

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**Fakultät Physik**

Professur für Didaktik der Physik

**Gutachter:**

Frau Prof. Dr. Gesche Pospiech

Herr Prof. Dr. Michael Kobel

---

# **ENTWICKLUNG EINER DIGITALEN ESCAPE STORY ZUR RADONBELASTUNG**

Wissenschaftliche Arbeit in der Fachdidaktik Physik

---

Eingereicht von

**Hannes Nitsche**

Geboren am 05.05.1996

Höheres Lehramt an Gymnasien

**Dresden, Mai 2021**



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Didaktische Rekonstruktion der Kernphysik</b> .....	<b>3</b>
1.1 Sachanalyse .....	3
1.1.1 Aufbau und Eigenschaften von Atomkernen.....	3
1.1.2 Radioaktivität .....	5
1.1.3 Ionisierende Strahlung .....	11
1.1.4 Biologische und epidemiologische Grundlagen.....	14
1.1.5 Praktischer Strahlenschutz .....	19
1.2 Lernschwierigkeiten.....	21
1.2.1 Schülervorstellungen .....	21
1.2.2 Analyse kritischer Begriffe.....	23
1.3 Sachstruktur der Escape Story.....	24
<b>2 Didaktisches Potential digitaler Escape Rooms</b> .....	<b>26</b>
2.1 Gamification und Lernspiele .....	26
2.2 Gestaltung von Escape Rooms.....	28
2.3 Einsatz im Unterricht .....	30
2.4 Digitale Umsetzung eines Escape Rooms .....	31
<b>3 Planung und Gestaltung der Escape Story</b> .....	<b>32</b>
3.1 Lehrplananalyse .....	32
3.1.1 Lehrplaneinordnung der Kernphysik.....	32
3.1.2 Lernvoraussetzungen und Zielgruppe .....	33
3.2 Lernziele.....	34
3.2.1 Kompetenzorientierung .....	34
3.2.2 Lernziele.....	35
3.3 Struktur und Inhalt der Escape Story .....	36
3.4 Gestaltung und didaktisch-methodische Begründung.....	39
<b>4 Evaluation der Escape Story</b> .....	<b>43</b>
4.1 Forschungsfragen .....	43
4.2 Beschreibung des Erhebungsinstruments.....	43

4.3 Beschreibung der Probanden .....	44
4.4 Auswertung der Befragungsergebnisse.....	45
<b>5 Reflexion.....</b>	<b>53</b>
5.1 Reflexion der Methodik .....	53
5.2 Reflexion der Ergebnisse .....	54
<b>6 Schlussfolgerungen.....</b>	<b>56</b>
6.1 Einordnung in den Unterricht .....	56
6.2 Didaktischer Mehrwert des Escape-Room-Formats.....	58
<b>7 Fazit.....</b>	<b>60</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>61</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>64</b>
A 1 Übersicht über die Kapitel von Escape Radon.....	64
A 2 Fragebogen der Evaluation .....	68
A 3 Unterrichtsentwurf .....	72
<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>75</b>

## **EINLEITUNG**

Digitale Spiele wurden über die letzten Jahre zunehmend populärer und sind schon lange nicht mehr nur im Bereich der Unterhaltungsmedien anzutreffen. Vermehrt werden sie auch zu Lehrzwecken genutzt und sollen Lernkonzepte auf spielerische Art und Weise erweitern. Von der *Gamification* der Lehre erhofft man sich ein erhöhtes Maß an Engagement und Motivation, indem die Lernenden in eine (virtuelle) Lernumgebung versetzt werden, die ihnen einen selbstgesteuerten Lernprozess eröffnet. Eine der außergewöhnlicheren Spielformen, die langsam ihren Weg in die Bildung findet ist die des Escape Rooms. Hierbei handelt es sich um motivierende Gruppenspiele, in denen die Teilnehmenden Herausforderungen unterschiedlichster Art bewältigen müssen, um aus einem Raum zu entkommen. Da sich anhand der Herausforderungen und Rätsel von Escape Rooms unterschiedlichste Kompetenzen trainieren lassen, lässt sich für diese Spielform durchaus auch eine didaktische Funktion vermuten, welcher im Laufe dieser wissenschaftlichen Arbeit nachgegangen werden soll. Somit ist der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit die Frage nach dem didaktischen Mehrwert eines digitalen, für Lehrzwecke entworfenen Escape Rooms. Konkret soll eine digitale Escape Story entworfen werden und anhand derer untersucht werden, auf welche Weise sich Escape Rooms für Unterrichtszwecke adaptieren lassen und durch welche Gestaltungselemente sie das Interesse der Lernenden am behandelten Lehrinhalt fördern können.

Die Escape Story setzt sich mit einem spezifischen Kontext aus der Kernphysik auseinander: der Strahlenbelastung infolge des radioaktiven Nuklids Radon-222. Die Radonbelastung ist insofern ein relevantes Thema, dass sie den größten Beitrag zur natürlichen Strahlenbelastung des Menschen liefert. Im Dezember 2020 wurden in Deutschland Radonvorsorgegebiete ausgewiesen, also Gebiete, in denen die Aktivitätskonzentration vom radioaktiven Radon in Gebäuden bestimmte Referenzwerte übersteigt und somit das Ergreifen von Strahlenschutzmaßnahmen notwendig wird. Gegenläufig zum hohen Risiko und den aktuellen Maßnahmen ist das Problem der Radonbelastung vielen jedoch unbekannt. Entsprechend stellt diese wissenschaftliche Arbeit auch einen Versuch dar, ein Unterrichtsmodul zu entwickeln, das Lernenden das Radonproblem näherbringt und sie über Risiken informiert.

Die wissenschaftliche Arbeit ist in vier Abschnitte untergliedert. Zu Beginn soll die Kernphysik vor dem Hintergrund der Radonbelastung didaktisch rekonstruiert werden. In diesem Sinne findet eine Auseinandersetzung mit dem fachlichen Hintergrund sowie Schülervorstellungen und kritischen Begriffen statt. Davon ausgehend wird eine Sachstruktur des Radonproblems entworfen, an der sich die letztendliche Umsetzung der Escape Story orientiert. Der zweite Teil der wissenschaftlichen Arbeit setzt sich mit dem didaktischen Potential digitaler Escape Rooms auseinander und versucht dazu, Gestaltungsprinzipien von Escape Rooms und deren Anwendbarkeit im Schulunterricht zu untersuchen. Die entsprechenden Ergebnisse werden auf den Planungsprozess und die Gestaltung der digitalen Escape Story übertragen. Diese werden im dritten Abschnitt der Arbeit, ausgehend von einer Lehrplananalyse und den gesetzten Lernzielen, vorgestellt. In diesem Abschnitt werden des Weiteren die Überlegungen zur Gestaltung und Strukturierung während des Entwicklungsprozesses der Escape Story beschrieben und didaktisch-methodisch begründet. Der vierte Abschnitt stellt die Erprobung der Escape Story vor. Hierzu wird das Evaluationsinstrument beschrieben und die erhobenen Daten ausgewertet. In der abschließenden, von den

Auswertungsergebnissen ausgehenden Diskussion wird die Escape Story reflektiert, Verbesserungsvorschläge angegeben, Ansätze zur Anwendung der Escape Story im Schulunterricht diskutiert und entsprechende Konsequenzen hinsichtlich der Forschungsfragen gezogen. Abschließend wird die wissenschaftliche Arbeit mit einem Fazit beendet.

# 1 DIDAKTISCHE REKONSTRUKTION DER KERNPHYSIK

Zum Zwecke der didaktischen Rekonstruktion wird in der folgenden Sachanalyse der fachliche Hintergrund der Kernphysik mit einem Schwerpunkt auf Radioaktivität und ihren Folgen dargelegt. Dabei soll auch der Kontext der Radonbelastung wiederholt aufgegriffen werden. Anschließend werden Lernschwierigkeiten, Schülervorstellungen und kritische Begriffe vorgestellt und eine sachlogische Strukturierung des Radonproblems vorgenommen.

## 1.1 SACHANALYSE

Die Kernphysik ist ein Teilbereich der Physik, dessen Betrachtungsgegenstand der Aufbau sowie das Verhalten von Atomkernen bildet. Bei Atomkernen handelt es sich um Mehrteilchen-Quantensysteme, bestehend aus durch die starke Wechselwirkung gebundenen Nukleonen. Sie bilden die zentrale Größe in einem Atom und sind durch die von ihnen ausgehende Coulombkraft für die Stabilität des Atoms verantwortlich (vgl. Bethge, Walter, Wiedemann, 2008, S. 1). Heruntergebrochen ist Kernphysik „die Physik der kondensierten stark wechselwirkenden Materie“ (Mayer-Kuckuck, 2002, S. 9). Wesentliche Betrachtungsgegenstände sind die Struktur von Atomkernen, die Umwandlung von Atomkernen (Radioaktivität), Kernkräfte, Streuvorgänge an und Reaktionen mit Atomkernen.

Damit verknüpft spielt insbesondere auch die Strahlungsphysik, welche sich mit ionisierender Strahlung sowie deren Wechselwirkung mit Materie auseinandersetzt, eine tragende Rolle, da ebendiese ionisierende Strahlung durch Umwandlungen von Atomkernen erzeugt werden kann. Weiterhin ergeben sich aus der Kern- und Strahlungsphysik verschiedenste Anwendungsgebiete (Nutzung von Kernenergie, ionisierende Strahlung für medizinische Zwecke, ...) sowie, insbesondere in Hinblick auf Radioaktivität, auch Risiken. Im Folgenden werden kern- und strahlenphysikalische Grundlagen mit einem Schwerpunkt auf Radioaktivität abgehandelt.

### 1.1.1 AUFBAU UND EIGENSCHAFTEN VON ATOMKERNEN

#### KERNAUFBAU

Der Atomkern befindet sich im Zentrum von Atomen und vereinigt nahezu die gesamte Masse eines Atoms in sich. Gleichzeitig nimmt er mit einer Größe in der Ordnung von ca.  $10^{-15} \text{ m} = 10 \text{ fm}$  einen winzigen Anteil des von einem Atom erfüllten Raums ein. (Atomgröße im Bereich von  $10^{-10} \text{ m}$ ). Ein Atomkern ist ein Mehrteilchensystem bestehend aus positiv geladenen **Protonen** ( $q_p = +e_0$ ) und ungeladenen **Neutronen** ( $q_n = 0$ ). Diese Teilchen werden unter dem Begriff **Nukleonen** zusammengefasst. Die kurzreichweitige **starke Wechselwirkung** bindet die Nukleonen, so dass Kernmaterie eine extrem hohe Dichte hat (vgl. Krieger, 2002, S. 55).

Die Anzahl an Protonen und Neutronen in einem Atomkern bestimmen die Atomart, **Nuklid** genannt. Jedes Nuklid wird durch die folgenden Größen beschrieben:

1. Die **Kernladungszahl Z** (auch Ordnungszahl), welche der Anzahl an Protonen entspricht. Sie bestimmt die elektrische Ladung des Atomkerns und ist identisch mit der Anzahl an Hüllenelektronen des neutralen Atoms. Damit definiert die Kernladungszahl die Art des Elements.
2. Die **Neutronenzahl N**, welche der Anzahl an Neutronen entspricht.

3. Die **Nukleonenzahl A**, welche sich aus  $A = Z + N$  ergibt.

Es sind ca. 270 stabile Nuklide und 2000 instabile Nuklide bekannt. Nuklide mit gleicher Kernladungszahl und unterschiedlicher Neutronenzahl werden **Isotope** genannt. Ein Nuklid wird üblicherweise wie folgt mit seinem Elementsymbol X sowie der Kernladungszahl Z (unterer Index) und Nukleonenzahl A (oberer Index) gekennzeichnet:  ${}^A_ZX$ , bspw.  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ . Für eine bessere Nachvollziehbarkeit von Kernreaktionen wird oftmals auch die Neutronenzahl N mit angegeben:  ${}^A_ZX_N$ . Alternativ kann eine Kurzschreibweise genutzt werden, bei der lediglich die Nukleonenzahl angegeben wird, da die Kernladungszahl Z bereits durch das Elementsymbol und die Neutronenzahl N durch die Differenz  $N = A - Z$  eindeutig identifiziert sind, bspw. He-4 oder Rn-222. (vgl. Stolz, 2005, S. 10)

### KERNMASSE UND BINDUNGSENERGIE

Für Angaben von Atom- und Kernmassen wird üblicherweise die **atomare Masseneinheit u** verwendet. Sie wird über die Masse eines  ${}^{12}_6\text{C}$ -Atoms definiert und ergibt sich zu

$$m_u = 1 u = \frac{1}{12} m({}^{12}_6\text{C}) = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Die einzelnen Konstituenten eines Atoms haben die folgenden Massen (anhand derer bereits erkennbar ist, dass die Masse eines Atomkerns einen Großteil der Atommasse ausmacht):

Elektron:  $m_e \approx 5,486 \cdot 10^{-4} u$ ;

Proton:  $m_p \approx 1,007 u$ ;

Neutron:  $m_n \approx 1,009 u$

Mithilfe des einsteinschen Äquivalenzprinzips lässt sich die für die folgende Betrachtung nützliche **Energie einer atomaren Masseinheit** bestimmen:

$$E_u = m_u \cdot c_0^2 = 931,494 \text{ MeV}$$

Aus experimentell bestimmbaren Atommassen  $m_a$  lassen sich die Kernmassen  $m_k$  durch Subtraktion der Masse aller Elektronen bestimmen. Das Masseäquivalent der Bindungsenergie der Elektronen ist dabei vernachlässigbar klein. (vgl. Stolz, 2005, S. 12 f.) Bei genauerer Bestimmung von Atommassen lässt sich beobachten, dass die Kernmasse stets kleiner ist als lediglich die Summe der Massen der Nukleonen. Für die Kernmasse  $m_k$  gilt:

$$m_k = Zm_p + Nm_n - \Delta m$$

Der Subtrahend  $\Delta m$  wird **Massendefekt** des Kerns genannt. Nach der Äquivalenzbeziehung zwischen Energie und Masse kann die dazu äquivalente Energie berechnet werden. Diese entspricht der **Bindungsenergie des Kerns**

$$E_B = \Delta m \cdot c_0^2$$

### DAS TRÖPFCHENMODELL

Das Tröpfchenmodell ist ein Modellierungsansatz, der Atomkerne analog zu Flüssigkeitstropfen beschreibt. Die Grundannahme ist dabei, dass zwischen den Nukleonen im Kern eine stark anziehende Kernkraft wirkt, die diese ähnlich wie Wassermoleküle zusammenhält. Allerdings hat sie eine sehr kurze Reichweite, sodass sie lediglich zwischen benachbarten Nukleonen wirkt. Aus dieser Annahme ergibt sich, dass die Nukleonen an der Oberfläche weniger stark gebunden sind und alle Atomkerne eine annähernd gleiche Massendichte haben (ähnlich wie bei einem



inkompressiblen Wassertropfen). Mithilfe dieses Modells kann die Bindungsenergie im Atomkern beschrieben und mit der **Bethe-Weizsäcker-Formel** in guter Näherung berechnet werden. Nach ihr setzt sich die **Bindungsenergie  $E_B$**  aus mehreren Summanden zusammen, auf die im Folgenden nicht genauer eingegangen werden soll (Veranschaulichung der Terme siehe Abb. 1):

$$E_B = E_{\text{Volumenanteil}} - E_{\text{Oberflächenanteil}} - E_{\text{Coulombanteil}} - E_{\text{Asymmetrieanteil}} - E_{\text{Paarungsterm}}$$

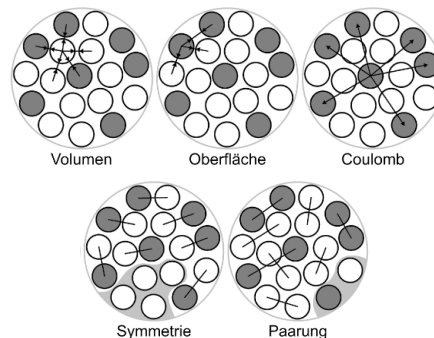


Abb. 1: Veranschaulichung der Bindungsenergieterme

Daniel FR, lizenziert unter CC-BY-SA 3.0, „Tröpfchenmodell“, <https://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Weizsäcker-Formel>

„Kerne sind stabil, wenn ihre Bindungsenergie nach [der Bethe-Weizsäcker-Formel] ein Minimum erreicht; sie sind dagegen instabil und somit radioaktiv, wenn sie eine höhere Energie enthalten.“ (Krieger, 2002, S. 48) Damit ist das Tröpfchenmodell dazu in der Lage, die (In-)stabilität von Atomkernen zu begründen. Voraussetzung für einen stabilen Atomkern ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Neutronen und Protonen. Im Falle von leichten Kernen müssen Protonen- und Neutronenzahl ungefähr gleich sein, bei höherer Nukleonenzahl ist für einen stabilen Zustand ein Neutronenüberschuss notwendig. Ist dies nicht der Fall, sind die Atomkerne instabil, wodurch sie zu einer Umwandlung in einen energetisch günstigen, stabilen Zustand tendieren. Dieses Verhalten wird **Radioaktivität** genannt. (vgl. Krieger, 2002, S. 45 f.)

