

# Strahlenphysikalische und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes

April 2023

Zur Prüfung kommen je 3 Fragen aus den beiden Katalogen. Pro Frage gibt es vier Punkte, es sollen also vier 'wesentliche Fakten' in der Antwort enthalten sein. Zu den Reflexionsfragen sind jeweils einige Stichpunkte für mögliche Argumentationen gegeben.

## 1 Fragen Maringer

### 1.1 Erläutern Sie die radioaktiven Umwandlungen und die Bereiche im N-Z-Diagramm (Nuklidkarte).

Auf der Karlsruher Nuklidkarte sind die bekannten Nuklide dargestellt. Die meisten von ihnen sind instabil und können über die folgenden Prozesse zerfallen:

- $\alpha$ -Zerfall
- $\beta^+$ - und  $\beta^-$ -Zerfall
- $\gamma$ -Zerfall
- Elektroneneinfang
- Innere Konversion
- Spontane Kernspaltung
- Neutronen- und Protonenzerfall

Derzeit sind 112 Elemente mit etwa 2770 Nukliden bekannt. 272 Nuklide gelten als stabil. Diese stabilen Nuklide reihen sich entlang eines Bogens unterhalb der  $N=Z$ -Geraden. In bestimmten Bereichen auf der Nuklidkarte dominieren bestimmte Zerfallsarten.

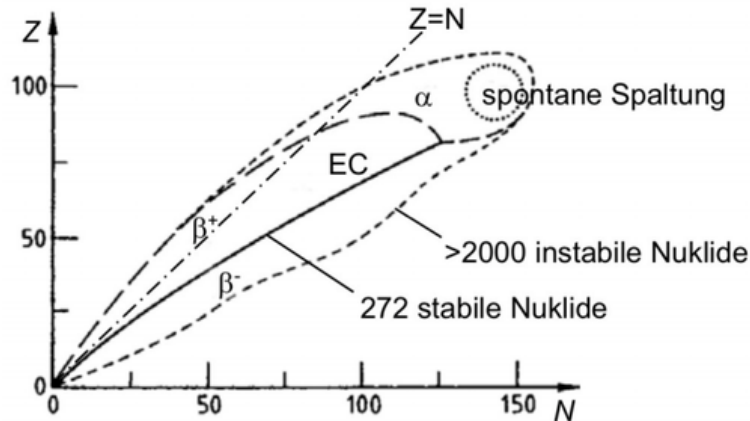


Abbildung 1: Nuklidkarte

Man kann Kerne grob danach unterteilen, ob ihre Ordnungszahl und Massenzahl gerade oder ungerade ist. Tendenziell sind gg-Kerne am stabilsten, uu-Kerne am instabilsten. Besonders stabil sind Kerne mit "magischen Zahlen" (betreffend Neutronen/Protonen), diese kommen außerdem oft in großer Häufigkeit natürlich vor. Dies kann im Schalenmodell der Kernphysik erklärt werden.

## 1.2 Erläutern Sie die Abhängigkeiten des Schwächungskoeffizienten von Photonenenergie und Ordnungszahl des Absorbers.

Das Schwächungsgesetz lautet:  $I(x) = e^{-\mu x}$ , mit dem (linearen) Schwächungskoeffizienten  $\mu$ . Dieser setzt sich zusammen aus Beiträgen des Photoeffekts  $\tau$ , der Compton-Streuung  $\sigma$ , der Paarbildung  $\kappa$  und der kohärenten Streuung  $\sigma_{coh}$ .

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa + \sigma_{coh}$$

WW-Prozess	Z-Abh.	E-Abh.
Photoeffekt	$Z^3$ - $Z^{4,5}$	$E^{-3}$ für $E < 511$ keV, $E^{-1}$ für $E > 511$ keV
Kohärente Streuung	$Z^{1,5}$	$E^{-2}$
Paarbildung	$Z$	$\log(E)$
Compton-streuung	$Z^0$	$E^{-0,5}$ - $E^{-1}$

Tabelle 1: Schwächungskoeffizienten

## 1.3 Beschreiben Sie den Strahlenschutzbeauftragten.

Der Strahlenschutzbeauftragte ist verantwortlich für die Umsetzung sämtlicher für den Strahlenschutz relevanten Maßnahmen in einem Betrieb. Im rechtlichen Sinne ist der Bewilligungsinhaber verantwortlich.

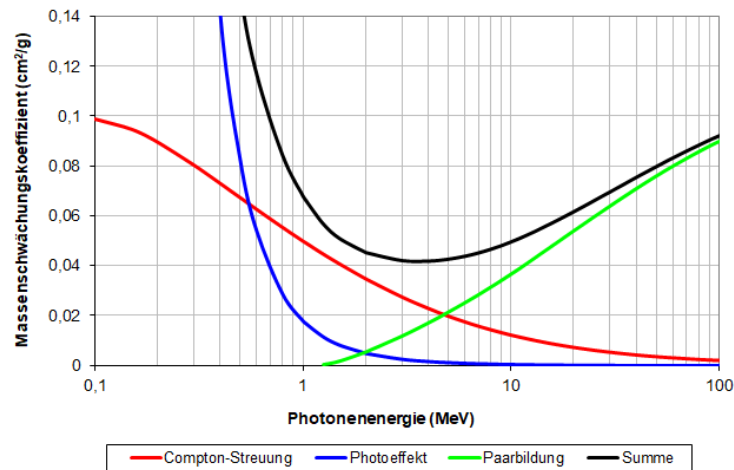


Abbildung 2: Beiträge zum Schwächungskoeffizienten

Er hat eigenverantwortlich dafür Sorge zu tragen, dass im laufenden Betrieb der Strahlenanwendungen die notwendigen Schutzmaßnahmen gewährleistet sind und sämtliche an der Strahlenanwendung beteiligte Personen hinsichtlich der Sicherheitsmaßnahmen geschult sind, sowie physikalisch und medizinisch betreffend der Dosis überwacht sind.

Einmal jährlich muss er die Mitarbeiter im Betrieb einer Strahlenschutzweisung (Arbeitsmethoden, Gefahren, Sicherheits- und Schutzmaßnahmen) unterziehen. Zudem gilt für ihn eine 30-jährige Dokumentationspflicht der Durchführung seiner Aufgaben. Die bezieht sich auf alle Arten von Dosismessungen und Kontrollen der Geräte.

Um Strahlenschutzbeauftragter zu werden ist eine Grundausbildung, und je nach Anwendungsgebiet spezielle Fachbildungen bzw. periodische Weiterbildungen notwendig.

#### 1.4 Beschreiben Sie die Themenbereiche des Strahlenschutzes.

Begriffsdefinition: wissenschaftliche, technische und organisatorische Voraussetzungen und Maßnahmen zum Schutz vor der unerwünschten Wirkung ionisierender Strahlung.

Allgemein erfolgt die Gliederung in 5 Bereiche:

- wissenschaftliche Grundlagen (Physik, Medizin, Biologie, ...)

- operativer Strahlenschutz und Expositionsbereiche in Medizin, Forschung und Industrie, sowie natürliche Radioaktivität
- Ausbildung und berufsbegleitende Weiterbildung
- Messtechnik und Qualitätssicherung
- rechtliche, soziologische und gesellschaftliche Aspekte

### **1.5 Erläutern Sie den Inhalt der EU-Strahlenschutzrichtlinie 2013/59/EURATOM.**

Diese Richtlinie bildet die gesetzliche Grundlage zur Festlegung von Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung. Sie setzt einheitliche Sicherheitsnormen für alle EU-Mitgliedsländer fest und sorgt für deren Anwendung.

In ihr wird der Optimierungsgrundsatz ('as low as reasonably possible') festgelegt. In Artikel 5 sind allgemeine Grundsätze für Rechtfertigung, Optimierung und Begrenzung der Dosis festgelegt. Wichtig sind die darin festgelegten Grenzwerte für diverse Personengruppen. Es wird die Einheitlichkeit, Vergleichbarkeit, Transparenz und rechtzeitige Übermittlung der Daten angestrebt.

Zu den wesentlichen Neuerungen dieser Richtlinie zählen verbesserter Strahlenschutz bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen, Maßnahmen zum Schutz vor dem natürlich vorkommenden Edelgas Radon sowie Regelungen zur Bewältigung radiologischer Altlasten und natürlicher Radioaktivität in Baustoffen.

### **1.6 Erklären Sie den Photoeffekt.**

Ein Photon überträgt seine gesamte Energie auf ein Hüllenelektron, welches dadurch aus der Atomhülle gestoßen wird (bevorzugt Elektronen aus K- und L-Schale). Die Energie des Photons muss dabei mindestens so groß sein, wie die Bindungsenergie des Elektrons. Die Differenz zwischen Photonenenergie und Bindungsenergie übernimmt das emittierte Elektron als kinetische Energie. In der Folge kann es zu zwei Effekten kommen: wird der freigewordene Platz durch ein Elektron aus einer höheren Schale nachbesetzt, sendet dieses wiederum ein Photon aus (charakteristische Röntgenstrahlung). Dieses Photon kann, wenn es genug Energie hat, seinerseits ein weiteres Elektron ionisieren. In diesem Fall spricht man vom 'Auger-Elektron'. Der Photoeffekt ist abhängig von Ordnungszahl und Dichte des durchstrahlten Mediums. Er findet bevorzugt bei niedriger Photonenenergie und hoher Ordnungszahl statt.

## 1.7 Erklären Sie den Alphazerfall und die Betazerfälle.

Bei einem Alphazerfall sendet ein Atomkern ein Alpha-Teilchen (Helium-Kern) aus. Er tritt vereinzelt ab einer Ordnungszahl von 60 und häufiger ab einer Ordnungszahl von 84 auf. In diesem Bereich läuft durch die hohe Bindungsenergie des Alphateilchens der Umwandlungsprozess exotherm ab. Das Alphateilchen ist im Kern zwei Potentialen ausgesetzt, dem anziehenden Kernpotential und dem abstoßenden Coulombpotential. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit kann es durch diese Barriere durchtunneln. Durch seine extrem geringe Eindringtiefe ist Alphastrahlung für den Menschen von außen ungefährlich, inkorporierte Alphastrahler können jedoch schweren Zellschaden hervorrufen.

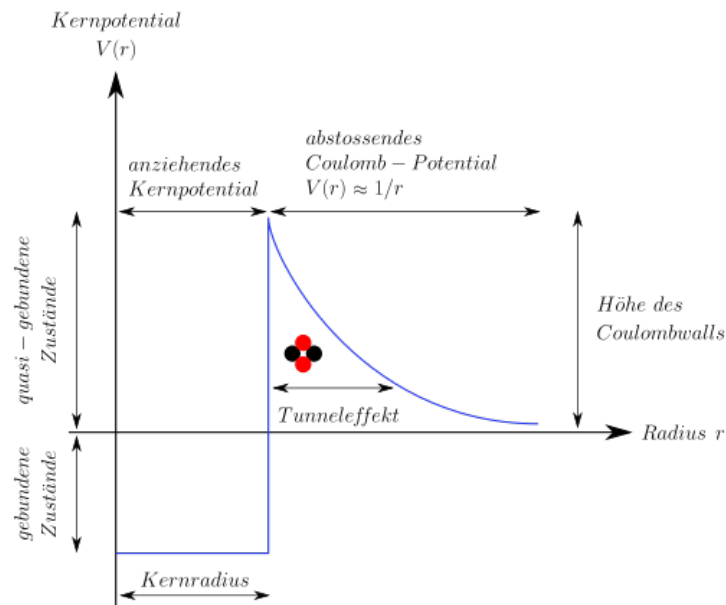


Abbildung 3: Potentialbarriere des Alphazerfalls

Bei einem Beta-Zerfall wandeln sich Kerne unter Erhaltung der Massenzahl in Kerne benachbarter Elemente um, während zwei Leptonen entstehen, die den Kern verlassen.

Beim  $\beta^-$ -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino um. Auf diese Weise zerfallen solche Nuklide, die einen Neutronenüberschuss aufweisen. Die Kernladungszahl erhöht sich um 1.

Der  $\beta^+$ -Zerfall ist seltener als der  $\beta^-$ -Zerfall. Er kann nur auftreten, wenn die Umwandlungsenergie mindestens 1022 keV beträgt. Ein Proton wandelt sich in ein Neutron, ein Positron und ein Elektronneutrino um. Das Positron hat

jedoch keine lange Lebensdauer, da es sofort mit einem Elektron annihiliert. In Konkurrenz zum  $\beta^+$ -Zerfall steht der Elektroneneinfang.

