

Versuch 5

Röntgenstrahlung, (Zahn-)Mediziner

Versuchsziel

Physikalische Grundlagen

Röntgenstrahlung kann genau wie sichtbares Licht als elektromagnetische Welle beschrieben werden. Für die Absorption elektromagnetischer Wellen durch Materie gilt das Lambert-Beer-Gesetz, welches in diesem Fall folgende Form hat:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

J_0	:	Intensität des einfallenden Strahls
J	:	Intensität des auslaufenden Strahls
x	:	Schichtdicke
μ	:	Absorptionskoeffizient

Der Absorptionskoeffizient steigt mit zunehmender Elektronendichte, d.h. zunehmender Ordnungszahl der Elemente. Dies ist die Grundlage für alle Verfahren zur Erzeugung von Röntgenbildern (Röntgenaufnahme, Computer-Tomographie). Die Gleichung besagt damit, dass Materialien gleicher Elektronendichte nebeneinander nicht nachgewiesen werden können. Man erkennt also auf einem Röntgenbild **nicht** das Legoklötzchen im Magen oder in der Luftröhre eines Kleinkindes. Gleiches gilt für Haselnüsse, Mandeln, Rosinen, Rehbraten usw., wie in Monographien über Röntgendiagnostik nachzulesen ist.

Die Energie der Röntgenstrahlung wird, wie bei radioaktiver Strahlung auch, üblicherweise in eV (Elektronenvolt) angegeben. Beschleunigt man ein Teilchen, welches die Elementarladung e trägt, (z.B. ein Elektron) im Potentialgefälle 1V so erhält dies die Energie 1eV. In dieser Einheit lässt sich die maximale Energie der einzelnen Röntgenquanten aus den Betriebsdaten der Röntgenröhre errechnen. Zur Erzeugung der Röntgenstrahlen schießt man Elektronen in einer evakuierten Röhre, nach einer Beschleunigung durch 10–1000 kV, auf eine Anode aus einem Element mit hoher Ordnungszahl ($_{74}\text{W}$, $_{42}\text{Mo}$). Dabei werden die Elektronen abgebremst und geben insgesamt den größten Teil ihrer Energie in Form von Wärme ab. Etwa 1% der Energie wird in Röntgenstrahlung umgewandelt. Die maximale Energie eines Röntgenquants kann nicht größer als die Energie des aufprallenden Elektrons sein. Bei Kenntnis der Beschleunigungsspannung kann die Maximalenergie sofort in eV angegeben werden. Durch die Wechselwirkung der beschleunigten Elektronen mit dem Anodenmaterial entsteht ein kontinuierliches Bremsspektrum und das dies überlagernde diskrete, charakteristische Linienspektrum. Ein Teil des so erzeugten Gesamtspektrums einer Kupferanode soll in Teil 4 des Versuchs ausgemessen werden.

Mit 10–1000 keV ist die Energie der Röntgenstrahlung wesentlich höher als die Energie von chemischen Bindungen, die etwa bei 2–3 eV liegt. Daher wirkt Röntgenstrahlung bei der Absorption durch Materie ionisierend. Diese ionisierende Wirkung ist die Grundlage für die biologische Strahlenwirkung und für alle Nachweismethoden. Lässt man Röntgenstrahlen in einen Plattenkondensator einfallen, werden dort die Moleküle der Luft ionisiert. Wird nun eine genügend hohe Saugspannung angelegt, fließt ein Strom durch den Kondensator, der proportional zur einfallenden Strahlungsinten-

sität ansteigt. Die „Ionisationskammer“ arbeitet nach diesem Messprinzip. In Teil 2 des Versuchs soll die Kennlinie einer solchen Messanordnung aufgenommen werden.

Bei den anderen Versuchsteilen wird die Röntgenstrahlung mit dem Geiger-Müller-Zählrohr gemessen. Mit diesem gasgefüllten Zählrohr kann man einzelne Ionisationsereignisse nachweisen. Die Anzahl der Ionisationen pro Zeiteinheit ist ein Maß für die Intensität der einfallenden Strahlung. Da wir aber dauernd einer Hintergrundstrahlung aus dem Weltraum und der Umgebungsradioaktivität ausgesetzt sind, wird mit dem Zählrohr auch bei ausgeschalteter Röntgenröhre ein Nulleffekt gemessen.