## 1.1.2 RADIOAKTIVITÄT

„Die Erscheinung der Radioaktivität ist durch die spontane Umwandlung instabiler Atomkerne unter Energieabgabe gekennzeichnet. Die Abgabe der Energie erfolgt dabei in Form ionisierender Strahlung [...]“ (Stolz, 2005, S. 19). Instabile Atomkerne bezeichnen hierbei Kerne, die sich aufgrund ihrer Verteilung bzw. Anzahl an Nucleonen in einem energetisch ungünstigen Zustand befinden und unter Energieabgabe in ein anderes Nuklid umwandeln können. Dieser exotherme Prozess wird radioaktiver Zerfall bzw. **radioaktive Umwandlung** genannt. Dabei findet entweder direkt ein Übergang in ein stabiles Nuklid oder eine

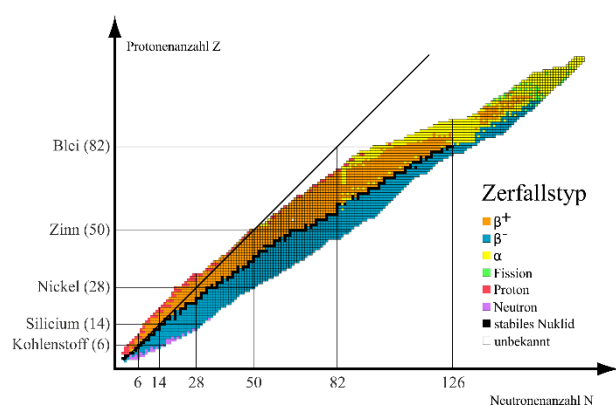


Abb. 2: Nuklidkarte (Nuklide im Z-N-Diagramm) Matthias M., lizenziert unter CC-BY-SA 3.0, „Nuklidkarte in Segrè-Darstellung“, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuklidkarte\\_Segrè.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuklidkarte_Segrè.svg)

**Umwandlungsreihe** statt, bei der das Nuklid über mehrere instabile "Zwischenstufen" letztendlich einen stabilen Zustand erreicht. Anders formuliert handelt es sich bei Radioaktivität um „die von selbst eintretende Stabilisierung instabiler Nuklide durch eine Veränderung der Kernzusammensetzung“ (Stolz, 2005, S. 19). Bei einem Blick in die Nuklidkarte (siehe Abb. 2) fällt auf, dass es verhältnismäßig wenig stabile Nuklide (schwarz markierter Bereich) gibt. Alle Atomkerne außerhalb dieses Bereichs haben entweder "zu viele" Neutronen (neutronenreiche Kerne unterhalb der Stabilitätskurve) oder zu viele Protonen (neutronenarme Kerne oberhalb der Stabilitätskurve) und sind somit instabil. Instabile Nuklide können sich unter unterschiedlichsten Umwandlungsprozessen ineinander umwandeln, wobei auch unterschiedliche Strahlungsarten freigesetzt werden.

## ZEITLICHE BETRACHTUNG RADIOAKTIVER UMWANDLUNGEN

### **Das Umwandlungsgesetz**

Die Umwandlung von Atomkernen findet spontan statt und ist somit ein Vorgang, welcher sich nur statistisch beschreiben lässt. Jeder Atomkern des gleichen Nuklids hat dabei für ein bestimmtes Zeitintervall  $dt$  die gleiche **Umwandlungswahrscheinlichkeit** (in unserer Betrachtung annähernd unbeeinflussbar durch äußere Einflüsse). Der exakte Zeitpunkt einer einzelnen Kernumwandlung bleibt dabei unbestimmt. Stattdessen kann jedoch angegeben werden, wie viele Kernumwandlungen bei einer gegebenen Stoffmenge bzw. großen Anzahl an radioaktiven Kernen im Mittel stattfinden. Wenn zum Zeitpunkt  $t$  eine homogene Stoffmenge  $N$  Atome des gleichen Nuklids enthält, so gilt für die mittlere Anzahl an Umwandlungen  $dN$

$$dN = -\lambda N dt$$

wobei  $\lambda$  die **Zerfallskonstante** ist. Aus Integration und Umstellen der Gleichung ergibt sich das **exponentielle Umwandlungsgesetz**

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

wobei  $N(t)$  die Anzahl an Atomen zum Zeitpunkt  $t$  angibt. Aus der Formel lässt sich ableiten, dass sich „in gleichen Zeitintervallen [...] also stets der gleiche Bruchteil der noch vorhandenen radioaktiven Atome [umwandelt]“ (Stolz, 2005, S.20 f.).

Weitere relevante Größen sind zum einen die **mittlere Lebensdauer**  $\tau = 1/\lambda$  und die besonders in der Praxis relevante **Halbwertszeit**  $T_{1/2}$ . Diese gibt das Zeitintervall an, in dem die Anzahl der vorhandenen Atomkerne jeweils um die Hälfte abnimmt. Sie ergibt sich aus

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Die Größen  $\lambda$  und  $T_{1/2}$  sind charakteristische, nuklidspezifische Konstanten. (vgl. Stolz, 2005, S. 21.)

### **Aktivität**

Da die Anzahl an Atomkernen  $N$  einer Substanz oftmals nicht direkt ermittelbar ist, ist es häufig sinnvoller, die Umwandlungsrate bzw. **Aktivität**  $A(t)$  zu betrachten. Sie gibt die Anzahl der pro Zeiteinheit auftretenden Umwandlungen eines radioaktiven Nuklids an und bestimmt sich somit aus

$$A(t) = \lambda N(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

und in analoger Form zum exponentiellen Umwandlungsgesetz zu

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad [A] = 1 \text{Bq (Becquerel)} = 1 \text{s}^{-1}$$

mit  $A_0 = \lambda N_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_0$  (vgl. Bethge, Walter, Wiedemann, 2008, S. 223). Die Umwandlung radioaktiver Phänomene unterliegt statistischen Gesetzen und ist entsprechend mit **statistischen Schwankungen** verbunden. Diese Schwankungen lassen sich aus Wahrscheinlichkeitsverteilungen berechnen (für große Anzahl an Kernen i. A. Gaußverteilung) (vgl. Stolz, 2005, S. 26-28) und sollen im Folgenden nicht genauer betrachtet werden.

## UMWANDLUNGSARTEN

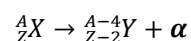
Radioaktive Umwandlungen lassen sich durch drei Arten unterscheiden.

1. Umwandlungen durch die **starke Wechselwirkung**, bei denen sich die Nukleonenzahl verringert. (bspw. Alphaumwandlung)
2. Radioaktive Umwandlungen durch die **schwache Wechselwirkung**, bei denen sich Nukleonen ineinander umwandeln (bspw. Beta-Umwandlung) (vgl. Krieger, 2002, S. 61)
3. **Isomere Übergänge**, „bei denen der Ausgangskern aus einem angeregten, metastabilen Zustand in einen Zustand niedrigerer Energie übergeht“ (Krieger, 2002, S. 56) (bspw. Gammaübergänge)

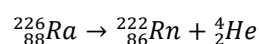
Sie alle haben die Gemeinsamkeit, dass sie unter Abgabe **ionisierender Strahlung** stattfinden. Bei der Betrachtung der Umwandlungen ist zu beachten, dass radioaktive Umwandlungen nur unter Einhaltung der **Erhaltungssätze** (Erhaltung von Energie, Ladungen, Leptonenzahl, Hadronenzahl, Impuls und Drehimpuls) erlaubt sind (vgl. Krieger, 2002, S. 60). Im Folgenden sollen drei der wichtigsten Formen radioaktiver Umwandlung beleuchtet werden:

### ***α-Umwandlung***

Bei der Alphaumwandlung wird ein  $\alpha$ -Teilchen, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen, freigesetzt. Damit handelt es sich beim  $\alpha$ -Teilchen um ein doppelt ionisiertes  ${}^4_2\text{He-Atom}$ . Die Alphaumwandlung lässt sich durch die folgende allgemeine Umwandlungsgleichung beschreiben:



Ein konkretes Beispiel ist die Umwandlung von Radium-226 zu Radon:



Charakteristisch ist die **hohe Bindungsenergie** von Alphateilchen von ca. 28,3 MeV, die dazu führt, dass die Alphaumwandlung i.A. auf schwere Nuklide beschränkt ist (vgl. Stolz, 2005, S. 29). Bei der quantenmechanischen Beschreibung der Alphaumwandlung wird angenommen, dass das Alpha-Teilchen im Kern den anziehenden Kernkräften und außerhalb des Kerns der elektrostatischen Abstoßung unterliegt. Durch die Coulomb-Potentialbarriere wird das Alpha-Teilchen im Kern festgehalten (siehe Abb. 3) und da seine Energie kleiner ist als die Coulomb-Potentialbarriere, kann die Alphaumwandlung lediglich mithilfe des quantenmechanischen **Tunneleffekts** erklärt werden (vgl. Bethge, Walter, Wiedemann, 2008, S. 230). Hiernach ist das Durchlaufen der Potentialbarriere nicht wie bei einer klassischen Betrachtung unmöglich. Stattdessen verringert sich die Amplitude der Wellenfunktion des Teilchens mit dem Durchdringen der Coulombbarriere lediglich, sodass

eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Alphateilchens hinter der Barriere  $\neq 0$  auftritt. Die Durchdringungswahrscheinlichkeit lässt sich mithilfe eines Transmissionskoeffizienten  $T$  beschreiben für den gilt<sup>1</sup>:

$$T \cong \exp\left(-\frac{2d\sqrt{2m(V_0 - E_a)}}{\hbar}\right)$$

$d$  ... Dicke der Potentialbarriere  
 $E_b$  ... Bindungsenergie ( $E_b = V_0 - E_a$ )

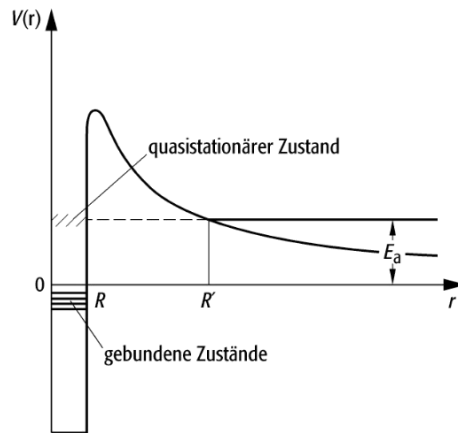
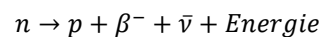


Abb. 3: Verlauf des Coulomb-Potentials bei Alpha-Umwandlung  
 Spektrum Akademischer Verlag, „Alphazerfall 2“, aus Spektrum Lexikon der  
 Physik, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/alphazerfall/400>

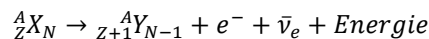
Aus der Transmissionswahrscheinlichkeit lässt sich des Weiteren auch die Umwandlungswahrscheinlichkeit unter Alphaumwandlung ableiten.

### **$\beta^-$ -Umwandlung**

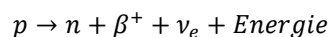
Sofern ein Nuklid einen Neutronenüberschuss gegenüber stabilen Kernen aufweist, erfolgt meistens eine  $\beta^-$ -Umwandlung. Dabei wandelt sich im instabilen Nuklid unter der schwachen Wechselwirkung ein Neutron in ein Proton um. Dabei wird ein **Elektron** emittiert, welches historisch als  $\beta^-$ -Teilchen bezeichnet wird. Des Weiteren wird, zur Erhaltung der Leptonenzahl, ein Antineutrino emittiert:



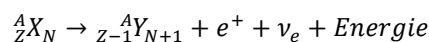
bzw. als allgemeine Umwandlungsgleichung:



Des Weiteren gibt es auch die  $\beta^+$ -Umwandlung, welche bei Protonenüberschuss auftreten kann. Diese kann als inverse Reaktion zur  $\beta^-$ -Umwandlung betrachtet werden. Hierbei wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt und dabei sowohl ein **Positron** als auch ein **Neutrino** freigesetzt:

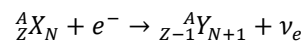


bzw. als allgemeine Umwandlungsgleichung:



<sup>1</sup> Vollständige Herleitung siehe Bethge, Walter, Wiedemann, 2008, S. 233 - 236

Eine weitere Möglichkeit der Umwandlung eines Protons in ein Neutron ist der **Elektroneneinfang**. Dabei wird ein Hüllenelektron aufgenommen und unter Aussendung eines Neutrinos entsteht das gleiche Folgeprodukt wie bei der  $\beta^+$ -Umwandlung. (vgl. Stolz, 2005, S. 31 f.)

