

Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Ionenstrahltherapie
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Quantenphysik und Materie ♦ Quantenobjekte ♦ Zusammenhänge der Größen Energie, Impuls, Frequenz und Wellenlänge zur Beschreibung von Quantenobjekten ♦ Grundlegende Aspekte der Quantentheorie: Stochastische Vorhersagbarkeit, Interferenz und Superposition, Determiniertheit der Zufallsverteilung, Komplementarität
Materialien	♦ M 1 Absorption von γ-Strahlung in Materie ♦ M 2 Energie- und Winkelverteilung nach der Wechselwirkung schwerer Teilchen mit Materie ♦ M 3 Wirkung von Ionenstrahlen und Röntgenstrahlen auf einen Tumor
Quellenangaben	♦ M 3, Abb. 4: In Anlehnung an Konitzer, F. (2019). <i>Die modernste Art der Strahlentherapie</i>. Welt der Physik. Verfügbar unter: https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/tumorthherapie/die-modernste-art-der-strahlentherapie/ (Zugriff am 21.12.2020) (geringfügig überarbeitet). ♦ Alle weiteren Materialien und Abbildungen wurden im Auftrag des IQB erstellt.
Hilfsmittel	♦ Wissenschaftlicher Taschenrechner ♦ Formelsammlung
zusätzliche inhaltliche und methodische Voraussetzungen	♦ Bei der Zuweisung der Anforderungsbereiche dieser Prüfungsaufgabe ist vorausgesetzt, dass alle Diagramme unbekannt sind. ♦ Von den im M 1 verwendeten Prozessen sollte mindestens einer der Prozesse Fotoeffekt oder Compton-Effekt ausführlich im Unterricht behandelt worden sein. ♦ Die Prüflinge sollten darüber hinaus mit dem Basiskonzept „Zufall und Determiniertheit“ vertraut sein. ♦ Die Prüflinge sollten mit der Beurteilung von der Vertrauenswürdigkeit von Quellen vertraut sein (siehe Lernaufgabe: Makuladegeneration).
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: -

1 Aufgabe

Ionenstrahltherapie

Bei der Tumorbekämpfung werden in der Medizin herkömmlich häufig sowohl energiereiche elektromagnetische γ -Strahlung als auch hochenergetische Elektronenstrahlen eingesetzt. Dabei ist das Absorptionsverhalten im menschlichen Gewebe von besonderer Bedeutung. Bei der Ionenstrahltherapie geht es darum einen Tumor durch Beschuss mit schweren Ionen zu zerstören. Im Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) beispielsweise werden schwere Ionen auf 75 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und schließlich auf den Tumor geschossen.

	BE
1 Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie	
a Bei der Bestrahlung von menschlichem Gewebe mit γ-Strahlung kann es u.a. zum Fotoeffekt und zum Compton-Effekt kommen. Erläutern Sie einen der beiden Prozesse im dargelegten Sachzusammenhang, auch mit Hilfe einer Skizze. Gehen Sie dabei darauf ein, inwiefern dieser Prozess zu den Absorptionsprozessen bei Bestrahlung mit γ-Strahlung gezählt werden kann.	6
b Ein Photon mit einer Energie von 1 MeV trifft auf einen Bleiblock. Entscheiden Sie mithilfe von M 1, ob die folgenden Aussagen korrekt sind. Begründen Sie ihre Entscheidung jeweils. ♦ Das Photon wird mit einer größeren Wahrscheinlichkeit absorbiert als wenn es eine Energie von 5 MeV hätte. ♦ Es findet eine Absorption durch den Compton-Effekt statt.	5
c Bestimmen Sie durch Rechnung und mithilfe von Abb. 1 den Gesamt-Absorptionskoeffizienten für Photonen der Wellenlänge $\lambda = 25 \text{ pm}$, die auf einen Bleiblock der Dicke 2 cm treffen. Berechnen Sie anschließend, wie viel Prozent der auftreffenden Photonen etwa absorbiert werden.	5
2 Wechselwirkung eines Ionenstrahls mit Materie	
a Interpretieren Sie die beiden Diagramme in M 2 zum Durchlauf eines Strahls schwerer Teilchen durch einen Materie-Block.	5
b Gehen Sie nun davon aus, dass ein Strahl leichter Teilchen mit der gleichen Teilchenenergie E den gleichen Materie-Block durchläuft. Stellen Sie für diese leichten Teilchen im Vergleich zu den schweren Teilchen zwei begründete Hypothesen bezüglich der Teilchenenergie nach der Wechselwirkung auf. Beschreiben Sie den Versuchsaufbau eines Experiments, mit dem Sie eine ihrer Hypothesen (auch, wenn Sie sie nicht begründen konnten) überprüfen können.	7

3 Tumorbekämpfung durch Bestrahlung mit Röntgen- oder Ionenstrahlung

Die Abb. 4 aus M 3 zeigt den Dosisverlauf für die Bestrahlung mit Röntgenstrahlung und Schwerionenstrahlung in Wasser, der dem in biologischem Gewebe ähnelt.

