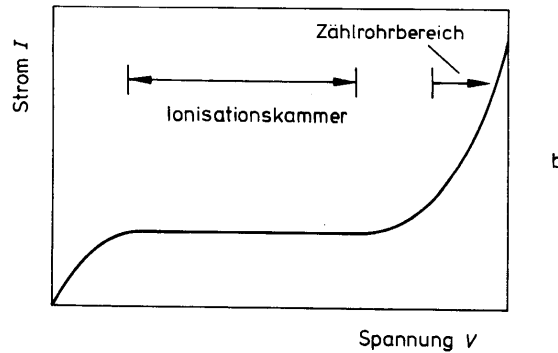


Abb. 163: Strom-Spannungskennlinie der Ionisationskammer.

Flüssigkeits-Szintillationszähler

Im Flüssigkeits-Szintillationszähler wird die radioaktive Probe in einem Lösungsmittel (Toluol) gelöst und zusammen mit dem sogenannten Szintillationscocktail (z.B. 1,4-Di-(5'phenyl-oxazol-2'yl)-benzol = POPOP) in das Probengläschen gefüllt. Da die Szintillationsflüssigkeit eine höhere Dichte als Gas besitzt, werden die ionisierenden Teilchen darin ihre ganze Energie abgeben können. Die Energieabgabe der ionisierenden Teilchen kann in 5 Schritte unterteilt werden:

1. Zerfall des radioaktiven Nuklids
2. Lösungsmittelmoleküle werden angeregt
3. Übertragung der Energie auf Szintillatormoleküle
4. Szintillatormoleküle kehren unter Aussendung von Photonen in den Grundzustand zurück (Fluoreszenz).
5. Photomultiplier (PM) registrieren die Photonen, wobei über eine Koinzidenzschaltung das Rauschen unterdrückt wird.

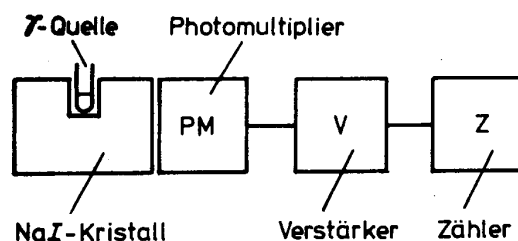


Abb. 164: Schema eines Flüssig-Szintillationszählers

Die Anzahl der erzeugten Photonen und damit auch die Höhe des registrierten elektrischen Impulses ist der Gesamtenergie des ionisierenden Teilchens proportional. Diese Impulse kann man einem Diskriminator zuleiten, der nun diejenigen Impulse in getrennten Kanälen zählt, die zwischen vorher eingestellten Impulshöhen liegen. So können niedrige Energien (kleinere

Impulshöhen) von höheren Energien (größere Impulshöhen) getrennt werden. Bei Doppelmarkierung mit β -Strahlern überschneiden sich die kontinuierlichen Energiespektren (siehe Abb. 9.3.) der beiden Isotope (siehe Abb. 9.8.) und man registriert eine gewisse Anzahl von Impulsen, die von ^{14}C ausgelöst werden in den Kanälen für ^3H und umgekehrt.

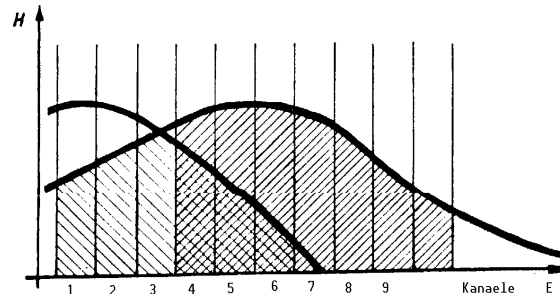


Abb. 165: Schema einer Energiediskrimination im Szintillationszähler am Beispiel von 8 Kanälen. In den Kanälen 1-6 wird beispielsweise ^3H gezählt; in den Kanälen 4-9 das Isotop ^{14}C . Bei Doppelmarkierung überlappen die beiden Nuklide in den Kanälen 4-6.

Eine weitere Verfälschung des Ergebnisses findet durch Quenchen statt. Unter Quench versteht man jedes energieabsorbierende Ereignis und unterscheidet zwischen chemischem Quench und Farbquench. Beim chemischen Quench kommt es zu chemischen Wechselwirkungen zwischen einer Komponente der Messprobe (z.B. CCl_4 , H_2O) und dem Szintillator, wodurch dessen Lichtemissionsfähigkeit vermindert wird und deshalb weniger Photonen gebildet werden. Es sieht dann so aus, als hätte das ionisierende Teilchen eine um den entsprechenden Energiebetrag geringere Energie, das Energiespektrum ist also zu niedrigeren Energien hin verschoben.