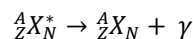


### ***y*-Umwandlung**

Ähnlich der Elektronenhülle kann sich ein Atomkern in energetisch angeregten Zuständen befinden. Dies kann insbesondere unmittelbar nach Alpha- oder Beta-Umwandlungen sowie bei Streuprozessen auftreten. Da sich quantenmechanische Kenngrößen (Kernspin, magnetisches Moment, ...) bei der Umwandlung in andere Anregungszustände ändern können, werden solche Prozesse ebenfalls als radioaktive Kernumwandlungen betrachtet, auch wenn Nukleonen-, Kernladungszahl und damit auch die Art des Nuklides gleichbleiben. Die am häufigsten auftretende Form ist dabei der Übergang eines Atomkerns in einen energetisch tiefer liegenden Zustand unter **Emission von  $\gamma$ -Strahlung**. Dabei handelt es sich um hochenergetische elektromagnetische Strahlung (Photonen). Die Energie der  $\gamma$ -Quanten ergibt sich dabei aus der Differenz der Energieniveaus des Übergangs und erreichen bei natürlichen Kernumwandlungen Energien zwischen 10 keV und 7 MeV:

$$E_\gamma = E_2 - E_1 = hf$$

(vgl. Stolz, 2005, S. 39 f.). Die allgemeine Kernumwandlungsgleichung lautet:



## **DIE RADONUMWANDLUNG**

Im Folgenden soll exemplarisch eine besonders für natürliche Strahlenexpositionen verantwortliche Umwandlungsreihe analysiert werden: Die Radon-222-Reihe. Sie bildet den letzten Teil der Uraniumreihe, welche insgesamt 14 Umwandlungsprozesse umfasst, beginnend beim natürlich in der Erde angereicherten Uran-238 mit einer Halbwertszeit von  $T({}^{238}_{92}U) = 4,47 \cdot 10^9 a$  und endend bei einem stabilen Blei-Isotop ( ${}^{206}_{82}Pb$ ). Ein entscheidendes Zwischenprodukt der Umwandlungsreihe ist Radon-222: Es ist ein natürlich vorkommendes Edelgas, und selbst radioaktiv. Rn-222 wandelt sich mit einer Halbwertszeit von ca. 3,8 Tagen in eine Reihe von Folgeprodukten um, geht normalerweise keine chemischen Verbindungen ein und ist sehr mobil. Dadurch steigt es aus der Erde nach oben und kann sich in Innenräumen verteilen. Die natürliche Strahlenexposition des Menschen ist zu einem beträchtlichen Teil auf Radonansammlungen in Innenräumen zurückzuführen<sup>2</sup>. (vgl. Bundesamt für Strahlenschutz, 2016, S. 2 ff.)

Exemplarisch sollen die verschiedenen Umwandlungsarten und Eigenschaften radioaktiver Umwandlungen anhand der Radon-222-Umwandlungsreihe aufgezeigt werden (siehe Abb. 4). Rn-222 wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 3,825 Tagen unter Abgabe von Alpha-Strahlung zu Polonium-218 um. Anschließend folgt eine Umwandlungsreihe über mehrere kurzlebige Nuklide (Blei-214, Bismut-214, Polonium-214):

---

<sup>2</sup> Mehr dazu siehe Kapitel 1.1.4: Natürliche Strahlenexposition

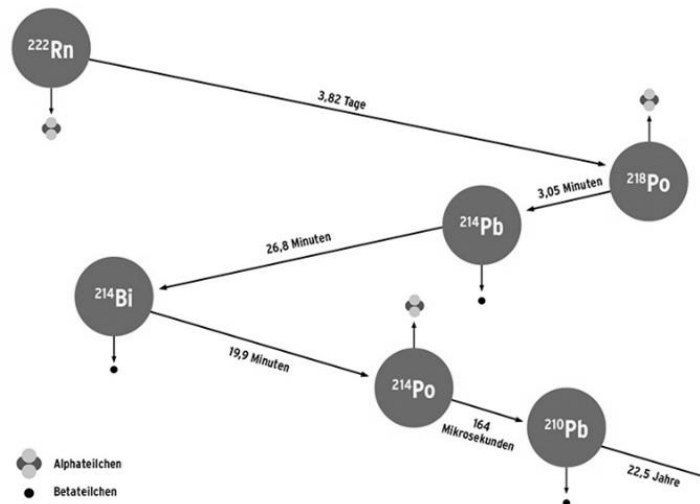
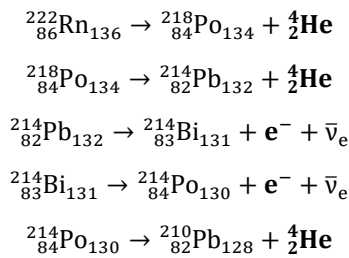
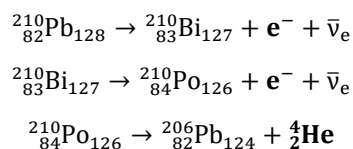


Abb. 4: Umwandlungsreihe von Radon-222

Bundesamt für Strahlenschutz, „Zerfallsreihe von Radon-222“,

<https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/einfuehrung/einfuehrung.htm>

Hierbei finden sowohl Alpha- als auch Beta-Umwandlungen statt. Das entstehende Blei-210 ( ${}^{210}_{82}\text{Pb}_{128}$ ) hat eine sehr hohe Halbwertszeit von 22,5 Jahren. Es folgt eine weitere Umwandlungsreihe bis hin zum stabilen Blei-206 (nicht in Abb. 4 dargestellt):



Aufgrund der geringen Aktivität und hohen Halbwertszeit von Pb-210 spielen diese letzten Umwandlungsschritte allerdings für Strahlenschutzbetrachtungen eine untergeordnete Rolle. Auffällig ist insbesondere, dass bei der Umwandlungsreihe von Radon nach einer langen Halbwertszeit von ca. 4 Tagen eine Kaskade von Folgereaktionen mit kurzen Halbwertszeiten und unter Aussendung von Alpha- und Beta-Strahlung ausgelöst wird. Diese Eigenschaft und die Tatsache, dass Radon ein bewegliches Gas ist und eingeatmet werden kann, führt uns zur hohen Gefahr der Rn-222-Umwandlungsreihe, die in den folgenden Kapiteln hergeleitet werden soll.

### 1.1.3 IONISIERENDE STRAHLUNG

Unter dem Begriff der ionisierenden Strahlung werden alle Strahlungsarten zusammengefasst, die bei anderen Atomen **Ionisation** hervorrufen können. Ionisation bezeichnet dabei den Vorgang, bei dem Elektronen aus einem Atom herausgelöst werden. Damit entstehen positiv geladene Restatome (**Ionen**). Ionisierende Strahlung wird insbesondere durch radioaktive Prozesse freigesetzt und sowohl  $\alpha$ - als auch  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung ist ionisierend. Es wird unterschieden in

1. **Direkt ionisierende Strahlung** aus geladenen Teilchen, die genügend kinetische Energie besitzen, um durch Stoßprozesse zu ionisieren (Alpha- und Betastrahlung)
2. **Indirekt ionisierende Strahlung** aus ungeladenen Teilchen, welche im bestrahlten Atom Kernumwandlungen auslösen können (Gammastrahlung). (vgl. Stolz, 2005, S. 87)

Tritt ionisierende Strahlung in Wechselwirkung mit Materie, so findet **Energieverlust** und **Streuung** der Strahlung statt. Auf das Wechselwirkungsmaterial hingegen wird Energie übertragen und es kann durch den Ionisationsprozess eine Änderung der physikalischen, chemischen oder biologischen Stoffeigenschaften eintreten. Da durch Ionisationsprozesse auch Gewebezellen beschädigt werden können, sind diese entscheidender Betrachtungsgegenstand des Strahlenschutzes und der Strahlenbiologie. Die drei Strahlungsarten treten auf unterschiedliche Weise in Wechselwirkung mit Materie und unterscheiden sich insbesondere durch ihr **Ionisationsvermögen  $J$**  sowie ihre **Reichweite  $R$** . Im Folgenden soll die direkt ionisierende Strahlung genauer beleuchtet und charakteristische Größen genannt werden. Die indirekt ionisierende Strahlung ist für das Radonproblem eher unerheblich und wird nicht genauer beleuchtet.<sup>3</sup>

#### WECHSELWIRKUNG GELADENER TEILCHEN MIT MATERIE

Elektrisch geladene Teilchen zeichnen sich dadurch aus, dass sie aufgrund ihres elektrischen Feldes bei Passage eines Atoms eine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit von annähernd 100% haben. Sie verlieren bei Durchdringung von Materie ihre kinetische Energie zu einem großen Teil durch **Ionisationsbremsung**. Dies bedeutet, dass die Teilchen durch unelastische Stöße mit Hüllenelektronen das Atom ionisieren, dabei einen Energieverlust erfahren und somit abgebremst werden. Der Energietransfer ist dabei relativ gering, sodass viele aufeinander folgende Stoßprozesse notwendig sind, um die Teilchen vollständig abzubremsen.

Neben der Ionisationsbremsung können noch weitere Wechselwirkungsformen stattfinden. Die geladenen Teilchen können am Atomkern aufgrund der Coulomb-Wechselwirkungen **elastisch gestreut** werden und ihre Bewegungsrichtung ändern. Bei einer damit verbundenen Beschleunigung bzw. Abbremsung emittieren geladene Teilchen elektromagnetische **Bremsstrahlung**. (vgl. Stolz, 2005, S. 88 f.) Weitere mögliche Wechselwirkungsvorgänge in bestimmten Grenzfällen (Coulomb-Streuung, Cerenkov-Strahlung, direkte Wechselwirkung mit dem Kern bis hin zur induzierten Kernspaltung, ...) sollen hier nicht genauer beleuchtet werden.

Die relevante Größe bei der Beschreibung dieser Prozesse ist das **Bremsvermögen  $S$**  eines Materials, welches dem mittleren differentiellen Energieverlust des eintreffenden Teilchens pro Wegelement entspricht:

---

<sup>3</sup> Genaueres zur Wechselwirkung von Photonen mit Materie siehe Stolz, 2005, S. 95 - 100

$$S = -\overline{\left(\frac{dE}{dx}\right)}$$

Klassischerweise wird dabei in **Stoßbremsvermögen**  $S_{col}$  (Energieverlust durch inelastische Stöße bzw. Ionisationsverlust) und **Strahlungsbremsvermögen**  $S_{rad}$  (Energieverlust durch Bremsstrahlung) unterschieden:

$$S_{tot} = S_{col} + S_{rad}$$

Das Stoßbremsvermögen lässt sich über die **Bethe-Bloch-Formel** berechnen, aus der sich folgende Proportionalität ergibt (siehe Krieger, 2002, S. 189):

$$S_{col} \sim \frac{\rho Z}{A} \cdot \frac{z^2 m}{E} \quad \begin{array}{l} z \dots \text{Kernladungszahl des Teilchens} \\ \rho \dots \text{Absorberdichte} \end{array}$$

Für das Strahlungsbremsvermögen  $S_{rad}$  gilt (siehe Krieger, 2002, S. 194):

$$S_{rad} \sim \frac{\rho Z^2}{A} \cdot \frac{q}{m} \cdot E_{kin}$$

Aus dem Stoßbremsvermögen lässt sich auch das **Ionisationsvermögen**  $J$  ableiten, welches die Anzahl an Ionenpaaren angibt, die ein geladenes Teilchen pro Weglänge erzeugt:

$$J \sim S_{col}$$

Die für unsere Betrachtungen relevanten geladenen Alpha- und Beta-Teilchen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Verhaltens in Materie und sollen im Folgenden gesondert betrachtet werden.

### ***α-Strahlung***

Bei der bei Alpha-Umwandlungen entstehenden Alpha-Strahlung handelt es sich um Heliumkerne ( ${}^4_2\text{He}_2$ ). Diese haben eine hohe Masse von  $m_\alpha \approx 4 u$  und aufgrund der beiden Protonen eine Ladung von  $q_\alpha = 2e$ . Aufgrund ihrer hohen Masse werden Alpha-Teilchen bei den Stoßprozessen kaum abgelenkt und können bis zur vollständigen Abbremsung eine große Menge an unelastischen Stößen und somit Ionisationsprozessen durchführen. Aus demselben Grund ist der Energieverlust von Alphateilchen durch Bremsstrahlung vernachlässigbar klein ( $S_{tot} \cong S_{col}$ ) (vgl. Stolz, 2005, S. 91). Das Stoßbremsvermögen  $S_{col}$  lässt sich in guter Näherung mit der nichtrelativistischen Bethe-Bloch-Formel berechnen und es gilt die oben beschriebene Proportionalität.

Auffällig ist hierbei, dass das Stoßbremsvermögen nicht von der Masse, sondern lediglich von der Geschwindigkeit des Teilchens abhängig ist ( $\sim \frac{1}{v^2}$ ). Diese ist bei Alphateilchen vergleichsweise gering ( $10.000 - 20.000 \frac{km}{s}$ ). Daraus ergibt sich eine sehr geringe Reichweite und Eindringtiefe in Materie. Die kinetische Energie von Alphateilchen liegt bei natürlicher Alphastrahlung annähernd im Größenbereich von 2-5 MeV und die Reichweite in Luft mit Normaldruck bei unter 10 cm. Im Allgemeinen gilt für die mittlere Reichweite von schweren geladenen Teilchen wie Heliumkernen das **Reichweitengesetz von Geiger** (vgl. Krieger, 2002, S. 209):

$$\bar{R} \sim \frac{E_0^2}{\rho m z^2 e^2}$$

Aufgrund dieser kurzen Reichweite dringt auf den menschlichen Körper eintreffende Alphastrahlung lediglich in die obersten Hautschichten ein und ist somit im Allgemeinen ungefährlich. Da das



Ionisationsvermögen hingegen sehr hoch ist, können in Organismus eingelagerte Alpha-Strahlungsquellen (bspw. durch Einatmen) sehr schädlich sein.

### **$\beta$ -Strahlung**

Wie bereits erwähnt handelt es sich bei Betastrahlung um einfache Elektronen oder Positronen. Diese haben im Vergleich zu Alphateilchen eine wesentlich geringere Masse von  $m_e \approx 5,5 \cdot 10^{-4} u$  und sind einfach negativ geladen. Da Betateilchen Geschwindigkeiten von ca.  $0,9 \cdot c$  erreichen, muss die relativistische Bethe-Bloch-Formel zur Ermittlung des Stoßbremsvermögens herangezogen werden. Des Weiteren kann auch Bremsstrahlung zum Energieverlust der Elektronen beitragen, weswegen das Strahlungsbremsvermögen, welches direkt proportional zur kinetischen Energie der Betateilchen ist, berücksichtigt werden muss.