Biologische Wirkung

Bei der Untersuchung der biologischen Strahlenwirkung wurde bald die DNA als kritisches Zielmolekül identifiziert. Die Wechselwirkung mit der Strahlung kann zur Bildung von Ionenradikalen und Strangbrüchen führen (direkter Effekt). Ein großer Teil der Schäden wird durch die bei der Radiolyse des Wassers entstehenden Radikale erzeugt (indirekter Effekt). Die Radikalbildung an Basen kann z.B. zu Punktmutationen oder zur Vernetzung mit Proteinen oder einem anderen DNA-Strang führen. All diese Schäden entstehen auch durch die natürliche Hintergrundstrahlung. Normalerweise werden Strahlenschäden vom Organismus erkannt und durch Reparatursysteme eliminiert. Da diese Reparatur aber immer mit einer Fehlerquote behaftet ist, kann es zu bleibenden genetischen Veränderungen kommen. Diese können dazu führen, dass eine Zelle zur Tumorzelle entartet. Die Ausbildung der Primärschäden erfolgt, in Abhängigkeit von der Dosis, nach einem stochastischen Prozess. Darum existiert keine Schwelldosis, unterhalb derer kein genetischer Schaden auftritt. Im Gegensatz dazu treten somatische Schäden, wie Röntgenerythem, Katarakt (grauer Star) und Strahlenkrankheit erst oberhalb einer Schwelldosis auf. Zurzeit ist bei der gesetzlichen Festlegung von Grenzwerten für die zulässige Strahlenbelastung die Erhöhung des individuellen Krebsrisikos ausschlaggebend.

Versuchsteile

0. Bedienung des Röntgengeräts 35kV
1. Durchleuchtung eines Gegenstandes, Kontrastmittel
2. Prinzip der Ionisationskammer
3. Bestimmung der K_{α} - und K_{β} -Linie einer Kupferanode
4. Absorptionsgesetz und Abhängigkeit der Absorption von der Ordnungszahl

Durchführung

Teil 0 – Bedienung des Röntgengeräts 35kV

Das Röntgengerät wird **geöffnet** indem man den **roten Knopf drückt**, nach **rechts dreht** und anschließend die Scheibe nach links aufschiebt. Nach dem Verschließen der Scheibe muss der rote Knopf wieder nach links gedreht werden und wieder ganz heraußen sein (Keine Gewalt anwenden!). Ist er dies nicht, so lässt sich die Hochspannung aus Strahlenschutzgründen nicht aktivieren. Zur Inbetriebnahme wird das Gerät zunächst mit dem Schalter „**0-I**“ an der Rückseite eingeschaltet. Dann wird mit dem Knopf unter „**HV**“ und „**I**“ und dem **Drehrad** die Spannung bzw. der Strom eingestellt und **jeweils** mit dem **Enter** Knopf bestätigt. Nun kann man über den Knopf „**HV-ON**“ (High-Voltage) die Hochspannung aktivieren.

Sollte dies nicht funktionieren, drücken sie den roten Sicherungsknopf einmal und versuchen es dann erneut!

Teil 1 – Kontrastmittel

Die Unterscheidung von Organen und dem sie umgebenden Gewebe ist in der radiologischen Diagnostik schwierig. Aus diesem Grund werden Kontrastmittel eingesetzt, um z.B. Verdauungstrakt oder Blutgefäße im Röntgenbild sichtbar zu machen. Da Iod ($_{53}\text{I}$) eine wesentlich höhere Ordnungszahl besitzt als die Elemente des organischen Gewebes ($_{1}\text{H}$, $_{6}\text{C}$, $_{7}\text{N}$, $_{8}\text{O}$, $_{15}\text{P}$, $_{16}\text{S}$) ist es aufgrund seiner hohen Absorptionsfähigkeit besonders gut als Kontrastmittel geeignet. Die Rolle von (nicht radioaktivem) Iod als Kontrastmittel in der Röntgendiagnostik ist nicht zu verwechseln mit der Rolle von radioaktiven Iod Isotopen in der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie, vorwiegend von Schilddrüsenerkrankungen.

!! Achtung !! Es darf keine Flüssigkeit in das Innere des Experimentierraums gelangen. Deshalb ist stets ein fester Anschluss der Schläuche zu gewährleisten und darauf zu achten, dass **vor der Entfernung des Modells** aus dem Experimentierraum die **Schlauchenden mit den Stopfen verschlossen sind**.