- a Beurteilen Sie die fachliche Richtigkeit der folgenden Aussage zur Tumorbekämpfung durch Röntgen- bzw. Ionenstrahlung mit Bezug zur Abb. 4 aus M 3.

5

Die Röntgenstrahlung gibt die meiste Energie an das Gewebe in der Nähe der Oberfläche ab, wohingegen die Schwerionen erst in einer höheren Eindringtiefe sehr lokal einen größeren Energiebetrag abgeben. Mit Schwerionen kann also eine größere Energiemenge lokal an den Tumor abgegeben werden, ohne dass das umliegende Gewebe unnötig belastet wird. Schwerionen ermöglichen folglich generell eine größere maximale Energieabgabe als Röntgenstrahlung am Tumor. Die Heilungschancen steigen dadurch deutlich. Der Einsatz der Röntgenstrahlung eignet sich besonders, um z.B. im umliegenden Gewebe gestreute Krebszellen zu behandeln und die Schwerionen eher, wenn der Tumor in der Nähe von sehr empfindlichen Bereichen (wie z.B. dem Sehnerv) liegt. Man sollte auf jeden Fall eine Behandlung mit Ionenstrahlung bevorzugen, egal wie lange man warten muss!

- b Beurteilen Sie die Güte des durchgeführten Bewertungsprozesses.

7

2 Material

Material 1

Absorption von γ -Strahlung in Materie

γ -Strahlung besteht aus einzelnen Photonen. Lenkt man Photonen z. B. auf einen Bleiblock, so wird ein Teil der Photonen durch die Bleiatome absorbiert, der Rest durchdringt den Bleiblock. Je dicker dabei der Bleiblock ist, desto geringer ist der Anteil der hindurch gelangenden Photonen.

Treffen allgemein N_0 Photonen auf einen Materie-Block der Dicke x , so gilt für die Anzahl $N(x)$ an Photonen, die den Materie-Block durchdringen:

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-kx}$$

wobei k der sogenannte Absorptionskoeffizient ist. Dieser gibt an, wie stark die verwendeten Photonen durch das Material absorbiert werden.

Abbildung 1 zeigt diejenigen Prozesse, die maßgeblich zur Photonen-Absorption beitragen. Es sind sowohl die Absorptionskoeffizienten für die einzelnen Prozesse als auch der Gesamt-Absorptionskoeffizient für Blei in Abhängigkeit der Energie der verwendeten Photonen dargestellt.