Betateilchen werden bei den Stoßprozessen aufgrund ihrer geringen Masse stark abgelenkt, sodass sie, wenn sie in eine Materialschicht eindringen, Trajektorien mit vielfachen kleinwinkligen Richtungsänderungen besitzen (**Elektronenstreuung**) (vgl. Krieger, 2002, S. 202). Die auf die Strahlrichtung projizierte **Eindringtiefe  $R_p$**  lässt sich über einen materialabhängigen Umwegfaktor  $X \geq 1$  näherungsweise aus der tatsächlichen Bahnlänge  $L$  berechnen (vgl. Krieger, 2002, S. 212):

$$R_p = \frac{1}{X} \cdot L = \frac{1}{X} \cdot \int_0^{E_0} \frac{1}{S_{tot}} dE$$

Die Eindringtiefe  $R_p$  variiert stark, da Betateilchen ein kontinuierliches Energiespektrum aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die bei der Betaumwandlung freiwerdende Energie durch das zusätzlich Antineutrino auf drei Körper verteilt wird, womit der Impulserhaltungssatz die Teilchenenergien nicht diskret festlegt. Betateilchen haben im Vergleich zur Alphastrahlung höhere Reichweiten und ein geringeres Ionisationsvermögen. Ihre kinetischen Energien liegen im Bereich von ca. 10 bis 10.000 keV. und die Reichweite in Luft kann je nach Anfangsenergie einige Meter betragen. Exemplarische mittlere Reichweiten von Betastrahlung in Luft und Gewebe sind in der folgenden Tabelle festgehalten:

Tab. 1: Mittlere Reichweiten von Betastrahlung  
Daten übernommen aus: Krieger, 2002, S. 216

$\bar{E}_\beta$ in MeV	0,1	0,5	1	3
$\bar{R}_{Luft}$ in m	0,13	1,7	4,1	14
$\bar{R}_{Gewebe}$ in mm	0,14	1,7	4,3	16

Im Gegensatz zu Elektronen, die vom Material absorbiert werden, sofern keine Reflexion oder Transmission stattfindet, vereinigen sich Positronen nach vollständiger Abbremsung mit Elektronen, wodurch eine **Paarvernichtung** ausgelöst wird. Dabei werden Photonen emittiert. (vgl. Stolz, 2005, S. 90)

Bei äußerer Betastrahlungseinwirkung auf den Menschen können Hautzellen beschädigt werden. Aufgrund der im Vergleich zu Alphastrahlung größeren Eindringtiefe können jedoch Verbrennungen und langfristig auch Hautkrebs auftreten. Bei Aufnahme in den Körper können Betastrahler hohe Strahlenbelastungen verursachen.

## VERGLEICH DER STRAHLUNGSARTEN

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Strahlungsarten mit ihren Eckdaten gegeben:

Tab. 2: qualitativer Vergleich der Strahlungsarten

	<b><math>\alpha</math>-Strahlung</b>	<b><math>\beta</math>-Strahlung</b>	<b><math>\gamma</math>-Strahlung</b>
Teilchen	${}^4_2\text{He}_2$ (Heliumkern)	$e^-$ oder $e^+$ (Elektron/Positron)	$\gamma$ (Photon)
Geschwindigkeit $v$	$\approx 0,1 \cdot c$	$\approx 0,9 \cdot c$	$c$
Elektrische Ladung $q$	$+2e$	$-e$	0
Ionisationsvermögen $J$	Sehr hoch	mittel	niedrig
Qualitätsfaktor $w^4$	20	1	1
Abschirmung durch bspw.	Papier	Einige mm Aluminium	Bleiplatte
Umwandlungsgleichung	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + \alpha$	${}^A_Z\text{X}_N \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\text{Y}_{N-1} + e^- + \bar{\nu}_e$	${}^A_Z\text{X}^* \rightarrow {}^A_Z\text{X}_N + \gamma$

### 1.1.4 BIOLOGISCHE UND EPIDEMIOLOGISCHE GRUNDLAGEN

#### STRAHLENBIOLOGIE

Gegenstand der Strahlenbiologie sind die durch ionisierende Strahlung verursachten Einwirkungen auf lebende Zellen. Dabei sind die ausgelösten **Energieüberträge** die entscheidende Ursache für biochemische Veränderung, welche Zellschäden, Zelltod oder Veränderungen des Erbguts umfassen können. Die biochemische Wirksamkeit der Energieüberträge hängt stark von der Bindungsstärke der betroffenen Moleküle ab. Hohe biochemische Bindungsenergien (kovalent gebundene Moleküle, welche sich insbesondere in der DNS finden) sind besonders resistent gegen energetische Einwirkungen. Bei niedrigerer chemischer Bindungsenergie hingegen können bereits geringfügige Temperaturerhöhungen zu Veränderungen der Molekülstrukturen führen. Im Gesamtorganismus eines Standardmenschen entstehen im Laufe eines Jahres durch die natürliche Strahlenexposition ungefähr  $3,5 \cdot 10^{16}$  Ionisationen. Der menschliche Körper verfügt somit über Mechanismen, um zumindest bis hin zu bestimmten Grenzen die Folgeschäden ionisierender Strahlung effektiv vermeiden oder reparieren zu können.

#### **Die strahlenbiologische Wirkungskette**

Die Einwirkung von Strahlung auf eine Zelle lässt sich mithilfe einer dreistufigen Wirkungskette beschreiben: (vgl. Krieger, 2002, S. 246)

1. Die **physikalische Phase**: Hierbei finden die in Kapitel 1.1.3 beschriebenen Wechselwirkungen der Strahlung mit Atomen oder Molekülen statt. Dadurch entstehen ionisierte oder angeregte Atome in der Zelle  
Zeitbereich:  $10^{-16} - 10^{-13}$  s
2. Die **physikalisch-chemische Phase**: Es findet eine Verteilung der absorbierten Energie infolge von thermodynamischen Prozessen statt. Dies führt bspw. zur Zerstörung von Molekülen oder Brüchen in Kettenmolekülen wie DNS-Molekülen, sodass funktionelle und strukturelle Veränderungen der Biomoleküle entstehen.

<sup>4</sup> Siehe Kapitel 1.1.4: Dosisgrößen

Zeitbereich:  $10^{-13} - 10^{-2}$  s

3. Die **biologische Phase**: Hier findet zunächst die Reparatur von DNS-Schäden statt. Aufgrund der nicht beseitigten Veränderungen in den Biomolekülen wird der Zellstoffwechsel beeinflusst und die Erbsubstanz beim Reparaturprozess modifiziert. Es folgen submikroskopische Schäden. Weiterhin können Mutationen der Erbsubstanz und Entartungen von Zellen entstehen, welche im schlimmsten Fall in der Strahlenkrankheit, Krebserkrankungen oder dem Tod des Organismus enden können.

Zeitbereich:  $10^{-2}$  s bis mehrere Jahrzehnte

### **Strahlenwirkungen**

Strahlenwirkungen werden in **direkte** und **indirekte** Wirkungen unterschieden. Bei ersterem wechselwirkt die Strahlung unmittelbar mit Biomolekülen. Durch die Ionisationsprozesse entstehen freie Elektronen sowie positiv geladene Kationen. Die Struktur der Moleküle wird beschädigt und damit verändert oder es werden direkte **Radikale** dieser Verbindungen gebildet (= neutrale, instabile und hochreaktive Teilchen mit einem ungepaarten Elektron, die Oxidationsprozesse und Zellschäden induzieren können). Indirekte Strahlenwirkungen finden über den Umweg chemischer Sekundärprozesse statt und sind die häufigste Wechselwirkungsart mit Biomolekülen. Dabei werden Wassermoleküle im Zellplasma oder -wasser angeregt oder ionisiert, wodurch Radikale erzeugt werden (sog. **Radiolyse**). Diese lagern sich an anderen Molekülen an und verändern durch chemische Wechselwirkungen die Biomoleküle in der Zelle. (vgl. Krieger, 2002, S. 247 f.)

„Beide Strahlenwirkungen können zu folgenden Reaktionen in Zellen führen:

- Erzeugung von DNS-Schäden
- Zellteilungshemmungen (Mitosehemmungen) oder Erhöhung der Zellteilungsraten
- Änderungen der Kommunikation von Zellen über Botenstoffe
- Stoffwechselveränderungen in der Zelle
- Zerstörung oder Veränderung von Membranen oder Zellorganellen
- Zelltod.“ (Krieger, 2019, S. 414)

### **DOSISGRÖßEN**

Um die Wirkung radioaktiver Strahlung auf den Körper quantitativ zu beschreiben, wird der Begriff der **Dosis** eingeführt. Es wurden verschiedene Dosisgrößen für die Zwecke des Strahlenschutzes eingeführt, von denen für unsere Betrachtung die Energiedosis und die Äquivalenzdosis relevant sind.

Die **Energiedosis  $D_E$**  gibt an, wieviel Energie  $E$  auf einen Körper pro Masseinheit  $m$  übertragen wird. Ganz allgemein lässt sich annehmen, dass die schädliche Wirkung umso größer ist, je größer die Energiedosis ist: (vgl. Stolz, 2005, S.153)

$$D_E = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dV}$$

Die Einheit ist  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$  (Gray).

Die biologische Wirkung ionisierender Strahlung wird allerdings nicht nur durch die übertragene Energie, sondern auch durch „die Strahlungsart, die zeitliche und räumliche Dosisverteilung, den untersuchten biologischen Effekt selbst, den physiologischen Zustand der bestrahlten Individuen und die Umgebungsbedingungen bestimmt“ (Stolz, 2005, S. 188). Eine weitere Dosisgröße, die

**Äquivalenzdosis  $H$** , berücksichtigt die Strahlungsart durch Einführen eines Strahlungs-Wichtungsfaktors  $w_R$  (auch *Qualitätsfaktor* genannt), welcher die Strahlungsqualität angibt. (vgl. Stolz, 2005, S. 189)

$$H = w_R \cdot D_E$$

Strahlungs-Wichtungsfaktoren hängen von der Strahlungsart und der kinetischen Energie der Teilchen ab. Für die drei wesentlichen Strahlungsarten sind die Strahlungs-Wichtungsfaktoren:

$$w_\alpha = 20 \quad w_\beta = 1 \quad w_\gamma = 1$$

Die Einheit der Äquivalentdosis ist  $1 Sv = 1 J/kg$  (*Sievert*). Man beachte, dass die Einheiten *Sievert* und *Gray* äquivalent zueinander sind. Die unterschiedlichen Bezeichnungen dienen lediglich der klaren Differenzierung zwischen Energie- und Äquivalenzdosis.

Aus der Äquivalenzdosis lassen sich weitere Dosisgrößen ableiten, die hier nicht alle genauer beleuchtet werden sollen. Von besonderer Relevanz für das Radonproblem ist lediglich die **Organ-Äquivalentdosis  $H_W$**  (auch *Organdosis*) - die Äquivalentdosis für ein einzelnes Organ. Sie ergibt sich aus

$$H_W = w_R \cdot D_{E,T}$$

wobei  $D_{E,T}$  der vom jeweiligen Körperteil bzw. Organ  $T$  absorbierten Energiedosis  $D_E$  entspricht.

Eine Möglichkeit, um aus Messungen Strahlenexpositionen zu berechnen, bieten sogenannte **Dosiskoeffizienten  $D_K$** , mit denen sich Expositionsgrößen in Dosisgrößen umrechnen lassen. Dosiskoeffizienten sind empirische Umrechnungsfaktoren, die von der Strahlenschutzverordnung festgelegt werden (vgl. Strahlenschutzkommission, 2017). Als Beispiel sei hier nur der Dosiskoeffizient für Rn-222 für geschlossene Wohnräume genannt, der  $D_{K,Rn} = 6,72 \frac{\mu Sv}{h} \cdot \frac{m^3}{kBq}$  beträgt. Nach

$$H_{W,Lunge} = D_{K,Rn} \cdot C$$

lässt sich hiermit aus der Aktivitätskonzentration  $C$  (Aktivität pro Volumenelement) die Organäquivalentdosis der Lunge  $H_{W,Lunge}$  berechnen. Zu beachten ist, dass solche Dosiskoeffizienten je nach betrachteter Dosiskonversion und zugrunde liegendem Berechnungsmodell variieren. Da Dosiskoeffizienten auf verschiedensten Abschätzungen (bspw. der Expositionszeit) basieren, sind sie mit Vorsicht zu betrachten. Im Allgemeinen ist der Zusammenhang zwischen Expositions- und Dosisgrößen hochkomplex und von vielfältigsten Faktoren abhängig, sodass Umrechnungen mithilfe von Dosiskoeffizienten vielen Fehlerquellen unterliegen.

## **STRAHLENSCHÄDEN**

Die durch ionisierende Strahlung entstehenden Schäden an einem Organismus werden in deterministische und stochastische Schäden unterschieden.

### ***Deterministische Strahlenschäden***

Diese Form der Strahlenwirkung ist erst ab bestimmten Strahlenexpositionswerten nachweisbar und bezeichnet im Allgemeinen Strahlenschäden in Folge von hohen Dosen. Das Schadensausmaß ist von der Dosis abhängig. Deterministische Schäden sind mit einer Häufung von Strahlenschadensereignissen verbunden, sodass oftmals eine **Schwellendosis** existiert. Je nach Zeitpunkt der Wirkung nach Strahlenexposition wird in **Frühschäden** und **Spätschäden** (Wirkungen, die erst

nach Wochen oder Jahren bemerkbar werden) unterschieden. „[Sie] können zu vorübergehenden oder andauernden Veränderungen von Gewebestrukturen und ihrer Funktion [...], zur langfristigen Beeinträchtigung der Lebensqualität sowie in schweren Fällen zum Tod des Individuums führen.“ (Krieger, 2019, S. 497)

Deterministische Strahlenschäden umfassen Schäden in Folge von

1. **Teilkörperexpositionen**, aufgrund derer bspw. Hautrötungen, Verbrennungen und Folgeschäden an besonders empfindlichen Körperregionen (z.B. Keimdrüsen, Knochenmark, Augenlinsen) entstehen (vgl. Krieger, 2019, S. 487 – 492).
2. **Ganzkörperexpositionen**, die zu vielen unterschiedlichen Reaktionen führen können, die sich am einfachsten anhand der applizierten Energiedosis  $D_E$  einteilen lassen (mit fließendem Übergang der Dosis-Wirkungsbereiche). Dies kann bei Blutbildveränderungen und Immunschwächungen anfangen (1 – 10 Gy), über die Zerstörung von Schleimhäuten und Darmwänden gehen (10 – 50 Gy) und bei sehr starker Bestrahlung (>100 Gy) auch Auswirkungen auf das Nervensystem, Kreislaufkollapse und den Tod innerhalb weniger Stunden nach sich ziehen. (vgl. Krieger, 2019, S. 492 ff.)

### **Stochastische Strahlenschäden**

Hierbei handelt es sich um Strahlenwirkungen, die bei niedrigeren Dosen auftritt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit, nicht aber der Schweregrad der Wirkungen, hängt von der applizierten Dosis ab. Sie führen zu Mutationen (=Veränderungen des Erbgutes) einzelner Zellen und können schwere Spätschäden entfalten. Es wird in zwei Formen stochastischer Strahlenwirkungen unterschieden:

1. **Somatische Schäden:** Eine mutierte Zelle im Organismus kann zur Stammzelle eines Tumors oder Leukämie werden. Tumorerkrankungen bilden sich nach einigen Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten aus.
2. **Genetische Schäden:** Diese können durch mutierte Keimzellen induziert werden. Es entstehen Genmutationen und Chromosomenschäden, welche an die Nachkommen weitervererbt werden. Chromosomenaberrationen (Veränderung der Chromosomenzahl) werden durch Doppelstrangbrüche der DNS erzeugt und sind mit schweren Beeinträchtigungen der Träger verbunden. (vgl. Krieger, 2002, S. 287)

### **NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION**

Es gibt verschiedenste radioaktive Quellen, die für die Strahlungsbelastung des Menschen verantwortlich sind. Diese Formen der Strahlenexposition werden in natürliche und **zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition** unterteilt. Letzteres umfasst primär Strahlung aus medizinischen Anwendungen (insbesondere Röntgendiagnostik) sowie aus kerntechnischen Anlagen. Im Folgenden soll nur auf **natürliche Strahlenexposition** genauer eingegangen werden. Unter natürlicher Strahlenexposition versteht man die ionisierende Strahlung, der der Mensch aufgrund natürlicher Strahlungsquellen konstant ausgesetzt ist. Sie bestimmt die untere Grenze menschlicher Strahlenexposition. Natürliche Strahlenexposition setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen:

#### **Externe Strahlenexposition**

Externe Strahlenexposition bezeichnet von außen auf den menschlichen Organismus einwirkende ionisierende Strahlung. Zum einen ist hier die **kosmische Strahlung** zu nennen, wobei neben galaktischer Strahlung und solarer Strahlung hier insbesondere die sekundäre kosmische Strahlung

erwähnenswert ist. Diese entsteht beim Auftreffen der primären kosmischen Strahlung auf die Atmosphäre und umfasst Pionen, Myonen, Elektronen und Nukleonen. Des Weiteren gibt es auch **terrestrische Strahlung** aus im Boden oder Baumaterialien natürlich angelagerten Radionukliden. Sie bilden den Großteil externer Strahlenexposition, wobei insbesondere das Radionuklid Kalium-40 sowie die Thorium- und Uranium-Umwandlungsreihen Hauptursachen sind.