### 1.8 Erläutern Sie den nuklearen Brennstoffkreislauf und die damit zusammenhängende Problematik.

Das Uranerz wird aus Lagerstätten in Kanada, USA, Russland, Schweden, Brasilien, Australien und bestimmten afrikanischen Regionen gewonnen. Zunächst liegt es in schwer löslicher Form vor und muss durch Oxidation in eine gut lösliche Form gebracht werden. Nach weiteren Reinigungsschritten und Zugabe von  $\text{NH}_3$  erhält man eine Verbindung mit einem 75%-Anteil an Uran ("yellow cake"). Durch Konversion in eine gasförmige Verbindung ( $\text{UF}_6$ ) wird der  $\text{U}_{235}$ -Anteil von 0,7% auf mindestens 3% erhöht. Weitergehende Anreicherung kann durch Diffusions-, Zentrifugations- und Trenndüsenverfahren erreicht werden. Zur Herstellung von Kernwaffen wird eine Anreicherung auf mindestens 90% benötigt, Leichtwasserreaktoren kann man mit einem Anreicherungsgrad von 3-5% betreiben. Die abgebrannten Brennstäbe werden zur Wärmeabfuhr und Strahlungsabschirmung ca. ein Jahr in einem Kühlwasserbecken zwischengelagert. Teilweise ist es möglich, Brennstäbe wiederzuverwerten, dazu werden sie in heißer Säure aufgelöst und mittels "PUREX-Verfahren in 3 Komponenten zerlegt (Uran, Plutonium, Spaltprodukte). Ein Teil des Urans/Plutoniums kann so wiederverwertet werden, der Rest bleibt als 'High-Level-Waste' in Zwischen-, bzw. Endlagern.

### 1.9 Geben Sie einen Überblick über die Wechselwirkungsmöglichkeiten von Photonen mit Materie.

Photoeffekt, Compton-streuung, Paarbildung, Kernphotoeffekt. Siehe 1.6, 1.27

### 1.10 Beschreiben Sie die natürlichen Zerfallsreihen.

Ausgehend von langlebigen Nukliden gibt es 3 natürliche Zerfallsreihen. In diesen kommen quasi abwechselnd Alpha- und Betazerfälle vor. Mit einer beliebigen natürlichen Zahl  $n$  und einer Zahl  $m \in \{0,1,2,3\}$  kann man diese Zerfallsreihen durch eine Gleichung für die Massenzahl  $A$  charakterisieren:  $A = 4n + m$ . Eine

Reihe	Anfangs-/ Endnuklid
Uran-Radium-Reihe ( $4n+2$ )	U-238 $\rightarrow$ Pb-206
Uran-Actinium-Reihe ( $4n+3$ )	U-235 $\rightarrow$ Pb-207
Thorium-Reihe ( $4n$ )	Th-232 $\rightarrow$ Pb-208

Tabelle 2: Natürliche Zerfallsreihen

vierte Reihe ( $4n+1$ ), deren Anfangsnuklid jedoch nur künstlich erzeugt werden kann, ist die Neptunium-Reihe. In jeder der drei natürlichen Zerfallsreihen tritt ein Radon-Isotop auf. Radon ist für die Strahlenexposition der Menschen von

Bedeutung, da es über das Fundament in Gebäude eindringen kann. Eingeatmete Radonfolgeprodukte erhöhen das Risiko für Lungenkrebs. In Innenräumen kommt es je nach baulicher Situation zu einer Radonkonzentration von 10-1000  $\frac{Bq}{m^3}$ . Im Durchschnitt sind ca. 40% der Jahresdosis in Österreich auf Radon zurückzuführen.

### 1.11 Geben Sie die Dosisgrenzwerte aus der EU Strahlenschutzrichtlinie 2013/59/EURATOM an.

In Abschnitt 2 werden Dosisgrenzwerte und Maßnahmen zum Schutz schwangerer und stillender Arbeitskräfte definiert. In Bezug auf die Grenzwerte wird zwischen exponierten Arbeitskräften, Auszubildenden/Studierenden (unter 18) und der Öffentlichkeit unterschieden. Artikel 9 legt die Bestimmungen für strahlenexponierte Arbeitskräfte fest. Der Grenzwert der effektiven Dosis pro Jahr beträgt 20 mSv (unter besonderen Umständen 50 mSv). Über einen Zeitraum von 5 Jahren darf die Exposition 100 mSv nicht überschreiten. Artikel 11 behandelt Auszubildende und Studierende unter 18 Jahren, für über 18-jährige gelten die Bestimmungen aus Artikel 9. Die Grenze beträgt hier 6 mSv pro Jahr. Nach Artikel 12 dürfen Einzelpersonen der allgemeinen Bevölkerung höchstens einer effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr ausgesetzt sein. Zusätzliche Regelungen gibt es für die Äquivalenzdosis bestimmter Körperteile:

	Strahlenexponierte Arbeitskräfte	Auszubildende/ Studierende	Allgemeine Bevölkerung
Augenlinse	150 mSv	15 mSv	15 mSv
Haut	500 mSv	150 mSv	50 mSv
Gliedmaßen	500 mSv	150 mSv	

Tabelle 3: Grenzwerte der Äquivalenzdosis pro Jahr

### 1.12 Erläutern Sie die Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung.

Die charakteristische Röntgenstrahlung ist ein Linienspektrum, welches bei Elektronenübergängen zwischen Energieniveaus der inneren Elektronenhülle entsteht und kennzeichnend für das jeweilige Element ist.

Ein freies, energiereiches Elektron schlägt ein gebundenes Elektron aus der inneren Schale heraus. In die entstehende Lücke rückt ein Elektron einer höheren Schale nach. Die dabei freigewordene Bindungsenergie ist genau definiert und wird in Form eines Röntgenquants abgegeben.

### 1.13 Beschreiben Sie den radioaktiven Zerfall und den physikalischen Begriff ‚Aktivität‘.

Die Aktivität  $A$  einer Menge an radioaktiven Kernen in einem bestimmten Energiezustand zu einem bestimmten Zeitpunkt ist der Quotient von  $dN$  (Erwartungswert der Anzahl der spontanen Umwandlungen) und dem Zeitintervall  $dt$ .  
 $A = \frac{dN}{dt}, [A] = 1Bq$

Die Einheit der Aktivität ist Becquerel (Bq) ( $1Bq = 1s^{-1}$ ). 1 Becquerel hat dieselbe Basisgröße wie 1 Hertz, wichtig ist zu unterscheiden, dass Hertz einen periodischen und Becquerel einen statistischen Vorgang angibt. Ein radioaktiver Zerfall bezeichnet die Umwandlung eines Atomkerns in einen oder mehrere andere Kerne unter Aussendung radioaktiver Strahlung.

### 1.14 Erläutern Sie die Begriffe Bremsvermögen, Stoßbremsvermögen und Strahlungsbremsvermögen beim Durchgang geladener Teilchen durch Materie.

Als Bremsvermögen  $S$  wird der mittlere Energieverlust eines geladenen Teilchens in einem Absorbermedium pro Wegelement bezeichnet. Es setzt sich aus Stoß- und Strahlungsbremsvermögen zusammen, wobei das Stoßbremsvermögen den Energieverlust durch Stöße mit anderen Atomen, und das Strahlungsbremsvermögen jenen durch Photonenemission beschreibt. Es gilt also  $S = S_{col} + S_{rad}$  mit  $S = \frac{dE}{dX}$ . Das Stoßbremsvermögen hängt von Teilchenart, Teilchenenergie und der Dichte des Absorbers ab. Das Bremsvermögen ist ungefähr proportional zu  $\frac{1}{\beta^2}$ , die meiste Energie wird also kurz vor Stillstand des Teilchens abgegeben, was man sich in der Ionentherapie zunutze macht (Bragg-Peak).

### 1.15 Beschreiben Sie die kosmische Elementsynthese.

Die kosmische Elementsynthese beschreibt die Entstehung der Elemente des Periodensystems aus Protonen und Neutronen. Man unterscheidet zwischen Primordialer Nukleosynthese, Stellarer Nukleosynthese und Supernova.

Die Primordiale Nukleosynthese fand kurz nach dem Urknall statt, es entstanden Quarks, Gluonen und Leptonen und daraus in weiterer Folge Protonen und Neutronen. Bei der Abkühlung nach dem Urknall entstanden die Atomkerne von H, D, He und Li durch erste Fusionsprozesse.

Die stellare Nukleosynthese wird in Wasserstoffbrennen, Heliumbrennen und Kohlenstoffbrennen unterteilt. Beim Wasserstoffbrennen wandeln sich 4 H-Kerne in einen Helium-4-kern, 2 Elektronen, 2 Elektronenneutrinos und 2 Gammaquanten um. Unter dem Begriff Heliumbrennen werden zwei Prozesse zusammengefasst: 2 Helium-4 Kerne verschmelzen zu einem Be-8-Kern, wobei dieser an kinetischer Energie einbüßt (endothermer Prozess) und ein Gammaquant frei wird. Verschmilzt ein Be-8 mit einem He-4-Kern entsteht C-12 und ein Gam-



maquant mit überschüssiger Energie (exothermer Prozess). Als "Kohlenstoffbrennen" werden mehrere Prozesse bezeichnet, bei dem zwei C-12 Kerne verschmelzen, woraus verschiedene andere Kerne und diverse Nebenprodukte hervorgehen können.

Elemente mit höherer Ordnungszahl als Eisen können in stellaren Brennprozessen nicht mehr entstehen. Die notwendige Fusion würde Energie verbrauchen, anstatt welche freizugeben. Elemente höherer Ordnungszahlen werden in Supernovaen synthetisiert.

### **1.16 Beschreiben Sie die Verordnungen der Bundesministerien im Bereich des Strahlenschutzes.**

Die Grundlage für die diversen Strahlenschutzverordnungen wurde durch das Strahlenschutz-EU-Anpassungsgesetz (2004) gelegt. In Österreich erließen in der Folge verschiedene Bundesministerien Verordnungen die teilweise auf bestimmte Personengruppen abzielten.

- Allgemeine Strahlenschutzverordnung (2006)
- Medizinische Strahlenschutzverordnung (2004)
- Fliegendes Personal (2006)
- Interventionsverordnung (2007)
- Natürliche Strahlenquellenverordnung (2008)

### **1.17 Beschreiben Sie die Wirkung ionisierender Strahlung auf biologische Organismen.**

Ionisierende Strahlung wirkt auf zwei Arten schädigend auf Organismen:

- durch Ionisation von Biomolekülen der Zellen (physikalisch)
- durch Bildung von reaktiven Radikalen, welche das Zellgewebe angreifen (chemisch)

Diese Schäden können nach ihrer Wirkung unterteilt werden:

- akut auftretende Frühschäden (zB Hautnekrose)
- Spätschäden (zB verschiedene Krebsformen)
- genetische Schäden

Genetische Schäden können Veränderungen der DNA oder Schäden an Keimzellen betreffen. Zudem können Strahlenschäden in deterministische und stochastische

sche Schäden unterteilt werden. Deterministische Schäden sind unmittelbar der Strahlenexposition zurechenbar und treten erst ab einer gewissen Schwelldosis auf. Stochastische Schäden weisen keine Schwelldosis auf und treten gegebenenfalls erst zu späteren Zeitpunkten in Erscheinung. Sie müssen im Strahlenschutz besonders berücksichtigt werden.

Verschiedene Arten von Strahlen verfügen über verschieden starke biologische Wirksamkeiten, was durch Größen wie den Linearen Energietransfer (LET) ausgedrückt werden kann. Neutronen bestimmter kinetischer Energie oder schwere Ionen weisen einen hohen LET auf, man nennt sie auch "dicht ionisierend". Im Vergleich dazu sind Photonen und Elektronen weniger dicht ionisierend, haben also einen niedrigen LET.

### **1.18 Erläutern Sie die medizinischen Anwendungen von Radionukliden.**

Radionuklide werden in der Diagnostik und in der Therapie eingesetzt. In beiden Fällen wird dem Patienten ein radioaktives Präparat verabreicht (Radiopharmaka). Für diagnostische Zwecke werden Radionuklide chemisch an eine Trägersubstanz (zB Zucker) gebunden, welche am Stoffwechsel teilnimmt. Durch die geringe Stoffmenge bleiben Organfunktionen unbeeinflusst. Diese Radionuklide wandern durch ihre Trägersubstanz an solche Orte im Körper, an denen ein hoher Stoffwechselumsatz herrscht, wie beispielsweise Tumorzellen. Dort zerfallen die Radionuklide, die entstehende Gammaquanten werden detektiert, was eine räumliche und zeitliche Darstellung der Verteilung der Radiopharmaka im Körper zulässt.