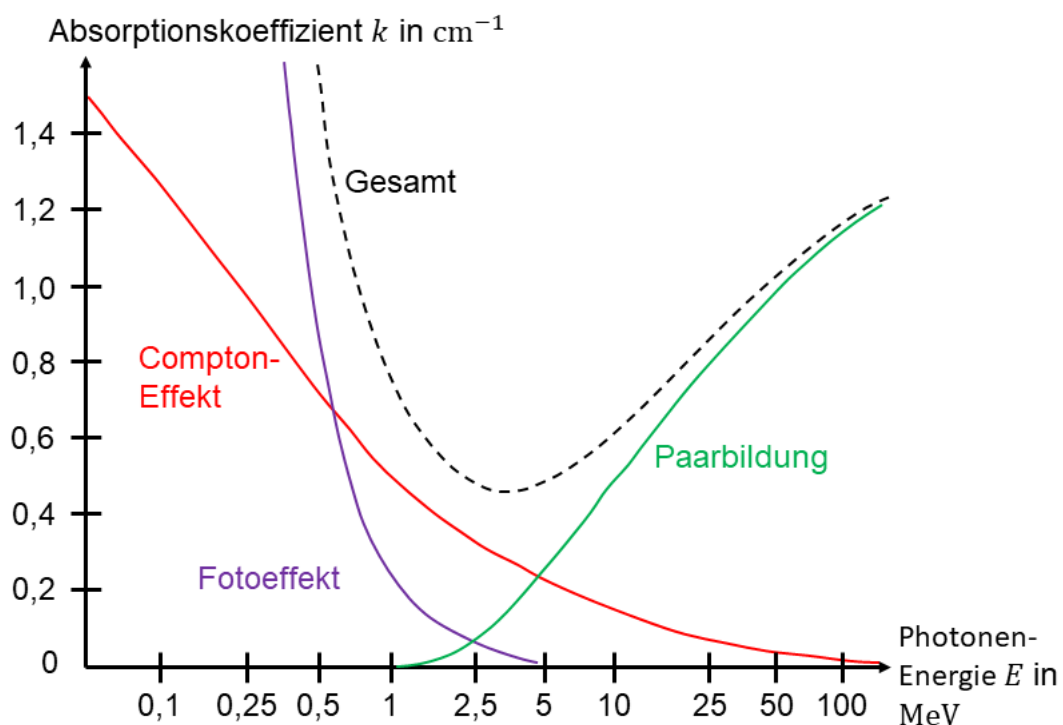


Abb. 1: Absorptionskoeffizienten der einzelnen Prozesse der Photonen-Absorption in Abhängigkeit von der Photonenenergie, IQB

Material 2

Energie- und Winkelverteilung nach der Wechselwirkung schwerer Teilchen mit Materie

Die beiden Diagramme sind für Teilchen gültig, die eine im Vergleich zu einem Elektron sehr große Masse aufweisen. Sie zeigen die Häufigkeitsverteilungen der detektierten Teilchen nach der Wechselwirkung mit der Materie in Abhängigkeit von deren Energie nach der Wechselwirkung (Abb. 2) und in Abhängigkeit vom Ablenkungswinkel (Abb. 3).

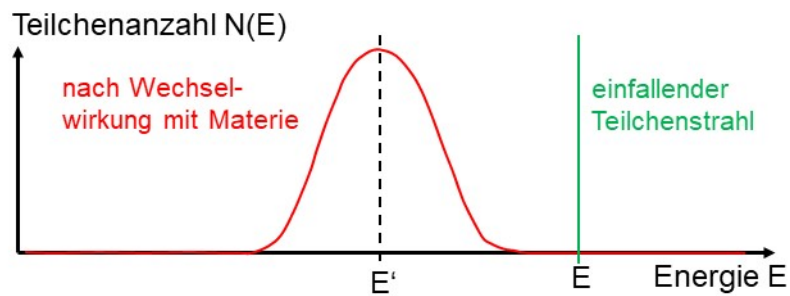


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Energie, IQB

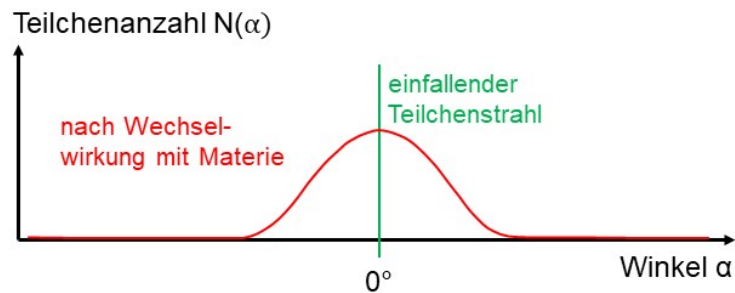


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Ablenkungswinkel, IQB

Material 3

Wirkung von Ionenstrahlen und Röntgenstrahlen auf einen Tumor

Um eine Tumorzelle zu zerstören, ist eine gewisse Energieabgabe an die Zelle nötig. Im Diagramm unten ist die relative Energiedosis in bestrahltem Wasser in Abhängigkeit von der Eindringtiefe dargestellt. Die Energiedosis entspricht der absorbierten Energie im Verhältnis zur absorbierenden Masse. Die relative Energiedosis ist das Verhältnis der Energiedosis in einer bestimmten Wassertiefe zur entsprechenden maximalen Energiedosis (hier in Prozent).