Eine entscheidende Rolle für die Strahlenexposition des Menschen spielt die Dosisleistung im Inneren von Gebäuden, wo sie aufgrund erhöhter Aufenthaltszeiten stark zunimmt. Ein gutes Beispiel hierfür ist das bereits angesprochene Gas **Radon**, das sich in der Bodenluft ansammeln kann. Es entsteht aus der Alphaumwandlung von radioaktivem Radium, welches in Natursteinen und Baustoffen angelagert ist. Die Radonatome erfahren dabei einen ungewöhnlich hohen Rückstoß ( $E_{kin} \approx 100 \text{ keV}$ ), wodurch das Gas den Porenraum der Gesteine verlassen kann und somit konstant Radon aus dem Boden bzw. Baumaterialien an die Atmosphäre abgegeben wird (sog. **Radonexhalation**) (vgl. Stolz, 2005, S. 199 f.). Die Hauptursache für erhöhte Radonkonzentrationen in geschlossenen Räumen ist die Bodenluft (Baustoffe und Wasser als Radonquellen sind vergleichsweise vernachlässigbar), also Radonexhalation über undichte Bodenplatten, Rohrdurchführungen etc. aus dem Untergrund. Der Jahresmittelwert der Radonkonzentration beträgt in deutschen Wohnräumen durchschnittlich  $50 \text{ Bq/m}^3$ , kann jedoch in seltenen Fällen auf bis zu  $1000 \text{ Bq/m}^3$  ansteigen (vgl. Bundesamt für Strahlenschutz, 2016, S. 3). Damit ist Radon (insb. das vergleichsweise langlebige Rn-222-Isotop) mit einer Äquivalenzdosisleistung von  $1,1 \text{ mSv/a}$  die Hauptquelle für natürliche Strahlenexposition.

### **Interne Strahlenexposition**

Interne Strahlenexposition wird durch die Aufnahme von Radionukliden in den Körper durch Inhalation oder Nahrungsaufnahme verursacht. Die Radionuklide können sich im Körper an unterschiedliche Organsystemen anlagern und aufgrund der direkten Nähe zu Organen und Weichgewebe hohe Schäden verursachen (insbesondere die Alpha-Strahlung, die aufgrund ihrer kurzen Reichweite bei äußerer Strahleneinwirkung nicht schädlich ist, allerdings ein sehr hohes Ionisationsvermögen besitzt). Zu einem geringen Anteil zeichnen sich durch kosmische Strahlung erzeugte Nuklide für die interne Strahlenexposition verantwortlich. Die größten Beiträge hingegen liefern Kalium-40 sowie die Radon-222-Folgeprodukte. (vgl. Stolz, 2005, S. 191) Die Gefahr interner Strahlenexposition lässt sich ebenfalls gut am Beispiel von Rn-222 verdeutlichen: Das Strahlenrisiko durch Radon geht nicht primär vom Radon selbst, sondern vielmehr von seinen **Folgeprodukten** aus. Wie bereits erwähnt, entsteht bei der Rn-222-Umwandlung eine Reihe von kurzlebigen Folgenukliden, bei denen es sich um Schwermetalle handelt (Polonium, Bismut und Blei), die sich an **Aerosolen** und Raumwänden anlagern. Die Radionuklide können somit vom Menschen eingeatmet werden und gelangen so in die Lunge, wo sie wesentlich größere Strahlenschäden verursachen können als durch externe Strahlenexposition (Das Rn-222 selbst wird nur mit geringer Wahrscheinlichkeit eingeatmet und meistens wieder ausgeatmet, bevor eine Umwandlung stattfindet.). Dadurch kann in der Lunge eine ganze Reihe von radioaktiven Folgeprozessen stattfinden und ionisierende Strahlung ( $\beta^-$  und  $\alpha$ ) freigesetzt werden. Die Folge ist eine langanhaltende Belastung der Lunge, insbesondere durch Alphastrahlung, die nun aufgrund ihres Ionisationsvermögens eine

hohe Dosisleistung bedingt. Sie kann das Erbgut in den empfindlichen Zellen des Lungengewebes beschädigen und Krebserkrankungen hervorrufen. (vgl. Bundesamt für Strahlenschutz, 2016, S. 4)

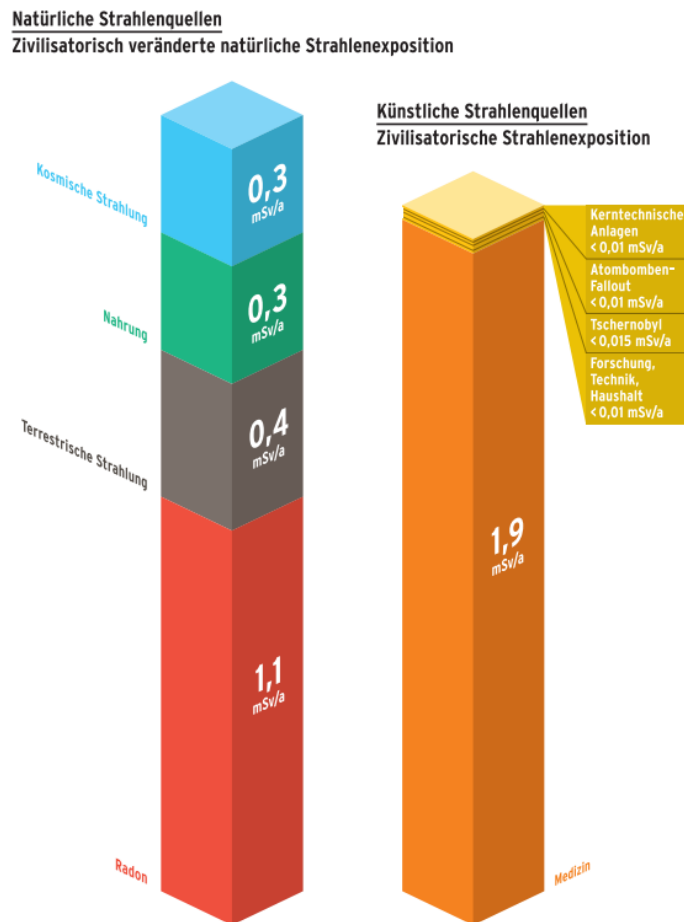


Abb. 5: Strahlenexposition des Menschen

Bundesamt für Strahlenschutz, 2016, S. 4

### 1.1.5 PRAKTISCHER STRAHLENSCHUTZ

Im Folgenden sollen praktische Strahlenschutzmaßnahmen genauer beleuchtet werden und diese auf Maßnahmen im Umgang mit der Radonexposition übertragen werden. Strahlenschutzrechtliche Aspekte werden nicht thematisiert.

#### ALLGEMEINE REGELN

Ziel des praktischen Strahlenschutzes ist es, die Strahlendosis exponierter Personen möglichst niedrig zu halten. Einen allgemeinen Ansatz zum Umgang mit externen Strahlenquellen liefern die als die **drei A's** des Strahlenschutzes bekannten Maßnahmen: (vgl. Krieger, 2019, S. 591 f.)

1. Die Verminderung der **Aufenthaltsdauer** im Strahlungsfeld ist die erste direkte Maßnahme, die es umzusetzen gilt und i. A. mit geringem Aufwand umsetzbar ist. Je nach Gegebenheiten lässt sie sich sowohl im beruflichen Umfeld (bspw. in der Medizin) als auch im Privaten (siehe im Folgenden die Radonbelastung) nur begrenzt realisieren.

2. Die zweite Maßnahme ist die Vergrößerung des **Abstandes** der exponierten Person zur Strahlenquelle, welche sich aus der Tatsache ergibt, dass für die Dosisleistung annähernd das Abstandsquadratgesetz gilt:  $\frac{dDE}{dt} \sim \frac{1}{R^2}$
3. Eine weitere Möglichkeit ist die Verminderung der Dosis durch **Abschirmungen** des Strahlungsfeldes. Durch die Abschirmung von der Strahlenquelle mithilfe von Absorbern mit möglichst hohem Stoßbremsvermögen (vgl. Kapitel 1.1.3), lässt sich die Strahlenintensität verringern. Beispiele hierfür sind Materialien aus Blei (dichtes Material mit sehr hoher Atommasse) oder die Verwendung von Wasser als Abklingbecken in Kernkraftwerken.

### **SCHUTZ VOR RADONBELASTUNG**

Wie bereits erwähnt kann sich das gasförmige Radon-222 aus der Bodenluft und Baumaterialien in Wohn- und insb. Kellerräumen ansammeln. Die schädigende Wirkung von Radon entfaltet sich dort primär durch interne Strahlenexposition (siehe Kapitel 1.1.4: natürliche Strahlenexposition) – also aufgrund der Tatsache, dass Rn-222 und seine Folgeprodukte in die Lunge gelangen können. Entsprechend ist es Ziel des Radonschutzes, eine Inkorporation der radioaktiven Nuklide zu vermeiden, indem die Radonkonzentration in geschlossenen Räumen mithilfe der Schutzmaßnahmen möglichst geringgehalten wird. Zu beachten ist, dass eine geringe Radonkonzentration in der Bodenluft unvermeidlich ist, und es jede Schutzmaßnahme lediglich zum Ziel haben kann, Wahrscheinlichkeiten zu minimieren. Die konkreten Maßnahmen, welche sich aus den drei A's und den Charakteristiken von Radon ableiten lassen, sind: (vgl. Bundesamt für Strahlenschutz, 2019, S. 28 ff.)

1. Beschränkung der Radonkonzentrationen auf Kellerräume, in denen die Aufenthaltszeit geringgehalten wird (z.B. durch Abdichten der Kellertüren)
2. Regelmäßige Belüftung der Räume, um die Radonkonzentration zu verringern.
3. Messung der Radonkonzentration, um die Notwendigkeit von Maßnahmen einschätzen zu können (aufgrund des stochastischen Charakters sind Langzeitmessungen, üblicherweise über ein Jahr, notwendig).
4. Bauliche Maßnahmen, die selbstständig umsetzbar sind: Abdichten von Wasser- und Heizungsleitungen (bspw. mit Silikon)
5. Radonsanierung des Gebäudes durchführen lassen. Diese kann umfassen
  - Abdichten der Eintrittswege des Radons (z.B. der Risse im Mauerwerk)
  - Absaugen der radonhaltigen Bodenluft mithilfe von Radondrainagen

Bei der Errichtung von Neubauten gelten bereits nach dem Strahlenschutzgesetz festgelegte Schutzmaßnahmen, auf die nicht genauer eingegangen werden soll.



## 1.2 LERNSCHWIERIGKEITEN

Im Folgenden werden Lernschwierigkeiten der Kernphysik diskutiert, unterteilt in aus Schülervorstellungen und aus kritischen Begriffen des Themengebiets entstehende Lernschwierigkeiten.

### 1.2.1 SCHÜLERVORSTELLUNGEN

Auffällig ist, dass Kernphysik ein Teilgebiet ist, das im sächsischen Lehrplan nicht wie viele andere Inhalte nach dem Spiralprinzip mehrmals behandelt, sondern erst spät in der 12. Klasse intensiv thematisiert wird (und ansonsten lediglich in der 9. Klasse angeschnitten wird, genaueres siehe Kapitel 3.1). Entsprechend wird Lernenden genügend Raum und Zeit geboten, (Fehl-)Vorstellungen zu Phänomenen wie Radioaktivität zu entwickeln. Diese bilden sich primär aus anderen Fächern oder den Medien, naheliegenderweise jedoch nicht durch direktes Erfahren. Die mangelnde Erfahrbarkeit der Radioaktivität ist primäre Ursache für Lernschwierigkeiten. Weitere Ursachen für allgemeine Lernschwierigkeiten sind die stochastische Natur der radioaktiven Strahlung sowie der enge rechtliche Rahmen, der einem experimentellen Zugang im Schulunterricht oftmals im Weg steht. Im Folgenden sollen die aus aktuellen Studien bekannten Schülervorstellungen beleuchtet werden: (vgl. Heinicke, 2014, S. 9 ff.)

**Natur von Radioaktivität:** Eine bekannte Schülervorstellung ist die Idee, dass es sich bei radioaktiver Strahlung um eine Form von Energie oder das Aussenden eines Gases handelt. Auch wird Radioaktivität oftmals als ein giftiger Stoff interpretiert, der als Krankheitserreger wirkt. Des Weiteren fällt Schüler:innen oft eine Differenzierung zwischen radioaktiver Strahlung und anderen Strahlungsarten schwer. So werden bspw. Handys und Mikrowellen als Strahlungsquellen benannt und es entsteht die Vorstellung, dass es sich bei aus radioaktiven Umwandlungen entstehender Strahlung lediglich um eine besonders intensive und somit gefährliche Strahlung handelt. Ebenfalls bekannt ist die Schülervorstellung, dass sich Strahlung lediglich auf lebende Organismen auswirkt sowie die Schwierigkeit, Quellen von radioaktiver Strahlung zu benennen.

**Wirkung von Strahlung:** Weiterhin liegt die bekannte Lernschwierigkeit vor, dass Lernende Probleme damit haben, die relevanten Begriffe Radioaktivität, Strahlung und radioaktives Material voneinander zu trennen. Dies geht mit der lehrbedingten Schülervorstellung einher, dass Strahlung mit dem Transport von radioaktivem Material gleichgesetzt wird, die Strahlung also selbst radioaktiv ist. Ursache ist der übliche und fälschliche Gebrauch des Begriffes *Radioaktive Strahlung* (genauerer siehe nächstes Kapitel). Die Vorstellung der Strahlung als Strahler kann des Weiteren zu der Idee führen, dass ein bestrahltes Objekt selbst zwangsläufig radioaktiv wird. So wird die aus Ionisationsprozesse innerhalb der Materie entstehende Sekundärstrahlung als eine Art Übertragung von Radioaktivität missverstanden. Deutlich davon abzugrenzen ist die Erscheinung, dass sich radioaktive Partikel auf Gegenständen absetzen können – ein gänzlich anderes Phänomen das fälschlicherweise oft als Auswirkung ionisierender Strahlung missverstanden wird.