Dieser Versuch wird als Demonstrationsversuch vom Betreuer durchgeführt:

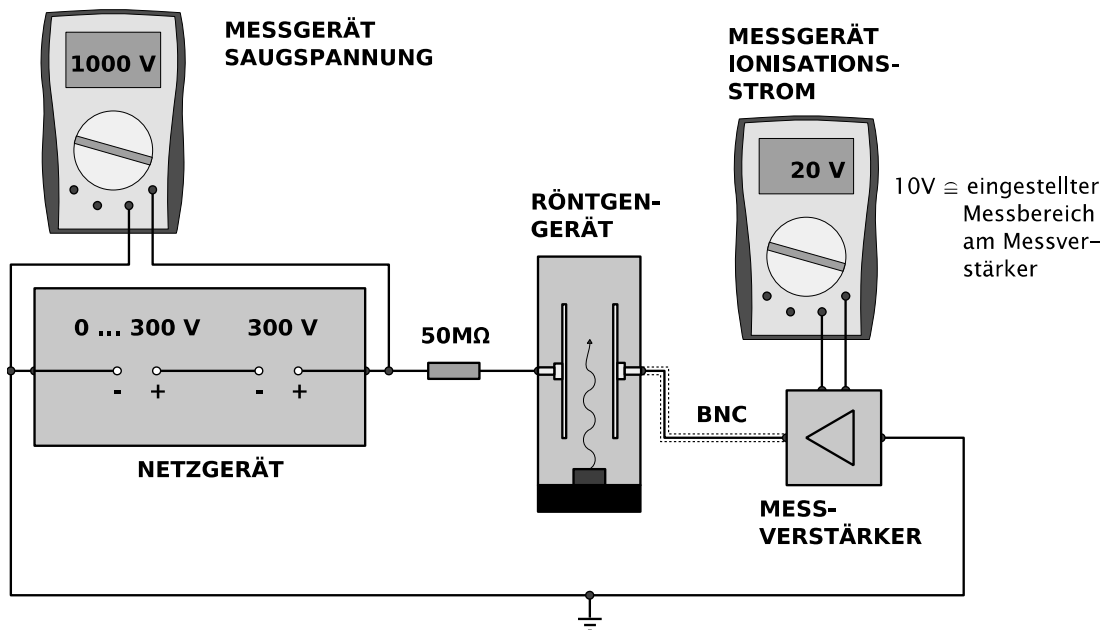
Falls kein Kontrastmittel vorhanden ist kann dies vom Betreuer hergestellt werden indem 50g Kaliumiodid in 100ml Wasser gelöst werden. Das **leere Adermodell** wird in dem kleinen Sicherheitstrog direkt **vor den Leuchtschirm** gebracht. Durch den Arbeitsschacht werden die **Schläuche** des Modells **nach außen** geführt. Eine der beiden Kunststoffspritzen wird mit Kontrastmittel gefüllt. Anschließend sind beide Spritzen mit den Schlauchenden zu verbinden. Dabei ist darauf zu achten, dass die **gefüllte Spritze** mit dem **unteren Einlass** des Modells verbunden ist. Die Durchleuchtung erfolgt **ohne Blendentubus** bei $U_A = 35\text{kV}$ und $I_A = 1\text{mA}$. Zur Beobachtung des Kontrastmittelverlaufs im Modell ist das Zimmer abzudunkeln. Nun wird langsam aus der gefüllten Spritze das Kontrastmittel in das Modell gedrückt.

Bevor das Modell nach Versuchsende aus dem Experimentierraum genommen wird, ist das Kontrastmittel aus dem Modell zu entfernen. Dazu wird die mit dem **unteren Einlass verbundene Spritze entfernt** und das **freie Schlauchende in das Vorratsgefäß** (Becherglas) geführt. Mit der anderen Spritze wird das Kontrastmittel nun herausgedrückt. Schließlich sind die freien Schlauchenden mit den **Kunststoffstöpseln zu verschließen**. Erst dann dürfen die Schläuche durch den Arbeitskanal gezogen werden.

Zur unbedingt erforderlichen Reinigung wird das Modell mehrmals mit Hilfe einer Spritze mit Wasser durchspült. Soweit wie möglich ist Restwasser aus dem Modell zu entfernen.