Bildgebende Verfahren, die diese Technik nutzen sind zum Beispiel die Positronen-Emissions-Tomografie (PET) und die Single photon emission computed tomography (SPECT). Im Falle der PET wird als Radionuklid ein  $\beta^+$ -Strahler verwendet. Das emittierte Positron annihiliert sofort mit einem Elektron in seiner Nähe, wodurch zwei Gammastrahlen in entgegengesetzte Richtung ausgesandt werden. Diese werden gemeinsam detektiert. Im Falle der SPECT wird ein Gammastrahler verwendet, welcher ein einzelnes Gammaquant verwendet, das direkt detektiert wird.

In der nuklearmedizinischen Therapie werden Alpha-, oder Betastrahler eingesetzt, die sich durch geringe Durchdringungstiefe ihrer Strahlung auszeichnen. Sie entfalten ihre Wirkung dadurch direkt am Zielort (zB Tumor). Eine weitere Möglichkeit ist es, Radionuklide an Antikörper gegen Tumore anzuhängen.

### **1.19 Erklären Sie den Elektroneneinfang, die Gammaumwandlung und die innere Konversion.**

Der Elektroneneinfang (electron capture EC) steht in Konkurrenz zum  $\beta^+$ -Zerfall. Er tritt bei Kernen mit hoher Ordnungszahl auf, da es bei diesen eine erhöhte

Aufenthaltswahrscheinlichkeit für die innerste Hüllenelektronen innerhalb des Kerns gibt. Ein Hüllenelektron wird durch ein Proton eingefangen und sie wandeln sich in ein Neutron, ein Elektron-Neutrino und eine gewisse Restenergie  $Q$  um. Diese Restenergie wird als kinetische Energie auf das Elektron-Neutrino übertragen. Die in der Hülle entstandene Lücke wird durch ein anderes Elektron aufgefüllt, wodurch ein Röntgenquant und gegebenenfalls ein Auger-Elektron emittiert wird.

Auch Atomkerne können sich in angeregten Zuständen befinden. Dies passiert häufig nach Alpha-, oder Betaumwandlungen. Die überschüssige Energie kann der Kern durch Emission eines Gammaquants abgeben und dadurch in den Grundzustand zurückkehren. Bei diesem Prozess bleiben Ordnungs-, und Massenzahl gleich. Die Gammaquanten werden mit einer charakteristischen Energie emittiert, ein Linienspektrum entsteht.

Die innere Konversion (IC) steht in Konkurrenz zur Gammaumwandlung, sie tritt also ebenfalls bei angeregten Kernzuständen auf. Die überschüssige Energie des Kerns kann hier durch elektromagnetische Wechselwirkung direkt auf ein Hüllenelektron übergehen. Dieses kann das Atom verlassen, seine Energie ergibt sich aus der Anregungsenergie des Kerns, abzüglich der Bindungsenergie. Das entstehende Spektrum ist daher ebenfalls ein diskretes Linienspektrum. Auch hier wird ein Röntgenquant und ggf. ein Auger-Elektron frei.

### **1.20 Beschreiben Sie die grundlegenden Strahlenschutzmaßnahmen.**

Es gibt drei grundlegende Maßnahmen, die dazu dienen sollen, die Strahlenexposition beruflich Strahlenexponierter Personen so gering wie möglich zu halten. Sie werden auch als die drei 'A's bezeichnet. Die Aufenthaltsdauer im Strahlenfeld soll so kurz wie möglich gestaltet werden, was durch die Einübung von Arbeitsabläufen oder die Beschränkung der Einschaltzeiten von Strahlanlagen erreicht werden kann. Der Abstand der exponierten Person von der Quelle soll möglichst groß gehalten werden, dies kann durch die Verwendung geeigneter Werkzeuge oder die räumliche Trennung von Steuereinrichtungen geschehen. Wichtig ist auch die Abschirmung der exponierten Person vom Strahlenfeld. Dies kann durch ortsfeste, mobile oder persönliche Abschirmungen erfolgen. Strahler mit hoher Dosisleistung sind in Kapseln eingeschlossen und dürfen nur in entsprechend abgeschirmten Räumen mit Schleusen verwendet werden.

### **1.21 Beschreiben Sie die IAEA.**

Die IAEA ist eine autonome Organisation innerhalb der Vereinten Nationen. Sie berichtet direkt dem UN-Sicherheitsrat und der Generalversammlung, wenn sie eine Gefährdung der internationalen Sicherheit feststellt. Seit 1970 ist sie auch zuständig für die Überwachung von kerntechnischen Anlagen im Rahmen des Atomwaffensperrvertrages. Sie entsendet 'Safeguards' zur Inspektion dieser

Anlagen.

Der Hauptsitz der IAEA liegt in Wien, im Forschungszentrum Seibersdorf wird zudem an der friedlichen Nutzung von Kernenergie geforscht (Medizin, Energie, Landwirtschaft). Die Ausbildung der Safeguards erfolgt alle 2-3 Jahre am Atominstitut der TU Wien.

Die Hauptaufgaben der IAEA sind:

- das Vorantreiben der zivilen Nutzung der Nukleartechnik
- die Bestimmung von Sicherheitsmaßnahmen, um den Schutz vor ionisierender Strahlung sowie der Strahlenquelle selbst zu gewährleisten
- die Kontrolle internationaler Abkommen, damit kerntechnische Anlagen nicht für militärische Zwecke missbraucht werden

### **1.22 Beschreiben Sie ausführlich UNSCEAR, ICRP und ICRU.**

Das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) befasst sich mit den Auswirkungen der Atomtechnologie und Radioaktivität (zB konkret im Fall Tchernobyl und Fukushima). In unregelmäßigen Abständen werden Berichte veröffentlicht, die dem ICRP als eine der Grundlagen für ihre Empfehlungen bezüglich nationalem Strahlenschutz dienen sollen. Das Komitee besteht aus Experten, die von den mitgliedsstaaten ernannt werden.

Die International Commission on Radiation Protection (ICRP) gibt Empfehlungen ab, auf deren Grundlage nationale Strahlenschutzgesetze verabschiedet werden. Sie kann jedoch keine direkt bindenden Regeln aufstellen. Ein Beispiel für Richtlinien, die auf Empfehlungen der ICRP beruhen, sind die EURATOM-Strahlenschutzverordnungen der EU.

Die International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU) hat als vorrangige Aufgabe die Entwicklung von international angesehenen Empfehlungen betreffend Größen und Einheiten von Radioaktivität. Dazu gehört auch die Entwicklung von Prozessen, die zur Messung und Anwendung dieser Größen in Medizin, Biologie oder Industrie geeignet sind. Weiters sollen physikalische Daten für diese Prozesse bereitgestellt werden. Ziel ist, es, Verfahren zur Messung ionisierender Strahlung so einheitlich wie möglich zu gestalten.

### **1.23 Erläutern Sie die, hinsichtlich der biologischen Wirkung, definierten Dosisgrößen.**

Als Energiedosis wird die in einer bestimmten Masse  $m$  absorbierte Energie  $E$  bezeichnet, die Einheit der Dosis ist Gray (Gy):  $D[\text{Gy}] = \frac{E[\text{J}]}{m[\text{kg}]}$

Die Äquivalenzdosis  $H$  in der Einheit Sievert (Sv) ist definiert als das Produkt der Energiedosis  $D$  mit einem Strahlenwichtungsfaktor  $Q$  an einem Punkt im Gewebe:  $H = D \times Q$ . Dieser dient dazu, die unterschiedliche biologische Wirkung verschiedener Strahlenarten zu quantifizieren. Wirken mehrere Strahlenarten zusammen, so werden die einzelnen Komponenten summiert:  $H = \sum D_i \times Q_i$

Als Organäquivalenzdosis  $H_T$  wird das Produkt aus Strahlenwichtungsfaktor und mittlerer Energiedosis der bestrahlten Körperpartie bezeichnet. Die Berechnung erfolgt ähnlich wie bei der Äquivalenzdosis in der Einheit Sievert, mit dem Unterschied, dass nun nicht mehr ein Punkt im Gewebe sondern ein Volumen betrachtet wird. Der Strahlenwichtungsfaktor ist beispielsweise 1 für Photonen und Elektronen, 5 für Protonen und energieabhängig (bis zu 20) für Neutronen.

Die effektive Dosis  $E$  beschreibt das mit Strahlenexposition verbundene stochastische Risiko. Sie berücksichtigt auch die unterschiedliche Empfindlichkeit verschiedener Organe auf ionisierende Strahlung. Jede Körperpartie erhält hier einen Gewebewichtungsfaktor  $\omega_t$  der das individuelle Risiko dieses Organs angibt. Die effektive Dosis berechnet sich anhand der Organäquivalenzdosis zu  $E = \sum \omega_T \times H_T$ .

## 1.24 Beschreiben Sie die Bindungsenergie der Nukleonen im Atomkern und den Massendefekt.

Durch Bindung von freien Nukleonen im Kern über die starke Wechselwirkung wird während des Bindungsvorgangs Energie freigesetzt, umgekehrt ist zur Aufspaltung des Kerns diese Bindungsenergie zuzuführen. Diese Bindung ist aufgrund der Äquivalenz von Masse und Energie mit einem Massendefekt ( $E_B = \Delta m \times c^2$  verbunden, d.h. der Kern hat eine um die Bindungsenergie verringerte Ruheenergie, im Vergleich zur Summe der Ruheenergien der einzelnen Nukleonen. Die Bindungsenergie von Atomen kann mithilfe des Tröpfchenmodells von Bethe/Weizsäcker abgeschätzt werden.

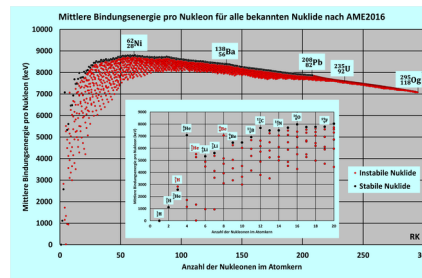


Abbildung 4: Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

### 1.25 Erläutern Sie die Arten der Wechselwirkungsmöglichkeiten von Neutronen mit Materie.

Da Neutronen keine Ladung besitzen, können sie auch nicht über die elektromagnetische Kraft mit Materie wechselwirken. Sie wechselwirken nicht mit Hüllenelektronen, sondern nur mit den Nukleonen eines Atoms. Aufgrund der geringen Reichweite der starken Kernkraft, müssen Neutronen daher sehr nah an den Kern herankommen. Neutronen zählen zu den indirekt ionisierenden Strahlungsarten, sie können Materie also erst über Sekundärteilchen ionisieren. Folgende Wechselwirkungsprozesse können auftreten:

- Elastische Streuung: Das Neutron ändert beim Stoß seine Bewegungsrichtung und gibt einen Teil seiner Bewegungsenergie an den Targetkern ab, dieser wird dabei nicht angeregt.
- Inelastische Streuung: Das Neutron wird kurzfristig von den Kernkräften eingefangen und überträgt seine Energie auf den Kern, dieser wird angeregt und emittiert ein Neutron.
- Neutroneneinfang mit Gammaquantenemission: Langsame Neutronen werden vom Kern absorbiert und bilden ein neues Nuklid mit erhöhter Massenzahl, dieses ist meist instabil und regt sich über Aussendung eines Gammaquants ab.
- Neutroneneinfang mit Emission von Teilchen: selbes Prinzip wie oben, nur dass das neue, instabile Nuklid ein geladenes Teilchen oder Neutron aussendet.
- Neutroneninduzierte Spaltung: Der Targetkern zerbricht durch Beschuss mit hochenergetischen Neutronen in mehrere kleinere Kerne

Neutronen können nach ihrer kinetischen Energie eingeteilt werden:

- langsame ('thermische') Neutronen: 0,02 eV bis 0,05 eV
- schnelle Neutronen: 0,05 eV bis 5 MeV

### 1.26 Erläutern Sie die Basistypen von Kernkraftwerken.

Im Siedewasserreaktor dient Wasser als Moderator und Kühlmittel. Er verfügt nur über einen Dampf-Wasser-Kreislauf. Die bei der Kernspaltung freiwerdende Wärme lässt das Wasser verdampfen, wodurch eine Turbine angetrieben wird. Der entspannte Wasserdampf wird durch Kühlwasser verflüssigt und wieder dem Kreislauf zugeführt.