**Gefährdung durch Radioaktivität:** Eine weitere typische Schülervorstellung ist die Idee, dass Radioaktivität zwangsläufig gefährlich oder tödlich ist. Natürliche Quellen von Radioaktivität sind oftmals unbekannt und es wird angenommen, dass lediglich zivilisatorisch bedingte Radioaktivität auftritt. Auch medizinische Anwendungen sind vor der Behandlung im Schulunterricht weitgehend unbekannt. Um diesen Schwierigkeiten entgegenzuwirken, muss deutlich gemacht werden, dass

wir Menschen ständig von radioaktiven Materialien umgeben sind und es Sache der Natur ist, dass ionisierende Strahlung auf unseren Körper trifft oder sogar in ihm selbst Kernumwandlungen stattfinden. Die Behandlung natürlicher Strahlenexposition – insbesondere kosmischer Strahlung – sowie das Ins-Verhältnis-Setzen von Dosisgrößen oder der Aktivität können dabei helfen, die Angst vor Radioaktivität zu nehmen und Radioaktivität als mögliche Gefahrenquelle sinnvoll zu relativieren. Oftmals wird bei der Einschätzung des Gefahrenpotentials nach der Strahlungsquelle differenziert. So wird bspw. angenommen, dass natürliche Radioaktivität grundsätzlich nicht schädlich ist und Röntgenstrahlung ungefährlich ist, da sie ja für medizinische Zwecke genutzt wird. Sobald jedoch bspw. Atomkraftwerke oder sonstige zivilisatorische Anwendungen Strahlungsursache sind, wird die Strahlung als hochgefährlich eingeschätzt. Auch hier muss auf den stochastischen Charakter sowie die Dosis verwiesen werden.

**Ausbreitung radioaktiver Strahlung:** Bezüglich der Ausbreitung radioaktiver Strahlung gibt es verschiedenste Schülervorstellungen. Im Allgemeinen wird die Ausbreitung von der Mehrheit der Schüler:innen als allseitig und gleichmäßig angenommen. Für die Ausbreitung am Hindernis gibt es jedoch unterschiedlichste Vorstellungen, die im Folgenden kurz benannt werden sollen: (vgl. Heinicke, 2014, S. 12)

1. Strahlung durchdringt das Hindernis ungehindert
2. Strahlung durchdringt das Hindernis, verändert währenddessen jedoch ihre Ausbreitungsweise/Eigenschaften.
3. Strahlung umgeht das Hindernis
4. Strahlung wird durch Hindernisse aufgehalten
5. Strahlung dringt abhängig vom Material unterschiedlich weit in das Hindernis ein und kann dort verschwinden. Bei geringer Massedichte kann das Hindernis auch durchdrungen werden. Weder der stochastische Charakter noch eine qualitative Form des Schwächungsgesetzes ist den Lernenden nach ihren Präkonzepten bekannt. Hier besteht stattdessen die Vorstellung, dass Strahlung einen Körper entweder durchdringen kann oder nicht.

Insgesamt gehen Lernende mit sehr wenig Vorwissen über Radioaktivität in den Unterricht. In Kombination mit vielen ungenauen, nicht fachlichen Informationsquellen sowie der durch fehlende Erfahrbarkeit erschwerten Vorstellungsmöglichkeiten können vielfältige und meist sehr unkonkrete Fehlvorstellungen entstehen, denen in der Unterrichtspraxis gezielt entgegengewirkt werden muss.

## 1.2.2 ANALYSE KRITISCHER BEGRIFFE

**Umwandlung und Zerfall:** Der Begriff *Radioaktiver Zerfall* wird im normalen Sprachgebrauch und Schulbüchern häufig verwendet. Allerdings ist er irreführend und kann Fehlvorstellungen verursachen: Er impliziert, dass ein Atomkern in seine Bestandteile auseinanderfällt und kann deswegen von Schüler:innen schnell mit Kernspaltung gleichgesetzt werden („*Beim Alpha-Zerfall spaltet sich der radioaktive Kern in einen Tochterkern und einen Heliumkern auf*“). Gleichzeitig entsteht die Idee, dass eine Stoffmenge radioaktiver Materie über einen langen Zeitraum, im Sinne des Zerfallsgesetzes, auseinanderfallen und letztlich verschwinden würde. Stattdessen findet jedoch eine Umwandlung zu neuen Nukliden statt („*Der instabile Atomkern wandelt sich unter Emission von Alphastrahlung in einen stabilen Zustand und damit in ein anderes Nuklid um*“). Entsprechend ist darauf zu achten, die Begriffe Radioaktive Umwandlung, Umwandlungsgesetz, Umwandlungsreihe etc. zu verwenden. Selbst bei der Alpha-Umwandlung (die noch am ehesten dem Begriff *Zerfall* gerecht wird) ist es zur Vermeidung der hier beschriebenen Lernschwierigkeiten empfehlenswert, von einer Umwandlung zu reden.

**Radioaktive Strahlung:** Wie bereits erwähnt, kann hiermit die Idee entstehen, dass ionisierende Strahlung selbst radioaktiv ist und zwangsläufig die Materie, auf die sie trifft in radioaktives Material umwandelt. Stattdessen sollte die vollständige Bezeichnung *Strahlung aus radioaktiven Quellen* verwendet werden. Zu beachten ist, dass diese kein Synonym für Ionisierende Strahlung ist: Es gibt ionisierende Strahlung, die nicht aus radioaktiven Quellen stammt (bspw. Röntgenstrahlung) (vgl. Schecker et. al., 2018, S. 232). Der Prozess der radioaktiven Umwandlung muss hier deutlich vom Prozess der Bestrahlung selbst getrennt werden. Insbesondere ist darauf zu achten, die Kausalkette zu verdeutlichen: Der Prozess der Radioaktivität (1.) führt zur Emission von ionisierender Strahlung (2.), welche andere Atome ionisieren kann (3.).

**Nuklid:** Der Begriff Nuklid sollte eindeutig definiert und bewusst im Unterricht angewendet werden. Bei einem Nuklid handelt es sich um eine Atomart, die eindeutig durch die Anzahl an Protonen und Neutronen im Atomkern definiert ist. Schwierigkeiten mit dem Begriff können dadurch induziert werden, dass *nuklear* und *radioaktiv* von Lernenden gleichgesetzt wird. Somit entsteht die Vorstellung, dass Nuklide keine „normalen“ Elemente sind wie sie im Periodensystem stehen, sondern entartete und damit radioaktive Versionen davon. Nuklear bedeutet lediglich „*Den Atomkern betreffend*“ – eine weitere Begriffsdefinition, die den Lernenden gegenüber deutlich gemacht werden sollte.

### 1.3 SACHSTRUKTUR DER ESCAPE STORY

Im Folgenden wird das Radonproblem strukturiert aufbereitet und hinsichtlich der Wirkungskette von Radon elementarisiert. Die Wirkungskette soll dabei sachlogisch den Weg von kernphysikalischen Grundlagen, aus denen sich die Eigenschaften von Radon-222 ableiten lassen bis hin zur Wirkung von Radon auf den menschlichen Körper einschließlich der daraus ableitbaren Maßnahmen erklären. Bei der Beschreibung der Wirkungskette liegt insbesondere ein Schwerpunkt darauf, die Verknüpfung der einzelnen Schritte zu verdeutlichen. Die thematisierten Schritte zur Beschreibung der Radon-Wirkungskette sind im Schaubild dargestellt (siehe Abb. 6) und werden im Folgenden gemeinsam mit den einhergehenden didaktischen Reduktionen kurz erläutert.

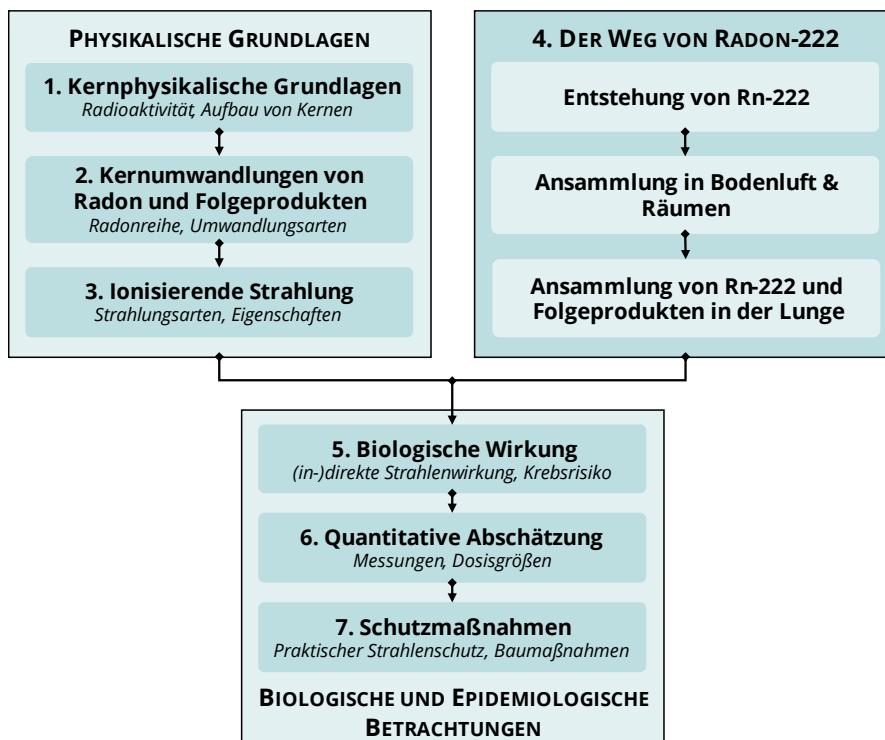


Abb. 6: Sachstruktur des Radonproblems

**1. Kernphysikalische Grundlagen:** Voraussetzung für die Auseinandersetzung mit den folgenden Schritten ist ein Verständnis der wesentlichen Grundlagen der Kernphysik. Dies umfasst Kenntnis über den Aufbau von Nukliden und dem grundlegenden Phänomen Radioaktivität. Bindungsenergien und das Tröpfchenmodell müssen nicht detailliert beleuchtet werden, um die Kernumwandlungen der Radonreihe verstehen zu können.

**2. Kernumwandlungen der Radonreihe:** Konkret anhand der Radonreihe lassen sich die Alpha- und Betaumwandlungen sowie das Aufstellen von Kernumwandlungsgleichungen beleuchten. Zu diesem Zweck wird auch die Nuklidkarte interpretiert. Die Umwandlungsgleichungen bieten eine sinnvolle Überleitung zu der bei den Umwandlungen entstehenden ionisierenden Strahlung. Bei der Betaumwandlung kann auf eine Betrachtung des Neutrinos verzichtet werden, da es für den hier thematisierten Kontext keine Rolle spielt.

**3. Ionisierende Strahlung:** Die ionisierende Strahlung und deren Wechselwirkung mit Materie spielt eine wesentliche Rolle für das Verständnis des Radonproblems. Hierbei wird nur auf die  $\alpha$ - und  $\beta^-$ -Strahlung eingegangen, während auf eine Betrachtung der für die qualitative Abschätzung der Strahlenrisiken unerheblichen  $\gamma$ -Strahlung verzichtet werden kann. Die Wirkung wird anhand der Teilcheneigenschaften verständlich gemacht. Bei der Betrachtung der Reichweite der Strahlung soll auf das Einführen von Größen wie das Bremsvermögen oder die Eindringtiefe sowie das Reichweitengesetz verzichtet werden. Stattdessen findet hier aus Reduktionszwecken lediglich eine qualitative Betrachtung statt.

**4. Der Weg von Radon-222:** Der Weg von Radon-222 kann sachlogisch anhand seiner Teilschritte vermittelt werden (entsteht aus in Steinen und Baustoffen angelagerten Radium, sammelt sich anschließend in der Bodenluft und geschlossenen Räumen an und gelangt dann mit seinen Folgeprodukten über Aerosolanlagerungen in die menschliche Lunge). In diesem Rahmen werden auch natürliche Strahlenquellen und die Relevanz von Radon betrachtet sowie das Krankheitsrisiko angedeutet, um das folgende Kapitel zu motivieren.

**5. Biologische Wirkung:** Aufgrund der Komplexität der biologischen Prozesse ist in diesem Abschnitt eine recht umfangreiche didaktische Reduktion vonnöten. Eine Behandlung von direkter und indirekter Strahlenwirkungen auf molekularer Ebene sowie der Entstehung von Radikalen genügt für ein Verständnis des Wirkungsprozesses, der zu Änderungen der Molekülstruktur und des Erbguts und damit auch der Entstehung von Krebszellen führen kann. Eine genauere Beleuchtung der strahlenbiologischen Wirkungskette oder der chemischen Prozesse würde den Rahmen der Escape Story sprengen. Gleichmaßen ist auch eine Behandlung der verschiedenen Arten von Strahlenschäden nicht notwendig für das weitere Verständnis.

**6. Quantitative Abschätzung:** Zur quantitativen Betrachtung von Strahlenwirkungen können entweder Expositionsgrößen wie die Aktivität oder Strahlendosisgrößen herangezogen werden. Da die Auswirkungen der ionisierenden Strahlung auf den menschlichen Körper abgeschätzt werden sollen, ist auch das Einführen von Letzterem sinnvoll. Dabei soll lediglich auf die konkret für das gegebene Problem relevanten Dosisgrößen eingegangen und diese mithilfe von Dosiskoeffizienten berechnet werden, um ein Verständnis für die physikalischen Größen und deren Zusammenhang zu fördern. Die Messung von ionisierender Strahlung könnte einen eigenen Inhaltsbereich bilden (einschließlich technischer Aspekte), soll an dieser Stelle jedoch kein Thema sein.

**7. Strahlenschutzmaßnahmen:** Aus der quantitativen Abschätzung der Strahlungsbelastung in Folge des Radonproblems ergibt sich die Notwendigkeit von Vorsorgemaßnahmen. Im letzten Kapitel findet eine Thematisierung von praktischen Strahlenschutzmaßnahmen, welche sich aus den vorher erlangten Erkenntnissen ableiten lassen, statt.

## 2 DIDAKTISCHES POTENTIAL DIGITALER ESCAPE ROOMS

Ein Escape Room (auch Live Escape Game) ist ein ursprünglich als reines Unterhaltungsangebot eingesetztes Gruppenspiel, welches üblicherweise physisch stattfindet. Dabei werden Personengruppen in einen geschlossenen realen Raum versetzt, in dem sie eine Reihe von Rätseln lösen müssen, um das Spiel zu meistern. Ziel ist es dabei, dem Raum zu entkommen, indem bspw. Codewörter gefunden oder Schlösser geknackt werden. Abgesehen davon, dass Escape Rooms für Unterhaltungszwecke dienen, werden mit ihnen auch verschiedenste Kompetenzen der Teilnehmenden trainiert (kombinatorisches und logisches Denken, Extrahierung der relevanten Informationen, Teamarbeit, Geschicklichkeit, ...). Um sich der didaktischen Funktion von Escape Rooms zu nähern, soll vorerst der Überbegriff der Gamification thematisiert und die Übertragbarkeit der Elemente und Ziele von Gamification auf das konkrete Format des digitalen Escape Rooms diskutiert werden. Anschließend werden entsprechende Gestaltungsprinzipien von Escape Rooms sowie ihre Umsetzbarkeit im Schulkontext und in digitaler Form abgehandelt.