Teil 2 – Prinzip der Ionisationskammer

Die Luftmoleküle in einem offenen Plattenkondensator werden durch Röntgenstrahlung ionisiert und durch die am Plattenkondensator angelegte Saugspannung in dessen Richtung beschleunigt. Diese Anordnung ist als Ionisationskammer bekannt. Aus Sicherheitsgründen ist der positive Ausgang der variablen Gleichspannungsquelle (0-600V) über einen Schutzwiderstand von $50\text{M}\Omega$ an die rote Buchse des Plattenkondensators angeschlossen. Ein Digitalmultimeter dient zur Messung der Kondensatorspannung U_C , das andere wird mit dem Messausgang des Gleichstrom-Messverstärkers verbunden um den Ionisationsstrom I_C zu ermitteln.



Der am Gleichstrommessverstärker eingestellte Messbereich entspricht 10V am Ausgang. Am Messverstärker ist ein Messbereich von 10nA einzustellen. An dem zugehörigen Multimeter ist demnach ein Bereich von 20V einzustellen. Die Digitalmultimeter gehen nach gewisser Zeit in den Stand-by-Modus. Um sie wieder aufzuwecken muss man deren Powerknopf zweimal drücken.

Nach einer Einschaltzeit von ca. 5min sollte bei maximaler Kondensatorspannung (**höchstens 500V!**) und ohne Betrieb der Röntgenröhre kein Strom zu messen sein (evtl. mit Nullsteller am Verstärker nachregeln). Bitte verwenden Sie den Blendentubus mit $d=5\text{mm}$ Lochdurchmesser.

Die Spannung kann entweder im Bereich von 0V-300V oder 300V-600V variiert werden. Um den Bereich zu wechseln ist es nötig am Netzgerät umzustecken. **Dies darf NUR der Betreuer!**

Messen Sie nun den durch den Kondensator fließenden Ionisationsstrom:

1. Als Funktion der Kondensatorspannung U_C . Die Saugspannung U_C ist zwischen 0V und 500V in 50V Schritten zu variieren. Die Anodenspannung ist dabei konstant $U_A=35\text{kV}$ und der Anodenstrom $I_A=1\text{mA}$.
2. Als Funktion der Röhrenspression bei konstanter Saugspannung von $U_C=500\text{V}$, wobei nun die Anodenspannung zu variieren ist (10-35kV in 5kV Schritten) und der Anodenstrom mit $I_A=1\text{mA}$ wieder konstant bleibt.

Die beiden Messreihen sind graphisch darzustellen.

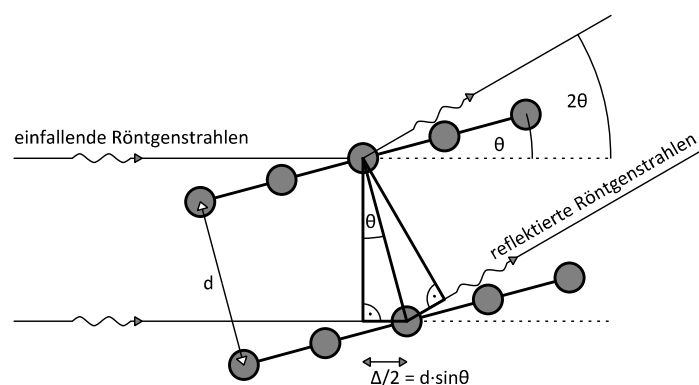
Teil 3 - Bragg

Während Röntgenstrahlen in der Medizin im Wesentlichen wegen ihrer Durchdringungsfähigkeit und ionisierenden Wirkung zum Durchleuchten und zur Therapie eingesetzt werden, benutzt man sie in den Naturwissenschaften meistens zur Strukturaufklärung. Auf einem Kristall auftreffende Röntgenstrahlen werden an den Netzebenen des Kristalls reflektiert. Eine Verstärkung durch konstruktive Interferenz tritt nur auf, wenn ihre Wellenlänge der Bragg'schen Gleichung genügt.

$$\Delta = \lambda = 2d \sin \theta$$

Δ : Gangunterschied λ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung
 d : Abstand der Kristallebenen θ : Glanzwinkel (Winkel zwischen Strahl und Netzebene)

Die Skizze veranschaulicht diesen Zusammenhang



Man kann unter Anwendung dieser Gleichung

1. bei bekannter Wellenlänge λ die Abstände d der Netzebenen im Kristall bestimmen,
2. mit Hilfe einfach gebauter Kristalle mit bekannter Gitterkonstante Röntgenlicht in sein Spektrum zerlegen.