Im Druckwasserreaktor dient ebenfalls Wasser als Moderator und Kühlmittel. Im Unterschied zum Siedewasserreaktor verfügt er über zwei Wasser-Dampf-

Kreisläufe. Das im Reaktorkern erhitzte Wasser gibt seine Wärme an den Sekundärkreislauf ab, wodurch der Sekundärkreislauf, der die Turbine antreibt, frei von Radioaktivität ist. Dies erleichtert die Wartung der Turbine. Druckwasserreaktoren sind der weltweit am häufigsten verwendete Reaktortyp.

In Tschernobyl kam ein graphitmoderierter Siedewasser-Druckröhrenreaktor zum Einsatz. Als Kühlmittel wurde Wasser verwendet. Er enthält nicht einen großen Reaktordruckbehälter, sondern besteht aus zahlreichen kleinen Druckröhren, in denen sich die Brennelemente befinden. Auch hier wird eine Turbine durch Wasserdampf betrieben. Dieser Reaktortyp hat den Vorteil, dass der Wechsel von Brennelementen während des Betriebs möglich ist und dadurch sehr leicht waffenfähiges Plutonium gewonnen werden kann. Zudem ist dieser Reaktortyp aufgrund seiner modularen Bauweise vergleichsweise einfach zu errichten. Nachteile sind das fehlende Containment und die aufwendige Steuerung der Kettenreaktion.

### **1.27 Erklären Sie Comptonstreuung, Paarerzeugung und Kernphotoeffekt.**

Bei der Compton-Streuung handelt es sich um einen elastischen Streuprozess. Ein Photon stößt ein quasifreies Elektron und überträgt dabei einen Teil seiner kinetischen Energie und seines Impulses. Bei maximalem Energieübertrag bildet sich die sogenannte Compton-Kante. Die Wahrscheinlichkeit der Compton-Streuung nimmt mit zunehmender Photonenenergie ab.

Voraussetzung für die Paarerzeugung ist eine Photonenenergie von mehr als 1,022 MeV und die Präsenz eines Coulombfeldes, üblicherweise von einem Atomkern. Sind diese Bedingungen erfüllt, wandelt sich das Photon in ein Elektron-Positron-Paar um.

Photonen können über die elektromagnetische Wechselwirkung auch mit Atomkernen wechselwirken. Dabei wird das Photon absorbiert und ein Nukleon wird aus dem Kern emittiert. Dieser Prozess wird als Kernphotoeffekt bezeichnet. Dafür ist allerdings eine gewisse Separationsenergie notwendig, die das Photon mitbringen muss. Hat es eine geringere Energie, kann es absorbiert werden und den Kern in einen angeregten Zustand heben. Dieser kann unter Emission eines Gammaquants dann wieder in den Grundzustand übergehen.

### **1.28 Erläutern Sie die Rechtslage des Strahlenschutzes in Österreich.**

Der Ausgangspunkt für den gesetzlichen Rahmen ist das Bundesstrahlenschutzgesetz von 1969. Infolge des EU-Beitritts bilden aktuell die EURATOM-Richtlinien die Grundlage für die Strahlenschutzgesetzgebung. Diese Richtlinien werden in Form von Gesetzen und Verordnungen vom Nationalrat bzw. dem zuständigen Bundesminister beschlossen. Für die Vollziehung des Strahlenschutz-Bundesgesetzes

sind das Bundesministerium für Gesundheit und das Bundesministerium für Umwelt, sowie teilweise die jeweiligen Landeshauptleute zuständig. Zudem gibt es diverse Verordnungen, hierzu siehe 1.16.

## **1.29 Beschreiben Sie die grundlegenden Sicherheitsbarrieren moderner Kernreaktoren.**

Die Sicherheitsbarrieren könne in mehrere Stufen unterteilt werden:

- Kristallgitter des Brennstoffes: Die entstehenden Spaltprodukte wirken quasi als Fremdatome im Kristallgitter des Uranoxids. Solange dieses intakt ist, bleiben die meisten Spaltprodukte zuverlässig im Kristallgitter.
- Die Brennstabhüllen sind gasdicht verschweißt um gasförmige Spaltprodukte in ihrem Inneren zu halten.
- Der Reaktordruckbehälter besteht aus einer ca. 25 cm dicken Stahlwand und bildet zusammen mit den Rohrleitungen ein geschlossenes Kühlsystem, in dem auch eventuell aus den Hüllrohren austretende Spaltprodukte eingeschlossen sind.
- Ein thermischer Schild dient der Abschirmung von Direktstrahlung aus dem Reaktorkern, er weist allerdings keine vollkommen geschlossene Konstruktion auf.
- Containment: Ein gasdichter und Druckfester Stahlbehälter mit einer Dicke von ca 4cm ist darauf ausgelegt, im Falle eines Lecks im Kühlkreis, das gesamte austretende Wasser mitsamt der enthaltenen Spaltprodukte aufzunehmen.
- Stahlbetonhülle: Dient vor allem als Schutz vor Einwirkungen von außen und weist eine Dicke von 1,5 bis 2 m auf.

## **1.30 Reflexionsfragen**

### **1.30.1 Energieerzeugung**

Wie beurteilen Sie die technische Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung elektrischer Energie?

Wie beurteilen Sie die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung weltweit?

- AKWs sind teuer in der Errichtung und haben sehr lange Bauzeiten
- Gewisses Grundrisiko ist immer da, vor allem in bevölkerungsreichen Gebieten
- Ukraine-Krieg zeigt, dass AKWs im Kriegsfall ein großes Sicherheitsrisiko darstellen können



- Auch der Brennstoff für AKWs ist nicht unbegrenzt vorhanden
- Endlagerung der Brennstoffe ist problematisch
- Risiko von AKWs ist geringeres/größeres Übel im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Ausstoß
- statistisch gesehen sterben weitaus mehr Menschen an den Folgen des hohen CO<sub>2</sub> Ausstoßes, als jemals aufgrund von Reaktorunfällen gestorben sind
- AKWs stellen im Gegensatz zu Solar- oder Windenergie eine permanente Energiequelle dar, die zur Deckung der Grundlast herangezogen werden kann
- Im Gegensatz zu Kohlekraftwerken können AKWs theoretisch noch deutlich weiterentwickelt werden

Wie beurteilen Sie die Lösungsmöglichkeiten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle?

- hochradioaktiver Abfall muss in tiefen geologischen Formationen gelagert werden
- Herausforderung: Behälter muss potenziell hunderttausende von Jahren standhalten, ist aber permanent ionisierender Strahlung ausgesetzt, es kann zur Diffusion von Radionukliden kommen, die wieder in die Biosphäre eindringen; Folgen?
- Naturreaktor Oklo: Radionuklide sind durch Diffusion innerhalb von 2 Milliarden Jahren weniger als 50 Meter weit gewandert
- Schwierigkeit: Berücksichtigung von Faktoren, an die heute niemand denkt?

### 1.30.2 Ethik

Sind Ihrer Meinung nach alle machbaren nuklearen Anwendungen ethisch vertretbar?

Gibt es Ihrer Meinung nach ethische Grenzen für nukleartechnische Anwendungen?

- Kernwaffen sind unvertretbar, da zu viel Zerstörungspotenzial in den Händen eines Menschen liegt
- auch Forschung kann bereits kritisch sein, da auch hier Unfälle geschehen können
- es ist möglich, dass Menschen als Testsubjekte missbraucht werden (Atombombentests an Soldaten)

- für jede Anwendung individuelle Kosten/Nutzen-Überlegung
- Ethik ist immer subjektiv und darf die Forschung nie einschränken, weil Fortschritt blockiert werden könnte
- Auch Atomwaffen können ethisch gerechtfertigt sein, wenn sie "richtig eingesetzt werden"

### 1.30.3 Medien

Wie beurteilen Sie den Einfluss von Medien bezüglich Radioaktivität und Strahlung?

- Berichterstattung rund um Reaktorunfälle hat für große Ablehnung in der Bevölkerung gegenüber Kerntechnik generell gesorgt
- 'Atom' oder 'Kern' als Begriffe sind teils negativ konnotiert; zB 'Bundesverfassungsgesetz für ein atomfreies Österreich'; in der Medizin: Verwendung von 'Magnetresonanz' anstelle des korrekteren Begriffes 'Kernspinnresonanz'
- in sterreich und Deutschland ist die Ablehnung der Atomkraft EU-weit am größten

### 1.30.4 Kernwaffen

Wie beurteilen Sie Kernwaffen?

Wie beurteilen Sie die Vereinten Nationen hinsichtlich der Abrüstung von Kernwaffen?

- Kernwaffen sind Massenvernichtungswaffen
- Bei ihrem Einsatz kommt fast zwangsläufig auch Zivilbevölkerung zu Schaden
- Spätfolgen (zB radioaktiver Niederschlag) kaum kontrollierbar
- Schon nur die Tests von Atomwaffen sorgen für Umweltschäden
- Einsatz von Atomwaffen einer Seite zieht Vergeltung nach sich, Auslöschung größer Teile der Menschheit möglich
- Derartiges Zerstörungspotenzial sollte nicht in Händen von Menschen sein
- Möglicherweise hat die reine Möglichkeit eines Einsatzes von Kernwaffen während des Kalten Krieges eine Eskalation verhindert
- Es ist fast unmöglich, alle Staaten von einem Verbot zu überzeugen →

man muss sich verteidigen können

- Vereinte Nationen haben kaum Handhabe Vertragsbrüche wirklich zu ahnden
- Kontrollen basieren auf Freiwilligkeit
- zB Nordkorea arbeitet trotz Verbot an seinem Kernwaffenprogramm
- Atomwaffenkontrollverträge sind trotzdem gut, da sie zumindest das Risiko verringern

#### **1.30.5 Fukushima**

- Ein Tsunami beschädigte die Reaktorblöcke, wodurch Radioaktivität austrat
- Es wurde ca. ein fünftel der radioaktiven Emissionen von Tschernobyl frei
- Schätzung der Todesfälle infolge des Unfalls schwierig, bis 2013 wurden keine unmittelbar strahlungsbedingten Todesfälle gemeldet, mittelbare Todesfälle durch Krebs und die Evakuierungen werden auf etwa 1000 geschätzt
- radioaktiv verseuchtes Wasser trat in Pazifik aus
- 2021 wurde genehmigt, verseuchtes Wasser bewusst in den Pazifik einzuleiten, da die Speicherkapazitäten erschöpft waren
- Gebiete rund um Fukushima wird dekontaminiert und soll wieder bewohnbar werden

#### **1.30.6 Tschernobyl**

- Schwerwiegende Verstöße gegen Sicherheitsvorschriften, infolge dessen unkontrollierter Leistungsanstieg und Explosion des Reaktors
- Unfall ausschließlich auf menschliche Fehler zurückzuführen
- enorme Menge an Radioaktivität wurde in Atmosphäre freigesetzt, radioaktiver Niederschlag in weiten Teilen Europas
- sehr unterschiedliche Angaben über Todesfälle infolge der Katastrophe: wohl weniger als 50 unmittelbar durch den Unfall, langfristig statistisch gesehen aber möglicherweise hunderttausende Todesfälle infolge von Strahlenexposition
- Sowjetische Regierung reagierte verspätet und zu lasch, Todesfälle hätten

verhindert werden können

- heute: Sperrzone mit einem Radius von 30 km
- heutige Strahlenbelastung hauptsächlich durch Cäsium-137, Ortsdosisleistung in der Sperrzone liegt zwischen 0,06 und 100  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde. In Österreich liegt sie zum Vergleich im Durchschnitt bei etwa 0,1  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde.

## 2 Fragen Poljanc

### 2.1 Nennen Sie 5 Beispiele für die Anwendung ionisierender Strahlung und beschreiben Sie diese in je 2 Sätzen.

In der Radiologie wird ionisierende Strahlung für diagnostische Zwecke verwendet. In SPECT und PET werden Radionuklide an Moleküle angeheftet, die im Körper an Orte mit hohem Stoffwechselumsatz transportiert werden. Diese zerfallen und durch Detektion der Gammastrahlung ist es möglich festzustellen, wie sich die Aktivität im Körper verteilt. Dadurch können beispielsweise Tumore erkannt werden. In der Materialprüfung können mithilfe von Röntgenstrahlung beispielsweise Schweißnähte zerstörungsfrei untersucht werden. Auf dem Röntgenbild sind Qualitätsmängel wie Luftporen sichtbar. Die 'zerstörerische' Wirkung ionisierender Strahlung auf Gewebe wird in der Strahlentherapie ausgenutzt, indem der Tumor gezielt einer hohen Dosis ausgesetzt wird, wodurch die Tumorzellen absterben. Hierfür wird vor allem Photonen- und Ionenstrahlung eingesetzt. In der Spurenelementanalytik wird der Photoeffekt ausgenutzt. Eine Probe wird Röntgenstrahlung ausgesetzt, wodurch ihre Elektronen ionisiert werden, welche wiederum durch Elektronen einer höheren Schale ersetzt werden und dabei ein Photon mit charakteristischer Wellenlänge aussenden. Ionisierende Strahlung kann auf biologische Organismen sterilisierend wirken. Dies wird genutzt, indem männliche Schadinsekten gezielt durch Bestrahlung sterilisiert und freigelassen werden, was zur Folge hat, dass die Population stark dezimiert wird. Dies hat den Vorteil, dass keine chemischen Insektizide eingesetzt werden müssen.