### 2.1 GAMIFICATION UND LERNSPIELE

Der Ansatz von Gamification besteht darin, Design-Elemente aus Spielen in einem spielfremden Kontext einzubetten. Eine für unsere Zwecke sinnvolle Arbeitsdefinition liefern Zichermann und Cunningham (2011). Nach ihnen ist Gamification der Prozess des „*Spielendens*“ sowie die Verwendung von Spielmechaniken, um Nutzer:innen für das Erlebnis zu engagieren und zur Problemlösung zu motivieren (vgl. Zichermann & Cunningham, 2011, S. XIV). In dieser Definition schlägt sich bereits die Zielsetzung von Gamification nieder, die im Folgenden anhand der speziellen Form des Lernspiels konkretisiert werden soll.

Lernspiele sind Gamification-Formen, die sich der spielerischen und damit (zumindest theoretisch) motivierenden Aufbereitung von Lerninhalten widmen. Dabei werden die folgenden Charakteristiken von Spielen aufgegriffen: (vgl. Meier & Seufert, 2003, S. 3)

1. Eine Geschichte, die einen Rahmen bietet und mithilfe spannungsinduzierender Elemente intrinsische Motivation beim Spielenden erzeugen möchte.
2. Spielregeln, die den Ablauf steuern und damit den Spielrahmen aufspannen.
3. Die Gestaltung einer Ausgangssituation oder Spielumgebung, die eine aktive Beteiligung des Spielenden und damit Formen der Selbststeuerung einfordert.
4. Die Abwesenheit von Zweckgebundenheit, womit das Spiel einerseits zu einer freiwilligen Handlung wird und andererseits keinen *äußeren* Zweck bietet. Somit hat ein Spiel entweder seinen Zweck *in sich selbst* oder ist gar vollständig zweckentbunden.

Insbesondere der letzte Punkt wird bei der Umsetzung von Lernspielen notwendigerweise und gezielt aufgebrochen: Die zugrundeliegende Idee ist der Versuch, äußere Zwecke wie bspw. konkrete Lerninhalte, die der Spielende verstehen muss, in einen dem Spiel inhärenten Zweck zu übersetzen (nach dem Schema *Ich lerne nicht für die Schule, sondern für das Spiel*). Damit lassen sich Lernspiele als Aktivitäten definieren, „deren Inhalte, Struktur und Ablauf in pädagogischer Absicht und auf der Grundlage didaktischer Prinzipien gestaltet sind, die zugleich aber zentrale Merkmale von Spielen enthalten“ (Meier & Seufert, 2003, S. 3). Ebendiese didaktischen Prinzipien sollen in den folgenden Kapiteln konkret aus den Merkmalen von Escape Rooms abgeleitet werden.

Vorerst stellt sich aus den bisherigen Betrachtungen die Frage, auf welche Weise die spielerischen Elemente nun eine Auseinandersetzung mit den Lerninhalten fördern, bzw. konkret die Motivation der Spielenden steigern. Um sich dieser Frage zu nähern, soll kurz die Theorie der psychologischen Grundbedürfnisse als Subtheorie der Selbstbestimmungstheorie nach Deci und Ryan (Deci & Ryan, 1993, S. 229 ff.) angerissen werden. Die Theorie der psychologischen Grundbedürfnisse beschreibt psychologische Ressourcen, die für das Wohlbefinden im Allgemeinen notwendig sind und spezifiziert diese in drei Grundbedürfnisse: Kompetenzerleben, Autonomieerleben sowie das Erleben sozialer Eingebundenheit. Im Folgenden soll anhand der Beschreibung der drei psychologischen Grundbedürfnisse verdeutlicht werden, inwiefern Lernspiele ebendiese adressieren.

### ***Kompetenzerleben***

„Kompetenzerleben äußert sich im natürlichen Bestreben des Individuums, sich als handlungsfähig zu erleben“ (Krapp, 2005, S. 635). Damit drückt sich Kompetenzerleben durch das Erfahren von Effektivität und Erfolg in der Interaktion mit der gegebenen Herausforderung aus. Lernspiele bieten ein strukturiertes und durch Regeln begrenztes Umfeld, in dem sich der Spielende gezielt bewegt. Ein solcher strukturierter Kontext kann, genauso wie auch ein angemessenes Maß an Herausforderungen, das Kompetenzerleben fördern. Ein wesentliches Merkmal von Gamification ist eine Form von Kompetenzfeedback (typischerweise durch Belohnungen, Punkte, Bestenlisten etc.) das dazu dient, Erfolgserlebnisse zu verstärken – ebenfalls ein wirkungsvoller Mechanismus, um das Kompetenzerleben zu befördern (vgl. Sailer, 2016, S. 115 f.).

### ***Autonomieerleben***

„Das Bedürfnis nach Autonomie oder Selbstbestimmung repräsentiert das natürliche Bestreben, sich als eigenständiges Handlungszentrum zu erleben“ (Krapp, 2005, S. 635). Dieses Bedürfnis wird dadurch erfüllt, dass der Handelnde innerhalb seiner Möglichkeiten sein Handeln selbstständig bestimmen kann. Lernspiele unterstützen ebendies, indem sie eine Handlungsfreiheit für die Herangehensweise an Herausforderungen bieten, oder sie zumindest simulieren, indem der Spielende sich selbstständig eine Lösung für die Problemstellungen sucht – auch wenn letztlich nur ein Weg zum Ziel führt. Dem Autonomieerleben steht die Begrenzung der Spielregeln und damit eine Einschränkung von Freiheiten nicht zwingend konträr entgegen: Durch eine eingegrenzte Spielumgebung, innerhalb derer sich der/die Spielende gezielt und in Grenzen autonom bewegen kann, kann ein unmittelbares Autonomieerleben durch Wahlmöglichkeiten und konkretisierte Entscheidungsfreiheiten induzieren. Ebenfalls förderlich kann ein Spiel-Narrativ sein, welches Nutzer:innen eine spannende Handlung und damit auch einen Grund für das eigene Engagement bietet. Auf diese Weise werden der Bearbeitung von Aufgaben Bedeutsamkeiten zugeschrieben, die das Autonomieerleben verstärken (vgl. Sailer, 2016, S. 120).

### ***Erleben sozialer Eingebundenheit***

Dieses Bedürfnis beschreibt das Bestreben nach Sozialkontakten, der Akzeptanz und Anerkennung durch andere und der Möglichkeit zur Identifikation mit Personen(-gruppen) (vgl. Krapp, 2005, S. 636). Dies impliziert auch das Bedürfnis nach Zuwendung, zwischenmenschlicher Interaktion und einem Gefühl von Eingebundenheit. Im Rahmen von Lernspielen bieten sich zwei Formen an, um dieses Bedürfnis zu adressieren: Der offensichtliche Ansatz ist der des gemeinsamen Spielens – entweder durch Mitspieler in Gruppen oder durch eine Form von Wettbewerb, bei denen Spielende miteinander interagieren. Eine weitere, insb. für digitale Lernspiele relevante Form ist

die des NPCs (*non-playable characters*), also fiktive Personen in der Spielwelt. Diese können mit den Spielenden interagieren, sie vor Herausforderungen stellen und genauso wie Narrative Momente der Relevanz erzeugen (vgl. Sailer, 2016, S. 123).

Diese Merkmale von Lernspielen deuten bereits das didaktische Potential an. Der theoretische didaktische Mehrwert von Lernspielen soll in Kapitel 2.3 anhand des Einsatzes von Escape-Room-Lernspielen im Schulunterricht konkretisiert werden. Im Folgenden werden Gestaltungsprinzipien von Escape Rooms vorgestellt, um diese im 3. Kapitel im Rahmen der Gestaltung der Escape Story und der didaktisch-methodischen Begründung aufzugreifen.

## 2.2 GESTALTUNG VON ESCAPE ROOMS

Escape Rooms zeichnen sich durch die folgenden Gestaltungsmerkmale aus:

- **Übergeordneter Rahmen:** Das meist sequenziell aufgebaute Escape Game wird von Beginn an mit einem übergeordneten Ziel versehen: Dem Entkommen (*Escape*) aus dem Raum, in dem das Spiel selbst stattfindet. Dieser rote Faden verknüpft die einzelnen Spielelemente und gibt eine allgemeine Zielorientierung, einen (konstruierten) praktischen Zweck und bildet damit die Motivation für das Absolvieren der Herausforderungen. Meistens gibt es eine Zeitvorgabe, eine Überwachung durch Kameras und eine Möglichkeit, von außen in das Spiel einzugreifen.

- **Rekursive Segmentierung:** Das Erlebnis wird in Teilherausforderungen zerlegt, welche nach und nach gelöst werden müssen. Das Bewältigen einer Herausforderung ist oftmals die Bedingung, um das nächste Rätsel beginnen zu können und sich dem Ziel zu nähern.

*Bsp.: Der Schlüssel für die Tür ist in einer Kiste, die selbst erst mit einem Code geöffnet werden muss. Dieser versteckt sich in einem Bilderrätsel, dessen Bestandteile erst im Raum ausgemacht werden müssen und nur im Dunklen sichtbar sind. Dafür muss ein kryptischer Hinweis gefunden werden, aus dem die Teilnehmer nach korrekter Interpretation herauslesen, dass sie den Lichtschalter bedienen sollen, welcher selbst ebenfalls gut versteckt ist.*

Diese Herangehensweise dient gleichzeitig als Motivationsschleife: Ein übliches Spielszenario bietet eine Herausforderung, vor die der Spieler gestellt wird, eine Lösung, die es zu erarbeiten gilt, sowie eine Belohnung. Diese Belohnung ist im Falle von Escape Rooms die Möglichkeit, die nächste Herausforderung anzugehen, sodass eine weitere Lösung erarbeitet und eine weitere Belohnung erreicht werden kann – bis hin zum definierten Endziel. (vgl. Wiemker, Elumir & Clare, 2015, S. 3 f.)

- **Vielseitige Gestaltung:** Durch die Segmentierung des Spiels können die Teilherausforderungen in verschiedenster Form stattfinden und unterschiedliche Wahrnehmungsebenen adressieren. In einem Escape-Room-Durchgang werden Rätsel vielfältigster Form bearbeitet (Logik- und Puzzlerätsel, versteckte Codes oder Hinweise finden, Kommunikationsaufgaben, Kombinatorisches Denken, geschickte Interaktion mit Objekten), die gleichermaßen unterschiedliche Kompetenzen fordern und fördern.
- **Immersion:** Abgesehen davon, die Teilnehmer:innen vor Herausforderungen in Form von Rätseln zu stellen, ist es ein weiteres Ziel von Escape Rooms, ein immersives Erlebnis zu generieren. Dies bedeutet, dass sich die Spielenden an einer fesselnden und einnehmenden Aktivität beteiligen, sodass sie äußere Einflüsse vergessen und vollständig in das Spielerlebnis eintauchen. Der Zustand, in den die Spielenden idealerweise versetzt werden soll, wird auch als willentliches



Aussetzen der Ungläubigkeit bezeichnet und kann durch eine entsprechende Gestaltung erzeugt werden. Notwendig dafür ist ein Thema, das dem Escape Room zugrunde liegt. Dies kann eine Geschichte sein, in die das Erlebnis eingebettet ist oder die über den Verlauf des Escape Games vorangetragen wird. Es kann sich allerdings auch um ein Gestaltungsthema handeln, nach dem der Escape Room entworfen wird (bspw. optische Gestaltung des Raumes und der Hinweise), um eine glaubwürdige Spielumgebung sowie Konsistenz zwischen den einzelnen Spielelementen zu kreieren. (vgl. Wiemker, Elumir & Clare, 2015, S. 11)

- **Verzweigung:** Die einzelnen Herausforderungen selbst sind nicht zwingend linear angeordnet und meistens müssen mehrere Hinweise miteinander verknüpft werden, um nach und nach ein Gesamtbild der Herausforderung und Lösung zu erhalten. Die Kombination von Teilelementen, um die anfangs mysteriöse und scheinbar unlösbare Ausgangssituation zu verstehen und schrittweise eine Vorstellung des Gesamten zu erhalten macht einen Großteil der Motivation von Escape Rooms aus. Für die Erstellung von Rätselpfaden gibt es allgemein 3 Ansätze: (vgl. Wiemker, Elumir & Clare, 2015, S. 8)
  - **Linear:** Rätsel werden sequenziell hintereinander abgearbeitet und die Lösung eines Rätsels bedingt die Bearbeitung des nächsten Rätsels.
  - **Offen:** Es sind mehrere Rätsel vorhanden, die in beliebiger Reihenfolge bearbeitet werden können. Üblicherweise findet am Ende ein abschließendes Rätsel statt, für dessen Lösung alle gesammelten Hinweise aus den vorangegangenen Rätseln inkludiert werden müssen.
  - **Multilinear:** Sowohl lineare als auch offene Pfade werden kombiniert, um ein komplexes Rätselnetz zu bilden. Damit entsteht die zusätzliche Herausforderung, dass die Teilnehmer:innen sich einen Überblick über die Gesamtsituation verschaffen und herausfinden müssen, welche Rätsel aufeinander aufbauen, welche bereits bearbeitet werden können und für welche noch die notwendigen Hinweise fehlen.
- **Hinweise:** Ein optionales Gestaltungselement von Escape Rooms ist die Bereitstellung von Hinweisen. Diese dienen dazu, Sackgassen zu vermeiden, die die Spieler:innen am Fortsetzen des Spiels hindern. Insbesondere dadurch, dass das letztendliche Erfolgserlebnis den Teilnehmer:innen andernfalls verwehrt werden kann, ist die Implementierung von Hinweisemechanismen empfehlenswert. Diese kann in unterschiedlichen Formen umgesetzt werden: (vgl. Wiemker, Elumir & Clare, 2015, S. 10)
  - **Frei zugänglich:** Die Hinweise sind für die Teilnehmer:innen frei zugänglich und können selbstgesteuert genutzt werden
  - **Durch Spielleiter:** Es gibt Spielleiter:innen, die das Escape Game von außen überwachen. Sie entscheiden, wann sie eingreifen und den Spieler:innen Hinweise geben
  - **Auf Anfrage:** Die Spieler:innen können bei den Spielleiter:innen Hinweise anfragen
  - **Begrenzt:** Es darf nur eine festgesetzte Anzahl an Hinweisen angefragt werden
  - **Verdiente Hinweise:** Durch bestimmte Erfolge (bspw. gelöste Rätsel) können sich die Spieler:innen die Möglichkeit auf Hinweis Anfragen verdienen.
  - **Belohnung/Bestrafung:** Die Spieler:innen müssen als Gegenleistung für Hinweise Bestrafungen hinnehmen (bspw. weniger Zeit). Alternativ kann auch die geringe Nutzung von Hinweisen belohnt werden (bspw. Bestenliste oder zusätzliche Belohnung, falls man keine Hinweise benötigte).