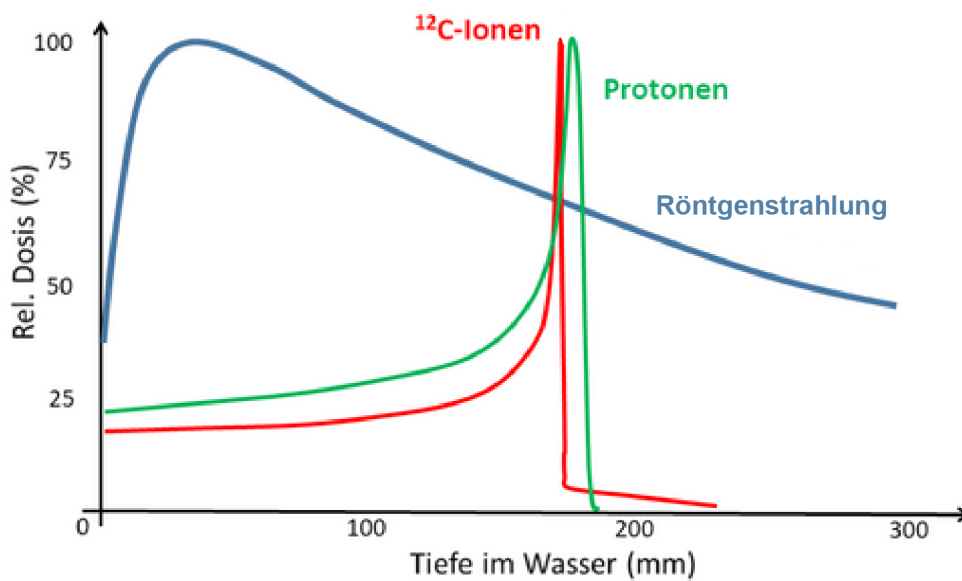
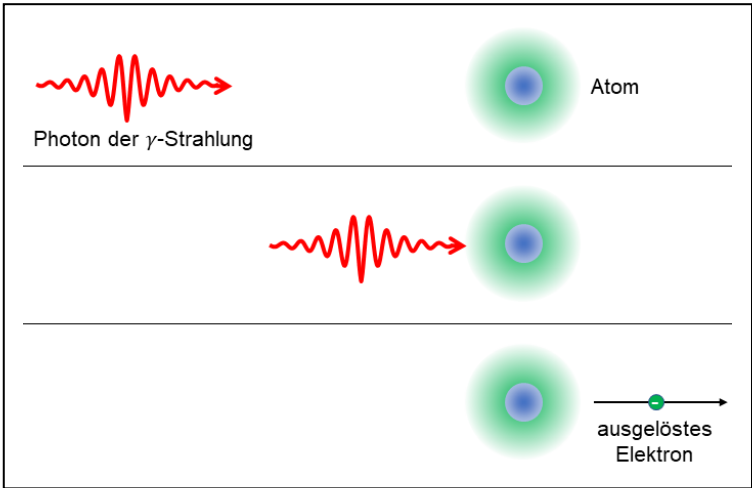


Abb. 4: relative Energiedosis in Abhängigkeit von der Eindringtiefe, in Anlehnung an Konitzer, 2019.

3 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	a	Bei der Bestrahlung von menschlichem Gewebe mit γ-Strahlung kann es u.a. zum Fotoeffekt und zum Compton-Effekt kommen. Erläutern Sie einen der beiden Prozesse im dargelegten Sachzusammenhang, auch mit Hilfe einer Skizze. Gehen Sie dabei darauf ein, inwiefern dieser Prozess zu den Absorptionsprozessen bei Bestrahlung mit γ-Strahlung gezählt werden kann. Die Lernenden ... S 1 Die Lernenden erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien. <i>Exemplarische Lösung bei Auswahl des Fotoeffektes:</i> Beim Fotoeffekt trifft elektromagnetische Strahlung (hier γ-Strahlung) auf Materie (hier der menschliche Körper). Hat ein Photon, das auf ein Atom trifft, eine genügend hohe Energie, so kann es ein Elektron auslösen. Diese Mindestenergie des Photons hängt von Material, also von der Art des getroffenen Atoms, ab. Ist der Energiebetrag des Photons höher als zur Auslösung eines Elektrons erforderlich, so wird das ausgelöste Elektron zusätzlich beschleunigt. Skizze:  Das Photon der γ-Strahlung hat seine Energie bei diesem Prozess vollständig an das Elektron abgegeben. Insofern kann man sagen, dass es vollständig von der Materie absorbiert wurde.		
		3		
		2		
		1		