### 2.2 Für welche Entdeckung wurde Konrad Wilhelm Röntgen mit dem Nobelpreis ausgezeichnet? Beschreiben Sie diese in 3-4 Sätzen.

Röntgen experimentierte mit Vakuumröhren und entdeckte, dass von dieser Strahlen ausgingen, die scheinbar Materie durchleuchten konnte. Bei weiteren Versuchen gelang ihm eine Aufnahme der Hand seiner Frau, auf der Knochen und Ehering klar zu erkennen waren. Seine Arbeiten legten den Grundstein für die moderne medizinische Diagnostik.

### 2.3 Welche Entdeckung machte das Ehepaar Curie und welchen Einfluss hatte diese Entdeckung auf die weitere Forschung?

1898 entdeckten sie die Radioaktivität von Thorium, sowie die Elemente Polonium und Radium. Marie Curie gilt als 'erste Radiologin', da sie sich während des ersten Weltkrieges der Behandlung verwundeter Soldaten mithilfe von Röntgenstrahlung widmete. Sie erhielt gemeinsam mit Pierre Curie und Henri Becquerel den Nobelpreis für Physik und später jenen für Chemie.

**2.4 Otto Hahn, Fritz Strassmann und Liese Meitner sind 3 bekannte Namen, die mit welcher Entdeckung in Verbindung gebracht werden. Beschreiben Sie kurz den Stellenwert von Dr. Meitner in dieser Forschungsgruppe.**

Nur Hahn und Straßmann erhielten den Nobelpreis für die Entdeckung der Kernspaltung. Meitner lieferte die theoretische Berechnung, Erklärung und Deutung der Versuche. Zudem wurde die verwendete Versuchsanordnung nach Anweisung von Meitner aufgebaut.

**2.5 Geben Sie die vollständige Bezeichnung folgender Einheiten, deren zugehörige physikalische Größe, sowie deren Bedeutung an: Bq, Gy, Sv**

Becquerel bezeichnet die Einheit der Aktivität, also der radioaktiven Zerfälle pro Sekunde in der SI-Basisgröße  $s^{-1}$ . Hertz hat dieselbe Basisgröße, bezeichnet aber einen periodischen Vorgang, während Becquerel einen statistischen Vorgang beschreibt. Gray ist die Einheit der Energiedosis und bezeichnet die von einer bestimmten Masse  $m$  absorbierte Energie  $E$   $D = \frac{dE}{dm}$ . Sievert ist die Einheit der Äquivalentdosis  $H$ , sie berechnet sich durch Multiplikation der Energiedosis mit einem biologischen Qualitätsfaktor, der die Wechselwirkung einer individuellen Strahlenart berücksichtigt.

**2.6 Was versteht man unter direkter bzw indirekter Ionisation? Bei welcher Strahlenart wirkt welche Art der Ionisation überwiegend bezüglich menschlicher Gewebe?**

Als indirekte Ionisation wird ein Prozess bezeichnet, bei dem Elektronen durch Strahlung aus ihrem Atom herausgeschlagen werden und sich dadurch Radikale, also hochreaktive Moleküle, bilden. Diese verursachen dann auf chemischem Wege Zellschäden. Im Gegensatz dazu entsteht bei direkter Ionisation der Schaden dadurch, dass die einfallende Strahlung selbst Bindungen der DNA-Moleküle aufricht. Für Röntgenstrahlung sind etwa zwei Drittel aller Schäden auf indirekte Ionisation zurückzuführen. Für Strahlenarten mit hohem Linearem Energietransfer dominiert direkte Ionisation.

**2.7 Erklären Sie die Begriffe stochastisch und deterministisch.**

stochastische Schäden sind zufallsbedingt, es gibt keinen Schwellwert und sie können noch Jahre nach der Exposition auftreten. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hängt von der Dosis ab, nicht aber die Schwere des Schadens. Im

Gegensatz dazu existiert für deterministische Schäden ein Schwellwert, diese Schäden sind akut und die Schwere des Schadens nimmt mit der Dosis zu.

## **2.8 Strahlenschutz: Welcher gesetzliche Grenzwert gilt für die „übrige Bevölkerung“? Welche Grenzwerte für „strahlenexponiertes Personal“?**

Übrige Bevölkerung: 1 mSv pro Jahr; Strahlenexponiertes Personal: 20 mSv pro Jahr, 100 mSv über 5 Jahre

## **2.9 Was bedeutet ALARA? Beschreiben Sie ein Beispiel für die Anwendung dieses Prinzips.**

‘As low as reasonably achievable’, die Dosis soll also so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar sein. Als Beispiel kann eine radiologische Untersuchung genannt werden: Es sollen nur die Körperpartien bestrahlt werden, die für die Untersuchung wirklich von Interesse sind.

## **2.10 Wer sind die „Radium Girls“? Kurzbeschreibung**

Dabei handelte es sich um Fabrikarbeiterinnen, deren Arbeit darin bestand, die Zifferblätter von Uhren mit Leuchtfarbe zu versehen. Diese Leuchtfarbe enthielt Radium, viele Frauen verstarben an den Folgen der Strahlung, da sie die Pinsel ableckten um feine Striche ziehen zu können oder sich die Finger bemalten.

## **2.11 Was versteht man unter dem ‘Strahlenkuchen = Strahlentorte’? Wie hoch ist die Gesamt-Strahlenbelastung in Österreich (Zahl und Einheit!)**

Damit ist ein Tortendiagramm gemeint, das durchschnittliche Strahlenbelastung in Österreich aufzeigt. Die Gesamt-Strahlenbelastung in Österreich beträgt durchschnittlich 4,3 mSv im Jahr. Davon entfallen 1,6 mSv auf die Inhalation von Radon und dessen Folgeprodukten und 1,3 mSv auf medizinische Strahlenanwendungen.

## **2.12 Wie können Detektoren eingeteilt werden? Beschreiben sie mögliche Gruppen.**

Detektoren können auf mehrere Arten unterteilt werden. Es kann unterschieden werden, ob die bei der Ionisation erzeugten Ladungen direkt gemessen werden (zB Ionisationskammern), oder indirekt auf Grund ihrer physikalischen oder chemischen Wirkung (photographische Wirkung, Thermolumineszenzdosimeter). Sie können auch nach ihrer Anwendung unterteilt werden, also ob nur punktuell eine Größe des Strahlenfelds gemessen werden kann (zB Dosis, Aktivität), oder simultan in mehreren Punkten gemessen werden kann, wie bei Röntgenaufnahmen.

### 2.13 Was versteht man unter Dosimetrie?

Dosimetrie bezeichnet die Messung der von einem Strahlenfeld in bestimmten Substanzen erzeugten Dosen, also die pro Masseneinheit übertragene Energie, oder die durch das Strahlungsfeld erzeugte Ladung.

### 2.14 Was ist eine Strahlenfeldanalyse und wie quantifiziert man ein Strahlenfeld?

Als 'Strahlenfeldanalyse' wird die Messung der räumlichen Ausdehnung eines Strahlenfeldes bezeichnet. Dabei wird beispielsweise die Zusammensetzung der Strahlung bewertet. Besonders wichtig ist die Untersuchung von möglichen Streufeldern für den Strahlenschutz. Filme weisen hierfür eine geeignete räumliche Auflösung auf.

### 2.15 Beschreiben Sie die Kennlinie von gasgefüllten Detektoren.

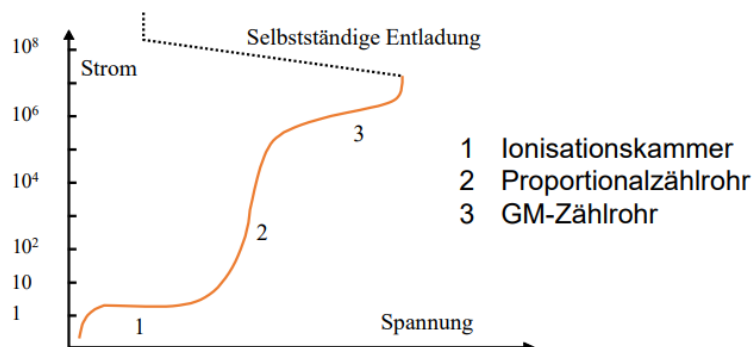


Abbildung 5: Kennlinie eines gasgefüllten Detektors

Bei niedriger Spannung rekombiniert ein gewisser Teil der Elektronen wieder, bevor sie die Elektrode erreichen ('Rekombinationsbereich'). Wird die Spannung erhöht, erreichen alle freigesetzten Elektronen die Anode, der im Stromkreis messbare Impuls ist proportional zur Energie, die die Strahlung im Zählrohr abgegeben hat (Ionisationskammer). Bei weiterer Erhöhung, haben manche freigesetzten Elektronen genug Energie, um ihrerseits durch Stöße Atome zu ionisieren. Es kommt zu einem Lawineneffekt ('Gasverstärkung'), Auch hier ist der Stromimpuls proportional zur im Detektorvolumen deponierten Energie, zusätzlich kann man verschiedene Arten von Strahlung voneinander unterscheiden. Erhöht man die Spannung noch weiter, erzeugt jedes freigesetzte Elektron eine solche Gasentladung. In diesem Bereich arbeiten 'Geiger Müller Zählrohre', sie liefern die größten Stromimpulse aller gasgefüllten Detektoren, wodurch die elektronische Verarbeitung besonders einfach wird.



**2.16 Beschreiben sie die Funktionsweise einer Ionisationskammer.**

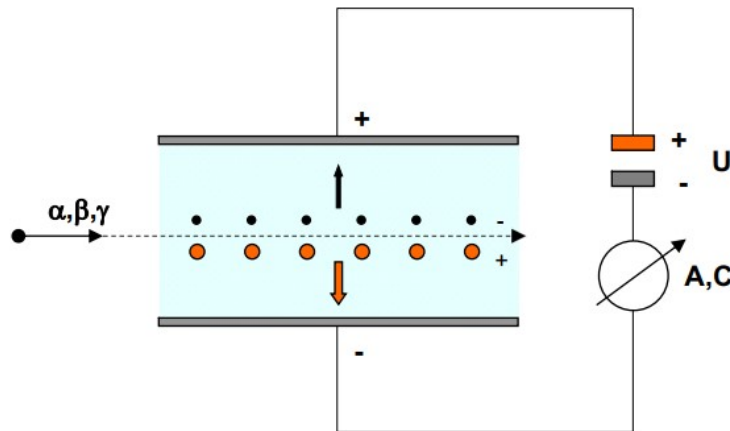


Abbildung 6: Schema einer Ionisationskammer

Ionisierende Strahlung dringt durch ein Eintrittsfenster in das Detektorvolumen ein. Hier werden Elektronen-Ionen-Paare aus den Gasatomen (oft Luft) gebildet. An den Elektroden ist eine Spannung angelegt, die so gewählt wird, dass alle Elektronen/Ionen die Anode erreichen. An die Elektroden ist ein Stromkreis angeschlossen, mit welchem die ankommenden Elektronen detektiert und weiter elektronisch verarbeitet werden.

**2.17 Beschreiben sie die Funktionsweise eines Proportionalzählrohres.**

Grundsätzliches Schema wie bei der Ionisationskammer, aber höhere Spannung (einige 100 bis 1000 V), sodass ein Lawineneffekt entsteht. Ein Vorteil ist, dass Proportionalzählrohre keine Totzeit aufweisen.