Im Versuch sollen die K_{α} - und K_{β} -Linien des charakteristischen Spektrums von Kupfer aus dem die Anode der Röntgenröhre besteht, gemessen werden. Dazu wird ein Lithium-Fluorid Kristall ($d=201\text{pm}$) in den Strahlengang gebracht und die Impulsrate (Meßzeit 30s) in Abhängigkeit vom Drehwinkel bestimmt.

(Älteres Gerät:) Stellen Sie zuerst eine Röhrenspannung von 20kV ein. Wählen Sie anschließend mit dem rechten Drehschalter das Symbol „Zählrohr“ und drehen Sie den Knopf für die Geschwindigkeitsvorwahl auf V_3 . Durch Drücken der Knöpfe zur Winkeleinstellung bringen Sie nun das Zählrohr in eine Position bei ca. 38° . Jetzt wählen Sie die Geschwindigkeit V_2 . Bei dieser Einstellung ändert sich der Winkel in Schritten von $0,2^\circ$. Stellen Sie nun das Zählrohr genau auf 38° . Danach wird der rechte Drehknopf auf das Symbol „Kristall“ gestellt und nach derselben Methode zwischen Kristall und Röntgenstrahl ein Winkel von 19° eingestellt. Wenn Sie jetzt das Symbol „Zählrohr + Kristall“ wählen, werden bei einer Winkeländerung Zählrohr und Kristall synchron bewegt. Da der Winkel nur in Schritten von $0,2^\circ$ geändert werden kann, können Sie nicht in Schritten von $0,5^\circ$ messen. Um eine hinreichend genaue Messkurve zu erhalten müssen Sie, außer bei den ganzzahligen Einstellungen, auch je einen Zwischenwert bei $0,4^\circ$ **oder** $0,6^\circ$ aufnehmen. Messen Sie bis zu einem Winkel von 25° zwischen Röntgenstrahl und Kristall. (/Älteres Gerät.)

(Neueres Gerät:) Stellen Sie zunächst eine Röhrenspannung von 35kV und einen Strom von 1mA ein und aktivieren Sie die Spannung „HV on“. Unter dem Punkt Goniometer wählen Sie per Knopfdruck das „Zählrohrsymbol“ und stellen Sie das Zählrohr über das Drehrad auf 0°. Selbiges führen Sie für den „Kristall“ durch. Nun wählen Sie „Zählrohr + Kristall“ und stellen dies auf 19°. Die Messzeit wird über den Punkt „Gate“ auf 30s eingestellt und mit „Enter“ bestätigt. Dies bedeutet, dass sich die Anzeige Impulse/s (sichtbar, wenn Zählrohr + Kristall gewählt ist) alle 30s erneuert und das über 30s gemittelte Ergebnis anzeigt. Um korrekt zu messen müssen Sie also nach einer Winkeländerung das nächste Ergebnis ignorieren und erst das übernächste Ergebnis notieren. Messen Sie nun alle Impulsraten zu den Winkeln zwischen 19,0° und 25,0° in 0,5° Schritten. (/Neueres Gerät.)

Tragen Sie die Impulsrate als Funktion des Winkels zwischen Röntgenstrahl und Kristall in eine Graphik ein und markieren Sie die K_{α} - und K_{β} -Linie. Eine Messzeit von 30s ist für die Bestimmung der Impulsraten ausreichend.

Berechnen Sie die Energie der beiden charakteristischen Linien nach der Beziehung

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad hc = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ eVm.}$$

Teil 4 - Absorption

In diesem Teil bestimmen Sie die Absorption verschiedener Metalle unter Nutzung monochromatischer Röntgenstrahlung.

Da die Emission einer Kupferanode nicht monochromatisch ist, wird mittels eines LiF Kristalls und Bragg Beugung monochromatische Strahlung erzeugt.

Gehen Sie wie in Teil 3 vor und stellen Sie das Zählrohr und den Kristall so ein, dass Sie die maximale Ausbeutung der K_α Linie erhalten.