b	Ein Photon mit einer Energie von 1 MeV trifft auf einen Bleiblock. Entscheiden Sie mithilfe von M 1, ob die folgenden Aussagen korrekt sind. Begründen Sie ihre Entscheidung jeweils. ♦ Das Photon wird mit einer größeren Wahrscheinlichkeit absorbiert als wenn es eine Energie von 5 MeV hätte. ♦ Es findet eine Absorption durch den Compton-Effekt statt. Die Lernenden ... K 3 entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder. Aussage (1) ist richtig, denn mit der gestrichelten Kurve für den Gesamt-Absorptionskoeffizienten erhält man die Absorptionskoeffizienten $k \approx 0,5 \text{ cm}^{-1}$ für 5 MeV und $k \approx 0,9 \text{ cm}^{-1}$ für 1 MeV. Ein höherer Absorptionskoeffizient bedeutet eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Absorption des Photons. Aussage (2) ist so nicht richtig, man müsste sprachlich den Konjunktiv verwenden. Für Photonen der Energie 1 MeV können sowohl Compton-Effekt als auch Fotoeffekt stattfinden. Für die Energie von 1 MeV kann man im Diagramm den Absorptionskoeffizienten $k \approx 0,25 \text{ cm}^{-1}$ für den Fotoeffekt und $k \approx 0,5 \text{ cm}^{-1}$ für den Compton-Effekt ablesen. Für ein einzelnes Photon kann man keine Vorhersage über den Prozess, den es auslöst, machen. Da der Absorptionskoeffizient für den Compton-Effekt höher ist, ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das auftreffende Photon den Compton-Effekt auslöst, höher. Da die jeder einzelne Absorptionsprozess aber dem Zufall unterliegt, könnte genauso gut der Fotoeffekt eintreten.		2	
c	Bestimmen Sie durch Rechnung und mithilfe von Abb. 1 den Gesamt-Absorptionskoeffizienten für Photonen der Wellenlänge $\lambda = 25 \text{ pm}$, die auf einen Bleiblock der Dicke 2 cm treffen. Berechnen Sie anschließend, wie viel Prozent der auftreffenden Photonen etwa absorbiert werden. Die Lernenden ... S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. Bestimmung der Photonenenergie: Aus $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ und $\lambda = 0,25 \text{ pm}$ folgt: $E \approx 7,95 \cdot 10^{-13} \text{ J} \approx 5 \text{ MeV}$ Für den Gesamt-Absorptionskoeffizienten gilt bei dieser Energie (aus Aufgabe c) oder Diagramm): $k \approx 0,5 \text{ cm}^{-1}$		2	1

[illegible]

		E 5 planen geeignete Experimente und Auswertungen zur Untersuchung einer physikalischen Fragestellung. Mögliche Hypothesen (mit Begründungen): ♦ Die mittlere Energie der leichten Teilchen nach der Wechselwirkung ist höher als die mittlere Energie der schweren Teilchen nach der Wechselwirkung (E' näher an E). Begründung: Leichte Teilchen sind kleiner als schwere Teilchen. Daher wechselwirken kleine Teilchen weniger stark/statistisch weniger oft mit den Atomen des Materie-Blocks. ♦ Die Verteilung der Energien der leichten Teilchen nach der Wechselwirkung ist wie bei den schweren Teilchen symmetrisch zur mittleren Energie E'. Begründung: Die Streuung der Energien sollte aufgrund des stochastischen Charakters einer Wechselwirkung unabhängig von der Masse der gestreuten Teilchen weiterhin symmetrisch zu E' sein. <i>Bei dieser Teilaufgabe kann es auch sein, dass der Prüfling eine fachlich falsche Hypothese sinnvoll begründet. Dafür kann er auch die volle Punktzahl erhalten. Wenn eine richtige Hypothese falsch begründet wird, wird für diese Hypothese 0 von 2 BE vergeben.</i> Experiment: Beispielsweise zur Untersuchung der ersten Hypothese wäre die Bestimmung der Geschwindigkeit (kinetischen Energie) der Teilchen hinter dem Material z. B. mit Hilfe eines Wien'schen Geschwindigkeitsfilters möglich. Die Energie der Teilchen (schwer/leicht) müsste vor dem zu durchdringenden Material gleich sein (Variablenkontrolle). Zum Nachweis der Intensität bei einer bestimmten Geschwindigkeit kann z.B. ein Szintillationszähler verwendet werden.			2
					2
					3
3	a	Beurteilen Sie die fachliche Richtigkeit der folgenden Aussage zur Tumorbekämpfung durch Röntgen- bzw. Ionenstrahlung mit Bezug zur Abb. 4 aus M 3. <i>Die Röntgenstrahlung gibt die meiste Energie an das Gewebe in der Nähe der Oberfläche ab, wohingegen die Schwerionen erst in einer höheren Eindringtiefe sehr lokal einen größeren Energiebetrag abgeben. Mit Schwerionen kann also eine größere Energiemenge lokal an den Tumor abgegeben werden, ohne dass das umliegende Gewebe unnötig belastet wird. Schwerionen ermöglichen folglich generell eine größere maximale Energieabgabe als Röntgenstrahlung am Tumor. Die Heilungschancen steigen dadurch deutlich. Der Einsatz der Röntgenstrahlung eignet sich besonders, um z.B. im umliegenden Gewebe gestreute Krebszellen zu behandeln und die Schwerionen eher, wenn der Tumor in der Nähe von sehr empfindlichen Bereichen (wie z.B. dem Sehnerv) liegt. Man sollte auf jeden Fall eine Behandlung mit Ionenstrahlung bevorzugen, egal wie lange man warten muss!</i>			