**2.18 Beschreiben sie die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohres.**

Noch höhere Spannung als beim Proportionalzählrohr. Die Emission von Photonen im Detektorvolumen kann zusätzliche Lawineneffekte auslösen. Die Elektronen werden sehr schnell aus dem Plasma abgesaugt, die schwereren Ionen wandern allerdings nur langsam zur Kathode und bilden eine Ionenwolke, die die Feldstärke im Anodenraum verringert, wodurch die Lawine zum Stillstand kommt. Geiger Müller Zählrohre weisen eine Totzeit von ca 0,1 ms auf, da die Größe der Stromimpulse nicht mehr von der Anzahl der primär erzeugten Ionenpaare abhängt, ist ihr Signal unabhängig von Energie und Art der Strahlung.

### **2.19 Was ist eine gewebeäquivalente Ionisationskammer und wo wird diese eingesetzt?**

Gewebeäquivalente Ionisationskammern besitzen in bestimmten Energiebereichen ähnliche Absorptions- und Schwächungseigenschaften wie menschliches Gewebe. Dies wird im medizinischen Bereich häufig eingesetzt um die Ionendosis in Körpergewebe zu bestimmen.

### **2.20 Wie ist ein Szintillationsdetektor aufgebaut? Beschreiben sie dessen Funktionsweise.**

Der Szintillatorkristall ist, bis auf eine Ein- und Austrittsfläche für die Strahlung allseitig in Reflektormaterial eingepackt. Die einfallende Strahlung (bzw. deren Sekundärelektronen) regt die Atome und Moleküle des Kristalles an, diese kehren sofort wieder in ihren Grundzustand zurück und emittieren jeweils Photonen. Diese Photonen schlagen Elektronen aus einer Photokathode, welche durch ein elektrisches Feld so stark auf eine Dynode beschleunigt werden, dass dort jedes Elektron weitere Elektronen herausschlägt. Alle diese Elektronen werden nun auf die nächste Dynode beschleunigt und es entsteht von Dynode zu Dynode eine Verstärkung des Signals, bis die Elektronen detektiert werden.

### **2.21 Welchen Vor- und Nachteil hat der Einsatz unterschiedlicher Materialien von Szintillationsdetektoren?**

Das Material des Szintillationsdetektors muss je nach Anwendungsfall richtig gewählt werden. Für Photonenstrahlung werden oft NaI(Tl)-Detektoren gewählt, da sie eine gute Lichtausbeute und gute Absorptionseigenschaften bieten. Allerdings sind sie hygroskopisch und lichtempfindlich, müssen also verpackt werden. CsI(Tl)-Detektoren haben diese Nachteile nicht, liefern aber eine geringere Lichtausbeute. Zum Nachweis von  $\beta$ -Strahlung werden hauptsächlich Szintillatoren mit niedriger Ordnungszahl eingesetzt, da die Strahlung möglichst verlustfrei ins Szintillatorvolumen muss. Alternativ können Flüssigszintillatoren verwendet werden, hier wird die zu untersuchende Substanz in eine Lösung eingebracht, so kann auch  $\beta$ -Strahlung niedriger Energie nachgewiesen werden. Die PMTs müssen aber gekühlt werden, um den Hintergrund zu verringern.

### **2.22 Beschreiben Sie den Aufbau eines typischen Spektrums**

Die beiden ersten Linien im Spektrum sind charakteristisch für bestimmte Elemente, oft findet sich hier auch die Linie eines Abschirmmaterials wie Blei. Ein kleinerer Peak resultiert aus der Rückstreuung des Haupt-Peaks. Der Hintergrund im linken Teil des Spektrums hat seine Ursache im Compton-Effekt. Bei einer bestimmten Energie ist die sogenannte Compton-Kante zu sehen, also jene Energie, bei der das Compton-Elektron komplett zurückgestreut wird.

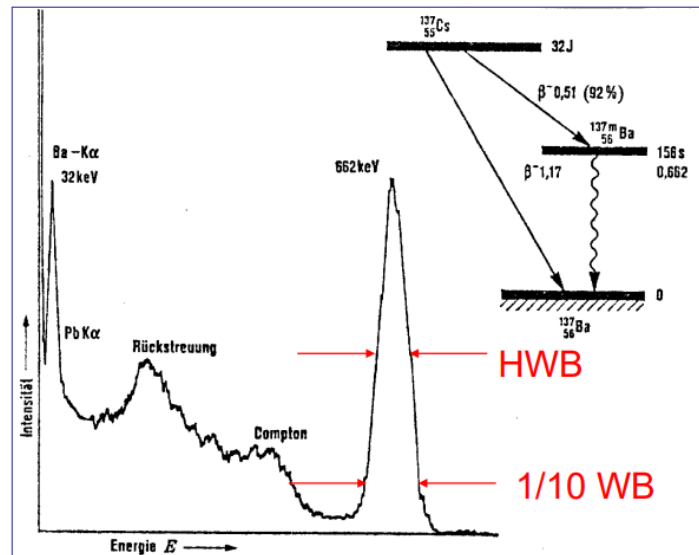


Abbildung 7: Aufbau eines typischen Spektrums

### 2.23 Was versteht man unter einer Halbwertsbreite, was unter einer Zehntelwertsbreite?

Damit lassen sich Aussagen über die Qualität eines Detektors treffen. Je geringer die Breite, desto besser die Energieauflösung dieses Detektors. Dazu sieht man sich einen bestimmten Peak (oft die 662 keV-Linie von Cs-137) an, und misst die Breite dieses Peaks auf halber (bzw. Zehntel-) Höhe.

### 2.24 Was ist ein LSC und welche Arten der Strahlung lassen sich damit nachweisen?

Damit wird ein Flüssigszintillationsdetektor bezeichnet. Er ist gut geeignet um niederenergetische  $\beta$ -Strahlung nachzuweisen.

### 2.25 Was ist ein Halbleiterdetektor? Geben Sie eine Kurzbeschreibung des Aufbaus und dessen Funktionsweise an.

Bei einem Halbleiterdetektor handelt es sich um einen mit Fremdatomen dotierten Kristall (oft Si, Ge). Die Diode wird in Sperrichtung betrieben, wodurch im Normalfall kein Strom fließt. Erzeugt die einfallende Strahlung ein Elektron-Loch-Paar, wandern diese zu den entsprechenden Elektroden und sind als Stromimpuls messbar. Halbleiterdetektoren weisen eine sehr hohe Energieauflösung

auf und werden beispielsweise im ATLAS-Detektor des CERN verwendet.

### **2.26 Warum müssen Halbleiterdetektoren gekühlt werden? Nennen sie die beiden Arten der an der häufigsten verwendeten Kühlung.**

An die Detektoren müssen hohe Spannungen angelegt werden, ohne Kühlung würden die Ladungsträger durch den Kristall wandern und der Kristall würde beschädigt werden. Üblicherweise wird der Detektor mit flüssigen Stickstoff gekühlt. Es ist auch möglich, die Detektoren mithilfe eines Peltier-Elements zu kühlen.

### **2.27 Welche Abbildungsfehler können bei fotografischen Verfahren auftreten und wie werden diese vermieden?**

Unschärfen können durch Bewegung und Streustrahlen entstehen. Bewegungsunschärfen lassen sich durch eine Verbesserung der Fixierung des Films und eine Verkürzung der Belichtungszeit erreichen, Streustrahlen können teilweise abgeschirmt werden. Eine gewisse geometrische Unschärfe kommt durch die räumliche Ausdehnung des Brennflecks zustande, dies bewirkt, dass sich am Bild ein Schatten ausbildet. Dies kann durch Verkleinerung des Fokus und Annäherung des Objektes an den Schirm bewerkstelligt werden.

### **2.28 Was ist ein TLD? Beschreiben Sie Aufbau, Funktion und Einsatzgebiet**

Bei einem Thermolumineszenzdosimeter handelt es sich um einen mit Fremdatomen dotierten Kristall. Durch diese Dotierung entstehen zwischen dem Valenz- und Leitungsband des Kristalls zusätzliche Energieniveaus ('Traps'). Bei Einfall ionisierender Strahlung werden die Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband gehoben, und fallen danach nicht wieder zurück in den Grundzustand, sondern mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in eine der Traps. Dabei handelt es sich um metastabile Zustände, die erst zerstört werden, indem man den Kristall erhitzt. Durch die zusätzliche thermische kann das Elektron aus der Trap befreit werden, und gibt die Energiedifferenz zwischen Trap und Valenzband als Photon ab. Dieses Photon wird mithilfe eines Photomultipliers detektiert. TLDs werden hauptsächlich in der Personendosimetrie verwendet.

### **2.29 Beschreiben Sie den prinzipiellen Aufbau eines Detektors im Bereich der Hochenergiephysik.**

Der ATLAS-Detektor ist zylinderförmig, mit einer Länge von 46 m und einem Durchmesser von 25 m. Er besteht aus:

- einem Magnetsystem, welches geladene Teilchen ablenkt
- Siliziumdetektoren, die die einzelnen Wechselwirkungspunkte auflösen und zwischen Elektronen und Hadronen unterscheiden können
- einem Kalorimetersystem, welches Impuls und Energie von elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen bestimmt
- eigenen Myon-Detektoren, da Myonen nicht an der starken Wechselwirkung beteiligt sind und aufgrund ihrer Masse die Kalorimeter ungestört durchqueren können

**2.30 Nennen Sie 2 Anwendungsgebiete von Detektoren in der Forschung. Beschreiben Sie eines dieser Anwendungsgebiete näher (3-4 Sätze).**

Detektoren werden in der Neutronenaktivierungsanalyse und der Röntgenfluoreszenzanalytik (RFA) verwendet. Bei der RFA wird der Photoeffekt ausgenutzt. Eine Probe wird Röntgenstrahlung ausgesetzt, wodurch die Elektronen der oberen Schichten ionisiert werden. Die entstandene Lücke wird durch ein Elektron einer höheren Schale aufgefüllt und die Energiedifferenz als Photon mit für das Element charakteristischer Energie abgegeben. Diese Photonen werden detektiert, wodurch man bestimmen kann, welche Elemente in der Probe enthalten sind.

**2.31 Beschreiben Sie die Prinzipien der medizinischen Diagnostik bezüglich der Patient\_Innen und bezüglich des Personals**

- Verringerung der Patientendosis um die Risiken der Strahlenexposition für den Patienten zu senken, gleichzeitig soll dieselbe diagnostische Fragestellung mit derselben Qualität beantwortet werden können
- verschiedene diagnostische Verfahren wie CT, MR, PET, SPECT, sollen miteinander verknüpft werden. Dies kann beispielsweise durch kombinierte CT-PET-Geräte geschehen, um eine Zeitersparnis zu erreichen.
- Für alle neu entwickelten Methoden muss eine umfassende Qualitätskontrolle und -sicherung gewährleistet sein.
- Nicht nur die Patienten, sondern auch das Personal soll besser vor Strahlenexposition geschützt werden

**2.32 Welche diagnostischen Möglichkeiten stehen unter Einsatz ionisierender Strahlung zur Verfügung? Beschreiben Sie eine der Möglichkeiten genauer (3-4 Sätze).**

- Computertomographie (CT)
- Positronen-Emissions-Tomographie (PET)
- Angiographie
- Single photon emission computed tomography (SPECT)

Bei der PET wird dem Patienten ein Radiopharmakon verabreicht. Dieses wird im Körper an Stellen mit hohem Stoffwechselumsatz transportiert. Nach einer gewissen Zeit zerfällt das Radionuklid und sendet dabei ein Positron aus ( $\beta_+$ -Zerfall). Das Positron annihiliert sofort mit einem Elektron, wodurch zwei Gammaquanten in entgegengesetzte Richtung emittiert werden. Werden zwei Gammaquanten innerhalb eines gewissen Zeitfensters von dem äußeren Detektor aufgezeichnet, wird ein Signal abgegeben. Aus den Signalen lässt sich die Aktivitätsverteilung im Körper berechnen, woraus sich Rückschlüsse auf zB Tumore ziehen lassen.

**2.33 Beschreiben Sie das Funktionsprinzip einer Röntgenröhre.**

Eine Glühkathode emittiert Elektronen, die durch die angelegte Spannung auf die Anode beschleunigt werden. Dort wechselwirken die Elektronen mit dem Anodenmaterial (meist Wolfram). Wird ein Elektron im Coulombfeld abgebremst, gibt es seine kinetische Energie in Form eines Photons ab (Bremsstrahlung), das entstehende Spektrum ist kontinuierlich bis zu einer Maximalenergie. Dem überlagert ist das charakteristische Röntgenspektrum, ein Linienspektrum, welches entsteht, wenn die einfallenden Elektronen andere Elektronen aus ihrer Schale schlagen. Dort rückt ein Elektron aus einer höheren Schale nach und gibt die Energiedifferenz als Photon mit charakteristischer Wellenlänge ab.