Wird die Übertragung von Photonen auf die Photomultiplier durch lichtabsorbierende Substanzen beeinflusst, dann gelangen wiederum weniger Photonen zur Registrierung. Dieser Vorgang wird als Farbquench bezeichnet und hat dieselbe Auswirkung auf das Energiespektrum wie der chemische Quench, nämlich eine Verschiebung zu niedrigeren Energien hin. Da allein schon durch das Einbringen des Probenmaterials und Luft quenchende Effekte auftreten, muss bei genauer Messung stets eine Korrektur angebracht werden. Dazu verwendet man einen externen Standard (γ -Strahler, ^{137}Cs), dessen γ -Strahlen ein Comptonelektronenspektrum erzeugen, das für den ungequenchten Zustand bekannt ist und mit dem tatsächlich gemessenen verglichen wird. Der Quotient dieser Zählerausbeuten wird als Kanalverhältnis (ESR oder AES) für jeden Energiekanal angegeben und ermöglicht die gewünschte Korrektur der Messwerte.

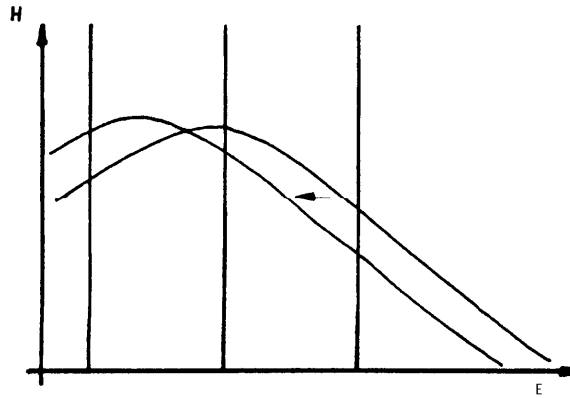


Abb. 166: Verschiebung eines β -Spektrums durch quenchende Substanzen.

Photographie

Photochemische Zersetzung von Silberhalogeniden

In der Photographie wird die photochemische Veränderung der Silberhalogenide bei Einwirkung von elektromagnetischer oder Korpuskularstrahlung ausgenutzt. Die Empfindlichkeit fotografischer Schichten erstreckt sich von der Infrarot- bis zur γ -Strahlung.

Die Belichtung erzeugt ein Latentbild (unsichtbar), welches durch Behandlung mit einem Reduktionsmittel (Entwickler) verstärkt wird. Im anschließenden Fixierprozess wird das restliche, nicht zu Ag reduzierte Silberhalogenid durch Komplexbildung mit Thiosulfat herausgelöst.

Die lichtempfindliche Schicht besteht aus Silberhalogenidkörnern, die einen Durchmesser von etwa $0,3 - 3 \mu\text{m}$ haben und in Gelatine eingebettet sind. Als Silberhalogenid wird häufig AgBr benutzt. Da jedoch die Lichtempfindlichkeit von AgBr im blauen (kurzwelligeren) Bereich liegt, müssen die fotografischen Emulsionen für die Photographie für größere Wellenlängen sensibilisiert werden. Dies geschieht durch Zugabe bestimmter organischer Farbstoffe (z.B. Cyanin-Typ), wodurch es zum gezielten Einbau von Fehlstellen in die AgBr-Kristalle kommt.

Die Entstehung des Latentbildes ist noch nicht völlig geklärt. Die heutigen Vorstellungen beruhen auf der Guerny-Mott-Theorie und der neueren Mitchell-Theorie. Der Hauptunterschied zwischen beiden Theorien hängt von der Wirkungsweise der Reifkeime (=Empfindlichkeitszentren) ab. Bei Mitchell werden sie als Fangstellen für Defektelektronen (ungeladenes Br) und bei Guerny und Mott als Fangstellen für Photoelektronen gedeutet.

Entwicklung

Beim Entwicklungsprozess wird das Latentbild etwa um das 10^6 - 10^8 -fache durch Behandlung mit einer meist alkalischen, wässrigen Lösung eines Reduktionsmittels verstärkt. Mit Hilfe verschiedener Entwicklersubstanzen wird ein Effekt erreicht, der größer ist als die Summe der Einzeleffekte. Dieser Vorgang wird Superadditivität genannt.

Man unterscheidet eine "chemische Entwicklung" (der Silberionentransport zum Entwicklungskeim erfolgt durch Silberhalogenidkristalle) und eine "physikalische Entwicklung" (der Silberionentransport erfolgt durch die Lösungsphase). Die Entwicklung wird in H_2O oder 2 %iger Essigsäure abgestoppt.

Fixierung

Das restliche Silberhalogenid wird durch Einwirkung einer Thiosulfatlösung entfernt. Es kommt dabei zur Bildung von löslichen Silber-Thiosulfatkomplexen, die dann in H_2O ausgewaschen werden. Bei Verwendung eines geeigneten Puffersystems kann man auch Entwicklung und Fixierung in einer Lösung stattfinden lassen (Fixierentwicklung).