Lassen Sie niemals längere Zeit die nichtabgelenkte Strahlung (Winkel von 0 Grad) auf das Zählrohr treffen!

Vor dem Zählrohr ist ein Folienhalter montiert, in dem Plättchen aus verschiedenen Materialien befestigt werden können. Die pro Zeiteinheit registrierten Impulse sind ein Maß für die Strahlungsintensität. Die Integrationszeit (Gate) ist auf 10s zu stellen.

Messen Sie zunächst bei abgeschalteter Röhrenspannung den Nulleffekt. Alle weiteren Messungen erfolgen bei einer Röhrenspannung von 35kV und einem Röhrenstrom von 1,0mA.

Beachten Sie bitte, dass eine Integrationszeit von 10s bedeutet, dass alle 10 Sekunden die Angabe der Impulse pro Sekunde erneuert wird, egal ob Sie dazwischen die Spannung abschalten und am Gerät etwas umbauen oder nicht.

Um ein neues Plättchen einzusetzen müssen Sie die Hochspannung abschalten, dann öffnen Sie die Schiebetür, setzen das Plättchen vorsichtig ein (lassen sie sich das erste Mal vom Betreuer helfen!) und schließen die Tür wieder. Beachten Sie dabei, dass Sie das Zählrohr nicht verschieben. Sollten Sie befürchten, dass sie das Zählrohr verschoben haben, entfernen Sie das Abschirmplättchen und vergleichen Sie die Zählrate mit der am Anfang jeder Messreihe Aufgenommenen. Sollte der Wert sich drastisch unterscheiden müssen Sie die entsprechende Messreihe wiederholen.

Aufgrund der Schwankung in der Messung messen Sie für jeden Punkt 3 Mal und berechnen Sie den absoluten und relativen Fehler.

Bestimmen Sie die Zählrate für folgende Messanordnungen:

1. Ohne Abschirmung zwischen Blende und Zählrohr.
2. In Abhängigkeit der Schichtdicke für Zn von 0 mm bis 0,1 mm (5 Schritte).
3. In Abhängigkeit der Schichtdicke für Al von 0 mm bis 0,1 mm (6 Schritte).
4. In Abhängigkeit des Atomgewichts für Ni, Cu, Sn und Zn bei 0,025 mm. Nutzen Sie hierfür eine Gatezeit von 30 sec.

Stellen Sie das Ergebnis für 2. und 3. auf einfach-logarithmischem Papier dar. Tragen Sie auch die Zählrate, die Sie ohne Abschirmung gemessen haben, in die Graphik ein. Bestimmen Sie die Halbwertsdicke der Strahlung für Aluminium und Zink.

Stellen Sie das Ergebnis für Teil 4 auf nicht logarithmischem Papier dar, tragen Sie an der x-Achse das Atomgewicht von Ni, Cu, Sn und Zn ein, und an der y-Achse die Zählrate.

Was erwarten Sie? Sehen Sie das Erwartete? Wenn nein, warum nicht?

Fragen zum Versuch

1. Was sind Röntgenstrahlen?
2. Wie erzeugt man Röntgenstrahlen und wie ist eine Röntgenröhre aufgebaut?
3. Wie groß ist der Wirkungsgrad einer Röntgenröhre?
4. Wovon ist die Energie der Röntgenstrahlung abhängig?
5. Was ist kontinuierliche Röntgenstrahlung (Bremsstrahlung)?
6. Was ist die charakteristische Röntgenstrahlung?
7. Wie entsteht Streustrahlung und wie kann ihr Einfluss im Röntgenbild verhindert werden?
8. Welche Stoffe verwendet man zur Abschirmung von Röntgenstrahlung?
9. Mit welchen physikalischen Begriffen kann man Röntgenstrahlung charakterisieren?
10. Welche Wirkung haben Röntgenstrahlen?
11. Welche Methoden zum Nachweis von Röntgenstrahlung gibt es?
12. Wozu wird Röntgenstrahlung in Medizin und Technik verwendet?
13. Wie arbeitet eine Ionisationskammer?
14. Wie sind Ionendosis, Energiedosis und Äquivalentdosis definiert?
15. Welches sind die drei wichtigsten Grundregeln des Strahlenschutzes?
16. Welches Atomgewicht haben Zn, Cu, Ni und Sn.