**2.34 Beschreiben Sie das Funktionsprinzip der Computertomographie**

Das abzubildende Objekt wird von einer Röntgenröhre durchleuchtet und das Signal von einem Detektor aufgezeichnet. Der Intensitätsverlust hängt von dem Absorptionsvermögen des Gewebes ab, am Detektor entsteht eine Projektion des Volumens auf eine Fläche. Das Objekt wird von mehreren Seiten durchleuchtet, sodass es in Volumenelemente (Voxel) unterteilt werden kann, für die aus den Daten jeweils ein Schwächungskoeffizient berechnet wird. Daraus lässt sich ein Bild errechnen.

### **2.35 Was versteht man unter Nuklearmedizin? Beschreiben Sie eine Schilddrüsenuntersuchung. (3-4 Sätze)**

Als Nuklearmedizin wird die Anwendung von Radionukliden zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken bezeichnet. Zur Schilddrüsenuntersuchung werden Radionuklide wie Tc-99m verwendet. Diese werden dem Patienten injiziert und reichern sich in der Schilddrüse an. Tc-99m geht unter Aussendung eines Gammaquants von metastabilen in den stabilen Zustand über, diese Photonen werden von einer Gammakamera aufgezeichnet. Dadurch lässt sich die Aktivitätsverteilung in der Schilddrüse darstellen, anhand welcher die Schilddrüsenfunktion beurteilt werden kann.

### **2.36 Was sind Ganzkörperzähler und wann und warum werden diese eingesetzt?**

Ganzkörperzähler erlauben eine räumliche und zeitliche Darstellung der Aktivitätsverteilung im gesamten Körper. Sie verfügen über ein Auflösungsvermögen von etwa einem cm und werden häufig im Strahlenschutz eingesetzt. Durch sie lässt sich die Inkorporation von radioaktiven Stoffen gut feststellen, was für Personen, die mit offenen Quellen arbeiten, oder auch nach Strahlenunfällen enorm wichtig ist.

### **2.37 Nennen Sie die Teilbereiche der Strahlentherapie. Wie unterscheiden sich diese? (3-4 Sätze)**

Man unterscheidet die Brachstherapie, konventionelle Strahlentherapie (mit Photonen) und Protonen- bzw. Ionentherapie. In der Brachytherapie kommen umschlossene radioaktive Quellen zur Anwendung, die an oder in den Tumor gebracht werden. In der Regel werden hier Alpha- oder Betastrahler verwendet, die eine geringe Strahlungsreichweite aufweisen. In der Teletherapie wird aus einem Abstand von etwa einem Meter mit Bremsstrahlung (LINAC) oder Co-60-Strahlung gearbeitet. Im Vergleich zu Photonen weisen Protonen und Kohlenstoffionen eine deutlich bessere Dosisverteilung im Körper auf. Hier wird der Bragg-Peak ausgenutzt, um gesundes Gewebe zu schonen.

### **2.38 Wie werden Tumoren unterschieden? Nennen Sie je ein Beispiel.**

Tumore können nach Gut- (zB Lipome) oder Bösartigkeit unterschieden werden. Letztere werden auch als Krebs bezeichnet und können weiter in Karzinome (zB Mammakarzinome, Prostatakarzinome), Sarkome (Bindegewebe) und Leukämie (Blutkrebs) unterteilt werden.

### **2.39 Welche sind die häufigsten Tumoren in Österreich? Nennen sie Beispiele und unterscheiden Sie nach dem Geschlecht.**

Die häufigsten Tumore bei Männern sind:

- Prostatakarzinom (26%)
- 'Andere Tumore' (21%)
- Lunge (12%)
- Darm (11%)

Frauen:

- Brust (29%)
- 'Andere Tumore' (23%)
- Lunge (11%)
- Darm (10%)

Achtung: Die Zahlen auf den Folien sind veraltet (2009), die hier angeführten sind aus 2019.

### **2.40 Was versteht man unter Brachytherapie und welche Geräte werden dazu verwende?**

Als Brachytherapie wird die Anwendung umschlossener radioaktiver Quellen, häufig Betastrahler, zur Krebstherapie bezeichnet. Die Quellen können an der Körperoberfläche angebracht oder in Form von Nadeln in den Tumor eingeführt werden. Für viele Tumore werden sogenannte Afterloadinganlagen eingesetzt. Dabei handelt es sich um Geräte, die vor der eigentlichen Therapie einen leeren, Röhrenförmigen Applikator in das Zielvolumen schieben. Dessen Lage wird kontrolliert, und erst danach wird der Applikator mit dem radioaktiven Präparat gefüllt. Diese Automatisierung hat auch den Vorteil, dass die Strahlenbelastung für des medizinische Personal geringer ist.

### **2.41 Was versteht man unter Teletherapie und welche Ge- räte werden dazu verwende?**

Im Gegensatz zur Brachytherapie wird bei der Teletherapie der Tumor aus der Ferne behandelt. Dabei werden Photonen- oder Teilchenstrahlen aus einer Quelle auf den Tumor geschossen. Bei diesen Quellen kann es sich, im Falle von Photonenstrahlung, um LINACs oder Co-60-Quellen, oder im Falle von Proto-



nen/Ionen um Zyklotrone oder Synchotrone handeln.

## 2.42 Wie funktioniert ein LINAC? (3-4 Sätze)

Es handelt sich um einen Linearbeschleuniger, der mithilfe von Wechselspannung geladene Teilchen in gerader Linie beschleunigt. In der Photonentherapie werden damit Elektronen auf ein Target beschleunigt und die entstehende Bremsstrahlung wird für die Therapie genutzt. LINACs werden außerdem als Vorbeschleuniger für größere Anlagen wie Synchotrons verwendet.

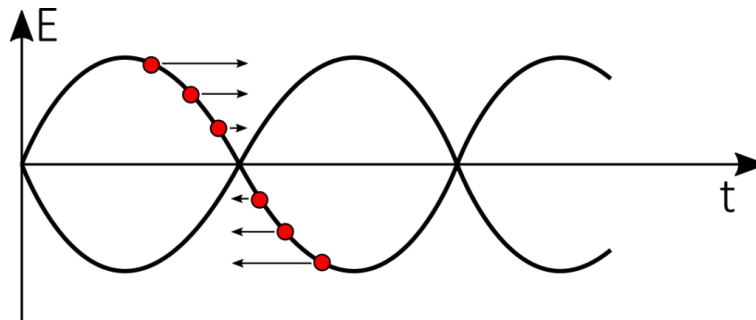


Abbildung 8: Prinzip der Elektronenbeschleunigung mit einer stehenden Welle. Elektronen an unterschiedlichen Positionen werden unterschiedlich stark beschleunigt, sodass Teilchenpakete entstehen.

Die Elektronen werden beschleunigt, indem sich in einem mit Wechselspannung betriebenen Resonator eine stehende Welle ausbildet. Dadurch werden die Elektronen zu Teilchenpaketen geformt und in Richtung des Targets beschleunigt.

## 2.43 Welche Aufgaben hat das technische Personal in einer Strahlentherapie? (3-4 Sätze)

Physikern in der Strahlentherapie kommen drei Hauptaufgaben zu:

- Erstellung der Bestrahlungspläne mit geeigneten Computerprogrammen und in Abstimmung mit dem medizinischen Personal
- Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung durch regelmäßige Messungen mit Phantomen und Detektoren wie Ionisationskammern
- Aufgaben im Bereich des Strahlenschutzes

#### **2.44 Was unterscheidet eine konventionelle Strahlentherapie von einer Therapie mit Protonen oder Kohlenstoffionen (3-4 Sätze)**

Bei konventioneller Strahlentherapie mit Photonen nimmt die im Gewebe deponierte Energie näherungsweise linear mit der Eindringtiefe ab. Dadurch wird auch das den Tumor umgebende, gesunde Gewebe geschädigt. Geladene Teilchen geben den Großteil ihrer Energie ab, kurz bevor sie zum Stillstand kommen, dieses Phänomen wird Bragg-Peak genannt. In der Strahlentherapie kann dadurch ein Großteil der Dosis im Tumor deponiert werden, während das umliegende Gewebe geschont wird.

#### **2.45 Beschreiben Sie einen elektrostatischen Beschleuniger. (3-4 Sätze)**

Ein elektrostatische Beschleuniger weist eine zeitlich konstante Spannungsdifferenz auf. Im einfachsten Fall bestehen sie aus einer Glühkathode, aus der Elektronen austreten und durch das elektrische Feld zur Anode hin beschleunigt werden. Spannungen bis zu 300 kV sind möglich, darüber müssen spezielle Geometrien eingesetzt werden um Überschläge zu vermeiden.

#### **2.46 Beschreiben Sie die Funktionsweise eines Van de Graaf Beschleunigers.**

Ein van-de-Graaf-Beschleuniger ist ein Teilchenbeschleuniger, dessen Spannungserzeuger nach dem Prinzip eines van-de-Graaf-Generators arbeitet. Die erhaltene Hochspannung wird durch eine Widerstandskette so auf mehrere Potenzialringe aufgeteilt, dass eine konstante Beschleunigung gewährleistet ist. Die maximal mögliche Spannung wird durch die Durchschlagsfestigkeit des umgebenden Mediums begrenzt. Um diese zu optimieren, werden oft gasgefüllte Druckbehälter eingesetzt.

#### **2.47 Nennen Sie 2 periodische Beschleuniger und beschreiben Sie einen genauer. (3-4 Sätze)**

Periodische Beschleuniger sind beispielsweise Synchrotrons und Zyklotrons. Ein Zyklotron besteht aus zwei flachen, hohlen Halbzylindern, zwischen denen eine hochfrequente Beschleunigungsspannung anliegt. Senkrecht auf die Zylinder steht ein homogenes Magnetfeld. Die geladenen Teilchen werden zwischen den beiden Halbzylindern beschleunigt und vom Magnetfeld innerhalb der Zylinder durch die Lorentzkraft auf einer Kreisbahn gehalten. Ist die Energie des Teilchens groß genug, wird es durch eine Ablenkelektrode aus dem Zyklotron geleitet und auf das Target geschossen. Zyklotrone können beispielsweise in der Protonentherapie oder zur Produktion von Radionukliden verwendet werden.

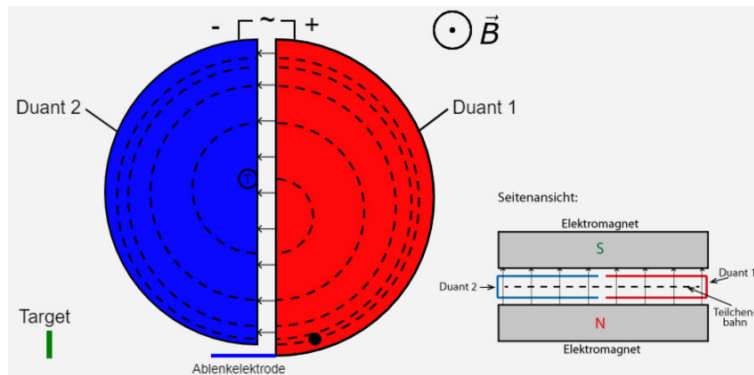


Abbildung 9: Schema eines Zyklotrons.

## 2.48 Wie funktioniert ein Zyklotron? Aufbau und Beschreibung

Ein Zyklotron besteht aus zwei flachen, hohlen Halbzylindern, zwischen denen eine hochfrequente Beschleunigungsspannung anliegt. Senkrecht auf die Zylinder steht ein homogenes Magnetfeld. Die geladenen Teilchen werden zwischen den beiden Halbzylindern beschleunigt und vom Magnetfeld innerhalb der Zylinder durch die Lorentzkraft auf einer Kreisbahn gehalten. Ist die Energie des Teilchens groß genug, wird es durch eine Ablenkelektrode aus dem Zyklotron geleitet und auf das Target geschossen. Zyklotrone können beispielsweise in der Protonentherapie oder zur Produktion von Radionukliden verwendet werden.

## 2.49 Wie funktioniert ein Synchrotron? Aufbau und Beschreibung

Ein Synchrotron ist ein Kreisbeschleuniger, der sich aus geradlinigen Beschleunigungsstrecken, Ablenk- und Fokussierungsmagneten zusammensetzt. Für die Beschleunigungsstrecken werden Hohlraumresonatoren mit hochfrequenten Wechselfeldern, ähnlich wie bei LINACs, verwendet. Dies hat zur Folge, dass sich auch in Synchotrons Teilchenpakete bilden. Die Ablenkmagnete sorgen dafür, dass die Teilchen in jedem Umlauf auf ihrer Bahn bleiben, da mit jedem Umlauf die kinetische Energie der Teilchen steigt, muss auch die Feldstärke der Ablenkmagneten proportional dazu wachsen. Die Fokussierungsmagneten sorgen dafür, dass die Teilchenpakete nicht auseinander getrieben werden.