Entstehung des fotografischen Bildes

Belichten: Einfallendes Licht erzeugt ein latentes (unsichtbares) Bild in der Halogensilberschicht des Films.

Entwickeln: Durch Einwirkung geeigneter chemischer Verbindungen wird das vom Licht getroffene Halogensilber zu metallischem Silber reduziert. Diese Reaktion ist stark temperaturabhängig.

Fixieren und Wässern: Das Fixiersalz löst das unveränderte Halogensilber aus der Schicht. Durch Wässern werden das Salz und andere Reaktionsprodukte ausgewaschen. Man erhält ein Negativ, d.h. helle Stellen erscheinen dunkel.

Positivprozess: Das Negativbild wird in einem Kopiergerät auf eine Halogensilberschicht (Papierträger) projiziert. Photochemische Veränderungen werden nur in den vom Licht getroffenen Teilen der Schicht ausgelöst. Nach Entwicklung und Fixierung erhält man das Positiv, das die ursprünglichen Helligkeitsabstufungen zeigt.

Farbfotografie

Bei den heutzutage benutzten Verfahren handelt es sich um subtraktive Farbmischungen. Die gewünschte Farbe wird durch drei hintereinander liegende Farbfilterschichten erreicht: gelb (blauabsorbierend), purpur (grünabsorbierend) und blaugrün (rotabsorbierend). Die Entwicklung erfolgt mit einem Entwickler, der Derivate des Phenylendiamins enthält. Die

Farbe entsteht durch Reaktion des bei der Entwicklung entstehenden Oxidationsproduktes des Phenylendiamins mit den sogenannten "Kupplern" (z.B. Acetessigsäureanilid). Damit die wasserlöslichen Farbkomponenten nicht durch die Schichten diffundieren und zu verwaschenen Farbbildern führen, müssen diese diffusionsfest gemacht werden. Dazu gibt es verschiedene Verfahren:

Agfa-Color-Verfahren: Einbau langer aliphatischer Ketten in die Schichten (z.B. Sterylreste).

Ektachrom-Verfahren: Verwendung von Farbkupplern, die durch Einbettung in wasserunlösliche organische Substanzen diffusionsfest gemacht werden.

Kodachrom-Verfahren: Die Farben entstehen in drei Entwicklungsgängen und nicht durch Kupplung in drei Schichten.

Autoradiographie

Bei der Autoradiographie histologischer Präparate werden die für die licht- oder elektronenmikroskopische Untersuchung üblichen Gewebeschnitte oder Zellausstriche mit einer speziellen Photoemulsion überzogen. Das in den Zellen inkorporierte radioaktive Material "belichtet" die Photoschicht durch Emission von Zerfallspartikeln des angewandten Isotops. Die Lokalisation der inkorporierten Strahlungsquelle ist um so genauer möglich, je geringer die Reichweite der Zerfallspartikel und je größer die Empfindlichkeit der verwendeten Photoemulsion bei möglichst kleinen AgBr-Kristallen ist.

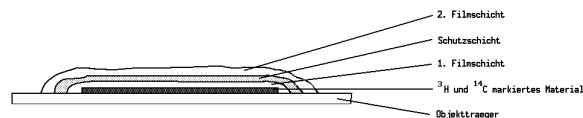


Abb. 167: Beispiel für eine Autoradiographie eines doppelmarkierten Schnittes (Seitenansicht). Nach der Exponierung und Entwicklung ist die Schwärzung der 1. Filmschicht auf ^3H zurückzuführen und die der 2. Filmschicht auf ^{14}C .

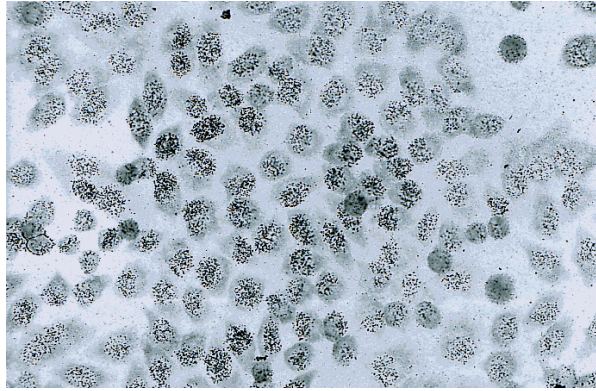


Abb. 168: Autoradiographie von mit Tritium-ATP markierten HeLa-Zellen.

Literatur

1. Molekulare Strahlenbiologie
Dertinger, Jung
Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York,
2. Physikalische Chemie und Biophysik
G. Adam, P. Luger, G. Stark
Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1995 (3. Auflage)

Links

- <http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/>