		Die Lernenden ... K 2 prüfen verwendete Quellen hinsichtlich der Kriterien Korrektheit, Fachsprache und Relevanz für den untersuchten Sachverhalt. Der ersten beiden Sätze der Aussage sind fachlich korrekt und stimmen mit dem Diagramm aus M 3 überein. Der dritte Satz stimmt in der Verallgemeinerung nicht. Über die absolute abgegebene Energie erhält man in Abb. 4 keine Informationen, dargestellt sind die relativen Werte. In der Aussage wird geschlussfolgert, dass durch die Erhöhung der absorbierten Energie beim Tumor die Heilungschancen steigen. Die Aussage ist nicht falsch, denn es wird nicht von Heilung, sondern von Heilungschancen gesprochen. Es wird aber nicht erwähnt, welche anderen Faktoren (z.B. Art und Ort des Tumors) noch eine Rolle spielen. Der vorletzte Satz deckt sich mit den Informationen, die man aus Abb. 4 erhält. Der letzte Satz hat keine fachliche Aussage.		5	
	b	<i>Beurteilen Sie die Güte des durchgeführten Bewertungsprozesses.</i> Die Lernenden ... B 5 reflektieren Bewertungen von Technologien und Sicherheitsmaßnahmen oder Risikoeinschätzungen hinsichtlich der Güte des durchgeführten Bewertungsprozesses. <i>Entscheidend ist bei dieser Bearbeitung die Schlüssigkeit des durch die Schülerin, den Schüler vorgenommenen Bewertungsprozesses. Im Folgenden wird eine mögliche Bearbeitung exemplarisch dargestellt.</i> Es wurden folgende Kriterien bei der Aussage berücksichtigt: Wirkung des Verfahrens, Nebenwirkungen des Verfahrens, Verfügbarkeit. Übersehen wurden folgende Argumente: z.B. räumliche Verfügbarkeit, Kosten, Eignung des Verfahrens für die Art des Tumors, ... Die Angabe eines weiteren sinnvollen Arguments würde ausreichen, um die eine BE zu vergeben. Schlüssigkeit der Argumentation: Im Hinblick auf Wirkungen und Nebenwirkungen wurde sprachlich schlüssig argumentiert (Schlüsselwörter z.B. „also“). In Bezug auf die Verfügbarkeit wurde nicht schlüssig argumentiert, sondern es wurde lediglich eine reine Aussage formuliert. Untersuchung der Gewichtung: Alle zuerst genannten Argumente wurden stark gewichtet, wobei nicht ersichtlich ist, welches konkrete Gewicht den Kriterien jeweils beigemessen wurde. Die Wartezeit hingegen wurde nicht als relevantes Argument angesehen. Diese sehr einseitige Bewertung der Situation kann lebensgefährlich für sie werden, da eine lange Wartezeit zu einer deutlichen Verschlechterung (z.B. Streuen des Tumors) ihrer Heilungschancen führen kann, so dass ggf. eine frühere Behandlung mit der Röntgenstrahlung sinnvoller sein könnte.		2 1 2 2	

		Summe	11	22	7
		Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	27,5	55	17,5

4 Standardbezug

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1 a	1			
b			3	
c	7			
2 a		6	3	
b		2, 5		
3 a			2	
b				5

5 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster¹ vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

¹ Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.