## 2.50 Was versteht man unter einer Synchrotronstrahlung und welche Vor- bzw Nachteile hat sie?

Synchrotronstrahlung entsteht, wenn (relativistische) Teilchen aus einer geraden Bahn abgelenkt werden. Diese Richtungsänderung entspricht physikalisch einer

Beschleunigung, damit handelt es sich also um eine besondere Form der Bremsstrahlung. Synchrotronstrahlung wird immer tangential zur Bewegungsrichtung der Teilchen abgegeben. Aufgrund ihrer hohen Brillanz und Intensität wird sie häufig zur Strukturaufklärung verwendet, zudem lässt sie sich gepulst erzeugen. Da zu ihrer Erzeugung ein Synchrotron gebraucht wird, ist sie allerdings sehr kosten- und energieintensiv.

### **2.51 Nennen Sie 3 Anwendungsgebiete von Beschleunigern und beschreiben Sie eines näher. (3-4 Sätze)**

Beschleuniger werden zur Herstellung von Radionukliden, zur Bestrahlung von Lebensmitteln und in der Krebstherapie eingesetzt. Protonentherapie ist auch mit Zyklotrons möglich, für schwerere Ionen wie Kohlenstoff werden Synchrotrons benötigt. Die Protonen-/ Ionentherapie zeigt im Vergleich zu herkömmlicher Strahlentherapie ein deutlich günstigeres Tiefendosisverhalten, was zu weniger Nebenwirkungen der Behandlung führen soll. In Wiener Neustadt werden am MedAustron seit einigen Jahren Patienten mit Protonen und Kohlenstoffionen behandelt.

### **2.52 Was besagt das RADURA Symbol? Können sie dieses auf österreichischen Produkten finden? Ja / Nein? Warum / Warum nicht?**

Das RADURA-Symbol zeigt an, dass ein Lebensmittel durch Bestrahlung behandelt wurde. Dies wird aus Gründen der Haltbarkeit, zur Vermeidung von Schimmelpilzen, oder um gezielt Konsumentenfreundliche Produkte zu 'züchten' eingesetzt. In Österreich ist die Bestrahlung von Lebensmitteln mit wenigen Ausnahmen (wie Gewürzen) verboten.

### **2.53 Wer gilt als Entdecker/Entdeckerin der Kernspaltung und wie funktioniert diese?**

Otto Hahn, Fritz Strassman und Lise Meitner entdeckten die Kernfusion, jedoch erhielten nur Hahn und Strassman den Nobelpreis, obwohl Meitner die theoretische Erklärung dazu lieferte.

Bei der Kernspaltung wird ein Neutron auf einen instabilen Uran-235-Kern geschossen. Dadurch entsteht sehr kurzlebiges Uran-236, welches in kleinere Kerne zerfällt- Hierbei wird zusätzlich eine enorme Menge an Energie, sowie weitere Neutronen frei. Diese Neutronen können ihrerseits wieder Urankerne treffen und eine Kettenreaktion auslösen.

### **2.54 Worin liegt der Unterschied zwischen Fusion und Fission?**

Fission bezeichnet die Spaltung eines Kerns, aus einem großen Kern entstehen mehrere kleine Kerne und Spaltfragmente, wobei Energie frei wird. Fusion bezeichnet die Vereinigung von zwei Kernen zu einem größeren Kern. Ist die Masse des bei der Fusion entstandenen Kerns geringer als die Summe der Ausgangskerne, so wird diese Massendifferenz in Form von Energie freigesetzt.

### **2.55 Auf welchen Bodenschatz muss man zurückgreifen, um eine Kernspaltung durchführen zu können und wo wird dieser am häufigsten abgebaut?**

Für Kernspaltungen braucht man Uran, dieses wird am häufigsten in Kasachstan (40%), Kanada (22%) und Australien (10%) abgebaut.

### **2.56 1kg Uran entspricht... welcher Energiemenge einer anderen Ressource? Nennen Sie zumindest 2 Alternativen und deren Problematik im Einsatz.**

1 kg Uran entspricht in seiner Energiedichte 80 000 kg Kohle oder 66 000 l Erdöl. Uran weist eine Treibhausgasbilanz von 20 g CO<sub>2</sub>/kWh auf. Im Vergleich dazu werden pro Kilowattstunde Kohlestrom 950 g CO<sub>2</sub> und im Falle von Erdöl 800 g CO<sub>2</sub> freigesetzt.

### **2.57 In welchen Regionen, global gesehen, finden sich die meisten Kernreaktoren? Worauf führen Sie das zurück?**

Die meisten Reaktoren finden sich in den USA und im asiatischen Raum (China, Japan). Die USA nahmen seit der Entdeckung der Kernspaltung eine Vorreiterrolle in deren Erforschung ein, sowohl in militärischer, als auch in ziviler Nutzung. Nach Ende des zweiten Weltkriegs wurde dafür eine eigene United States Atomic Energy Commission' gegründet. Die Forschung war in erster Linie militärisch orientiert, deren Ergebnisse wurden dann für die zivile Nutzung übernommen. Beispielsweise wurde das erste atomgetriebene U-Boot (1954) vor dem ersten Kernkraftwerk (1957) in Betrieb genommen. Im Falle Chinas ist zu vermuten, dass sie ihren durch den Wirtschaftsaufschwung enormen Energiebedarf durch Atomkraft zu decken versuchen.

### **2.58 Welche Einsatzgebiete haben Forschungsreaktoren? Beschreiben Sie ein Einsatzgebiet näher (3-4 Sätze).**

Bei Forschungsreaktoren wird nicht die bei der Kernspaltung erzeugte Energie, sondern die entstehende Neutronenstrahlung genutzt. Diese wird beispielsweise

für Forschung in den Bereichen Neutronenphysik oder Radiochemie verwendet. Zudem werden Forschungsreaktoren oft für Ausbildungszwecke genutzt. Der TRIGA-Reaktor des Atom Instituts ist bekannt für die dort durchgeführten Experimente zur Neutroneninterferometrie. Die Neutronen werden mit vier verschiedenen Strahlrohren aus dem Reaktor ausgeleitet und für verschiedene Experimente verwendet. Helmut Rauch konnte hier 1974 erstmals den Wellencharakter von Neutronen mithilfe eines Interferometers beweisen.

**2.59 Der natürliche Reaktor von Oklo in Gabun/Westafrika wurde warum entdeckt? Wie funktionierte dieser natürliche Reaktor? (3-4 Sätze)**

1972 wurde bei Messungen festgestellt, dass der Uran-235-Gehalt in dem Erzvorkommen zu niedrig war. Vor 1,8 Milliarden Jahren war dieser allerdings hoch genug, dass damals eine Kettenreaktion möglich war. Dieses Uranvorkommen verfügte über einen natürlichen Zufluss an Grundwasser, welches als Moderator diente. Ohne ein Moderatormaterial hätte keine Kritikalität erreicht werden können.

**2.60 Beschreiben Sie den Reaktorunfall von Tschernobyl. (3-4 Sätze)**

Im Reaktor sollte ein Experiment durchgeführt werden, das einen kompletten Stromausfall simulieren sollte. Dazu wurden die Notfallkühlsysteme unter Missachtung der Sicherheitsvorschriften abgeschaltet. Die Reaktorleistung wurde heruntergefahren, wobei sich das neutronenabsorbierende Element Xenon im Reaktor ansammelte. Als die Leistung wieder angehoben werden sollte, sorgte diese Xenonvergiftung dafür, dass der Reaktor nur 6 % der Nennleistung lieferte, ein Betrieb unter 20 % der Nennleistung galt bei diesem Reaktortyp allerdings als nicht sicher. Auf dadurch auftretende Probleme wurde mit einer Notabschaltung reagiert, das Einfahren der Graphitblöcke erhöhte jedoch kurzzeitig die Reaktivität, sodass der Reaktor überkritisch wurde und explodierte.

**2.61 Was versteht man unter einem Containment und warum wurde an der Nuklearanlage von Tschernobyl kein Containment angebracht?**

Als Containment wird die gasdichte und druckfeste Umhüllung eines Kernreaktors und dessen Nebenanlagen bezeichnet. Dieser Reaktortyp wurde ursprünglich zur Produktion von (waffenfähigem) Plutonium gebaut. Um das Plutonium zu gewinnen, müssen die Brennstäbe bei laufendem Betrieb gewechselt werden. Aus diesem Grund verzichtete man auf ein störendes Containment.

## 2.62 Was besagt die INES Skala und wie ist sie aufgebaut?

Die INES-Skala beschreibt, wie schwerwiegend Zwischenfälle in einem Atomkraftwerk sind.

Stufe	Beschreibung
0	Abweichung
1	Störung
2	Störfall
3	Ernster Störfall
4	Unfall
5	Ernster Unfall
6	Schwerer Unfall
7	Katastrophaler Unfall

Tabelle 4: Caption

## 2.63 Welche Maßnahmen hätte es gebraucht, dass Fukushima nicht zu einer nuklearen Katastrophe geführt hätte? (3-4 Sätze)

In der Planungsphase wurden teilweise Entwürfe, die für US-Standorte ausgelegt waren übernommen, ohne sie an die Erdbebe- und Tsunami-Gefahr in Japan anzupassen. Die Kühlsysteme wurden nur für Erdbeben von maximal der Stärke 8 ausgelegt. Am Bauplatz war ursprünglich eine 35 Meter hohe Klippe vorhanden, diese wurde allerdings aus Kostengründen abgetragen. Die Notstromgeneratoren waren zudem nicht ausreichend wassergeschützt.

## 2.64 Das Atominstitut verfügt über einen Forschungsreaktor. Nennen Sie 2 Gründe, warum dieser in Wien, im Zentrum einer Großstadt, steht.

Die IAEA hat ihren Hauptsitz in Wien, am TRIGA-Reaktor werden regelmäßig die Inspektoren ausgebildet. Zudem bietet der Reaktor in Kombination mit der Universität die Möglichkeit der Forschung in Fragen der Strahlensicherheit.

## 2.65 Warum muss sich der Staat Österreich keine Sorgen bezüglich einer Endlagerung von Brennelementen auf österreichischem Staatsgebiet machen?

Die Brennelemente sind nur gemietet und werden nach Ende der Nutzungsdauer in die USA zurückgegeben.

**2.66 Welcher radioaktive Abfall fällt in Österreich an und wo wird dieser zwischen-gelagert?**

Hauptsächlich fällt Abfall aus medizinischen und industriellen Anwendungen an. In der Medizin entsteht beispielsweise in der Diagnostik und der Strahlentherapie radioaktiver Abfall, in der Industrie werden Strahlenquellen beispielsweise in der Materialprüfung angewendet. Der gesamte radioaktive Abfall wird in Seibersdorf gelagert.

**2.67 Nennen Sie 3 weiterführende Lehrveranstaltungen zur Thematik der ionisierenden Strahlung**

- Strahlenphysik VO
- Strahlenphysikalische Methoden in der Medizin VO
- Strahlenphysikalische Anwendungen in Medizin und Technik SE
- Functional Imaging VO
- Einführung in die medizinphysikalischen Grundlagen der Ionentherapie VO

**2.68 Soll eine Technische Universität Wissen auf Basis der Grundlagenforschung und/oder der angewandten Forschung vermitteln. Begründen Sie Ihre Meinung in 3-4 Sätzen.**

Beides ist notwendig. Große Teile der angewandten Forschung wären ohne (teils lange zurückliegende) Grundlagenforschung nicht möglich. Ohne beispielsweise die Forschung von Marie Curie an medizinischen Einsatzmöglichkeiten von Strahlung würde man heute vielleicht keine angewandte Medizinphysik betreiben können. In der Wissenschaftskommunikation gegenüber der Öffentlichkeit ist es sicherlich leichter, die Sinnhaftigkeit angewandter Forschung zu erklären, da ihre Ergebnisse direkter sichtbar sind. Das bedeutet aber nicht, dass nicht beides notwendig ist.

**2.69 Welchen Sinn sehen Sie in der Absolvierung einer LV zum Thema Technik für Menschen im Bac und/oder im Master-Studium?**

ECTS