Im Folgenden soll auf die Anwendbarkeit von Escape-Room-Formate im Schulunterricht sowie deren didaktischer Mehrwert eingegangen werden.

## 2.3 EINSATZ IM UNTERRICHT

Die Charakteristik von Escape Rooms legt bereits nahe, dass sie auch einen didaktischen und pädagogischen Mehrwert bieten und das Konzept auf die Gestaltung von Lehrszenarien sinnvoll übertragbar sein kann. Dies begründet sich insbesondere darin, dass mit ihnen verschiedenste grundlegende Transversalkompetenzen geschult werden können, die im herkömmlichen Fachunterricht oftmals keinen Raum finden. Weiterhin dienen die Gestaltungsprinzipien von Escape Rooms dazu, entsprechende Grundbedürfnisse zu adressieren, um einen hohen Motivationsgrad zu erzeugen (siehe Kapitel 2.1). Es gibt bereits den Escape Rooms ähnliche Lehrformen, die die Klasse in Gruppen unterteilen, welche in Teamarbeit Rätsel bearbeiten, um bspw. eine Kiste zu öffnen. Diese Unterrichtsmethode wird im Bildungskontext als **Breakout** bezeichnet<sup>5</sup>. Beim Breakout werden typischerweise allgemeine Grundkompetenzen (Teamfähigkeit, logisches Denken, ...) geschult, anstatt fachspezifische Lehrinhalte zu vermitteln. Konkret findet bei der Verwendung von Escape Rooms im Schulunterricht eine implizite Didaktisierung statt, indem Lernaufgaben in einen spielerischen Rahmen eingebettet werden. Die Verwendung von Escape-Room-Konzepten im Schulunterricht ist damit eine Form von Gamification, weswegen sich hier die didaktischen Vorteile von Lernspielen aufgreifen lassen: (nach Kapp, 2013)

1. **Engagement:** Lernspiele sind zwingend interaktiv und erfordern vom Lernenden, selbstständig Entscheidungen zu treffen und aktiv zu werden. Während eine Lehrkraft auch ohne Einwirken der Lernenden mit der Vermittlung fortsetzen kann fordert ein Lernspiel das Engagement des Lernenden und motiviert dieses gleichzeitig.
2. **Implizite Lernerfolgskontrolle:** Einem Lernspiel liegt ein Spielzyklus zugrunde, der als Lernwegsteuerung dient. Es generiert eine **Motivation** (Herausforderung), die ein **Verhalten** der Spielenden induziert. Als Reaktion auf das Verhalten wird eine **Rückmeldung** gegeben, die wiederum eine Motivation erzeugt. Im Fall der Escape Rooms wird der Spielzyklus durch die rekursive Segmentierung (siehe Kapitel 2.2) generiert.
3. **Multimedialität:** Die Vermittlung und Verarbeitung der Informationen können über verschiedene didaktisch-methodische Ansätze und unter Verwendung unterschiedlicher Medien stattfinden. Dieser Aspekt ist insbesondere bei einer digitalen Umsetzung, welche den Medienpool um verschiedenste Elemente erweitern kann, von entscheidender Relevanz.
4. **(Sichere) Simulation:** Ein Spiel simuliert eine Umgebung, innerhalb der sich die Lernenden bewegen und – je nach Gestaltung – tief eintauchen können. Diese Simulation kann im Vergleich zu einer realen Umgebung eingeschränkt, didaktisch reduziert oder auch um bestimmte (unrealistische) Elemente erweitert werden. Insbesondere kann sie ein sicheres Umfeld anbieten, in der sich die Spielenden frei und ohne das Auslösen von schädlichen Folgen ausprobieren können. Ein anschauliches Beispiel hierfür sind in medizinischen Ausbildungen verwendete digitale Lernspiele, in denen chirurgische Eingriffe virtuell trainiert werden können. Allgemein eröffnen besonders digitale Formen hinsichtlich dieses Aspekts vielfältige Möglichkeiten.

---

<sup>5</sup> Ein Beispiel hierfür sind die Breakout EDU Materialien von <https://breakoutedu.com/>

**5. Adaptivität und Adaptierbarkeit:** Der hohe Interaktionsgrad ermöglicht des Weiteren Adaptierbarkeit. Dies bedeutet, dass die Spielenden Elemente des Spiels selbstgesteuert anpassen können und damit bspw. Herausforderungsgrade steuern oder Hinweise einschalten können. Insbesondere im Falle digitaler Lernspiele ist ein weiterer Aspekt die Adaptivität, also die Möglichkeit des Spielsystems, sich dem/der Spieler:in anzupassen und bspw. automatisiert weitere Hinweise einzuschalten, sobald das System feststellt, dass der/die Spieler:in nicht vorankommt (Rückmeldung auf Verhalten). Die Implementierung von adaptiven Elementen ist mit stark erhöhtem Programmier- und Arbeitsaufwand verbunden und aus diesem Grund kein Teil der im Laufe dieser Arbeit entwickelten Escape Story.

## 2.4 DIGITALE UMSETZUNG EINES ESCAPE ROOMS

Das Schema des Escape Rooms wurde bereits in verschiedenster Form digital umgesetzt. So gibt es unterschiedlichste Adventure-Videospiele und VR-Simulationen, die das Konzept aufgreifen und dabei oft auch den Gruppenaspekt auflösen und von Einzelnen bearbeitet werden. Auch für Lehrzwecke wurden bereits digitale Formen umgesetzt. Eine solche Lehrform ist spielerisch und fördert problemorientiertes und motivierendes Unterrichten. Die digitale Form eines Escape Rooms fußt teils auf anderen Gestaltungsprinzipien und unterscheidet sich hinsichtlich einiger Gesichtspunkte entscheidend von der Live Escape Story.

Bereits erwähnte Vorteile sind Adaptivität, sichere Simulation und Multimedialität. Des Weiteren ermöglicht die Digitalisierung die Überwindung von zeitlichen und räumlichen Grenzen (vgl. Schöftner, Traxler, Zuliani, 2020, S. 10), sodass Lernende das digitale Lernspiel auch an außerschulischen Orten oder zu selbst gewählten Zeitpunkten bearbeiten können. Auch in der Bearbeitung selbst kann jeder Lernende bzw. jede Lerngruppe in ihrem eigenen Lerntempo arbeiten und zeitlich flexibel bleiben.

Auf der anderen Seite bietet der digitale Rahmen auch Nachteile, die bei der Gestaltung berücksichtigt werden müssen: In erster Linie können Begrenzungen in vermittelbaren Kompetenzen sowie in Methodik und Umsetzbarkeit auftreten. So erweist sich bspw. die Vermittlung motorischer Kompetenzen oder auch das klassische Experimentieren als schwierig. Hier müssen Alternativen in Form von Simulationen gefunden werden, die meistens mit Einschränkungen verbunden sind. Ebenfalls ist bei einer rein digitalen Form keine situative Steuerung durch die Lehrkraft möglich und meist ein hoher Arbeitsaufwand für die Erstellung notwendig.

All die Einschränkungen können durch **Blended Learning** adressiert werden. Dies bedeutet, dass digitale Lerninhalte mit Präsenzunterricht verknüpft oder in diesen eingebettet werden. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, dass die Lehrkraft situativ eingreifen kann und klassische didaktische Methodiken zielführend eingebunden werden.

## 3 PLANUNG UND GESTALTUNG DER ESCAPE STORY

In diesem Kapitel werden Planung und Gestaltung der Escape Story vorgestellt. Dazu wird eine Lehrplananalyse vorgenommen und davon ausgehend Lernziele für das Modul aufgestellt. Anschließend wird die Umsetzung der Escape Story beschrieben, indem die Struktur und der Inhalt beschrieben werden und die zugrundeliegenden Gestaltungsprinzipien beschrieben und didaktisch-methodisch begründet werden.

### 3.1 LEHRPLANANALYSE

Im Folgenden wird die Kernphysik in den sächsischen Lehrplan für Gymnasien für das Fach Physik eingeordnet und anschließend Lernvoraussetzungen herausgestellt, um die Zielgruppe für die Escape Story abzuleiten. Dazu werden auch der Chemie- und Biologielehrplan betrachtet.

#### 3.1.1 LEHRPLANEINORDNUNG DER KERNPHYSIK

Die Kernphysik wird nach dem sächsischen Lehrplan für Gymnasien erst in der zwölften Klasse näher behandelt. Der Grundkurs bettet die Kern- und Atomphysik gemeinsam in den letzten Lernbereich der Oberstufe **GK12 LB4: Strahlung aus Atomhülle und Atomkern**, welcher 20 Unterrichtsstunden umfasst, ein. Es werden erst atomphysikalische Grundlagen vermittelt (Atommodelle, Energieaustausch, Absorption und Emission) und anschließend die im Folgenden beschriebenen Lernziele zur Kernphysik behandelt: (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 43 f.)

Unter dem Lernziel „*Kennen der Radioaktivität als Naturerscheinung*“ werden Isotope und ihre Kenngrößen, die Eigenschaften der drei wesentlichen Strahlungsarten ( $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ ) sowie Kernumwandlungsgleichungen behandelt. Anschließend werden Kernprozesse energetisch betrachtet (Bindungsenergien, Massendefekt und Kernspaltung) und unter dem Lernziel „*Kennen von Phänomenen und der technischen Nutzung radioaktiver Strahlung*“ eine zeitliche Betrachtung radioaktiver Umwandlungen vorgenommen, also das Zerfallsgesetz und die Aktivität radioaktiver Stoffmengen behandelt sowie zu diesem Zweck Größen wie die Halbwertszeit und Zerfallskonstanten eingeführt.

Im Leistungskurs findet in einem eigenen Lernbereich eine Auseinandersetzung mit der Atomphysik statt. Hierauf folgend wird die Kernphysik im Lernbereich **LK12 LB6: Eigenschaften der Atomkerne**, für welchen 17 Unterrichtsstunden eingeplant sind, behandelt. Der Leistungskurs-Lehrplan unterscheidet sich hinsichtlich folgender Gesichtspunkte vom Grundkurs: (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 60)

Die Themengebiete werden detaillierter und unter Lernzielen höherer Taxonomiestufen behandelt. Die (In-)Stabilität von Atomkernen wird ausführlicher anhand des Tröpfchenmodells diskutiert. Des Weiteren werden Nachweismöglichkeiten von Strahlung (Blasenkammer & Geiger-Müller-Zählrohr) sowie Quellen natürlicher Radioaktivität beleuchtet. Die Kenntnisse über die zeitliche Betrachtung von radioaktiven Umwandlungen werden anhand der Anwendung auf die Altersbestimmung von Gesteinsarten vertieft und die Eigenschaften und Wechselwirkungen von ionisierender Strahlung mit Materie detaillierter betrachtet (Abklingverhalten, Absorptionsvorgänge). Insbesondere wird sowohl die Äquivalenzdosis als auch Strahlenschutzmaßnahmen behandelt und

der Lernbereich mit dem Lernziel „*Sich positionieren zu Chancen und Risiken der Nutzung der Radioaktivität*“ abgeschlossen.

Abgesehen von der Oberstufe wird Kernphysik und Radioaktivität kaum im sächsischen Schulunterricht behandelt. Eine Ausnahme bildet der Lernbereich **KI9 LB2: Energieversorgung**, in dem die Nutzung von Kernenergie behandelt wird und dabei bereits die Begriffe Proton, Neutron und Kernbindungskräfte eingeführt werden (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 27), sowie der Wahlbereich in der neunten Klasse *KI9 WB1: Natürliche Radioaktivität*, in dem tatsächlich das Radonproblem in den Bemerkungen erwähnt wird (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 29). Für das Radonproblem findet jedoch in diesem Unterrichtsmodul eine detaillierte Betrachtung statt, für die Grundlagen vorausgesetzt werden, die erst in späteren Klassenstufen geschaffen werden (siehe nächstes Kapitel). Entsprechend soll eine Orientierung am Physiklehrplan der Oberstufe stattfinden.

### 3.1.2 LERNVORAUSSETZUNGEN UND ZIELGRUPPE

Die erwähnten Lernvoraussetzungen werden im Physik-Lehrplan in verschiedenen Lernbereichen geschaffen (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a) und umfassen:

- Grundlegende Kenntnisse über die Atomphysik, den Aufbau von Atomen und ihre Bestandteile (*GK12 LB4: Strahlung aus Atomhülle und Atomkern*)
- Grundlagen der Elektrostatik: Kennen der Größe elektrische Ladung und der Coulombkraft (*KI7 LB1: Kräfte*, *GK11 LB4: Geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern*)

Auch innerhalb der Kernphysik werden Vorkenntnisse vorausgesetzt, auf denen der Kurs aufbaut (*GK12 LB4: Strahlung aus Atomhülle und Atomkern*) (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 43 f.). Die folgenden Inhalte werden in der Escape Story wiederholt und gefestigt, aufgrund der Rahmenbedingungen jedoch nicht intensiv behandelt, sodass die Schüler:innen bereits damit in Kontakt gekommen sein sollten:

- Kennen der Radioaktivität als Naturerscheinung
- Charakterisierung von Nukliden mit A, Z und N
- Kennen der Strahlungsarten und ihrer Eigenschaften
- Aufstellen von Kernumwandlungsgleichungen

Des Weiteren ist, insbesondere um die Auswirkung der Radonbelastung auf den menschlichen Körper beleuchten zu können, ein Blick in den Biologie-Lehrplan notwendig. Notwendige Voraussetzung für ein Verständnis der Radon-Wirkungskette sind Kenntnisse über den grundlegenden Aufbau der menschlichen Zelle, welche nach dem sächsischen Biologielehrplan für Gymnasien in der 11. Klasse in *GK11 LB1: Zellen, Gewebe und Organe und deren funktionsbezogene Differenzierung* vermittelt werden (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019b, S. 35). Konkret wird das grobe Kennen des Zellaufbaus vorausgesetzt, sodass die notwendigen Begriffe in der Escape Story fließend verwendet werden können. Ebenfalls sollten die Lernenden mit dem Aufbau chemischer Elemente und deren Kennzeichnung in Kontakt gekommen sein, was im sächsischen Chemielehrplan für Gymnasien allgemeiner Unterrichtsinhalt ist (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019c).

Aus den erwähnten Lernvoraussetzungen lässt sich bereits die Zielgruppe der Escape Story herleiten: Das Unterrichtsmodul adressiert Abiturient:innen, die die entsprechenden benannten Kompetenzen mitbringen, um sich mit dem Kontext der Radonbelastung auf Grundkursniveau auseinandersetzen zu können. Zielgruppe sind entsprechend Schülerinnen und Schüler der Oberstufe Physik Grundkurs Gymnasium, die bereits ersten Kontakt mit den Grundlagen der Kernphysik hatten. Die Escape Story soll gleichermaßen zur Wiederholung der kernphysikalischen Grundlagen und Erarbeitung von Radioaktivität und ihren Auswirkungen anhand der Radonbelastung dienen.

## **3.2 LERNZIELE**

Im Folgenden wird die mit dem Escape-Room-Format einhergehende Kompetenzorientierung des Unterrichtsmoduls dargelegt und anschließend die Lernziele der Escape Story aufgestellt.

### **3.2.1 KOMPETENZORIENTIERUNG**

Durch die Verwendung von Escape-Room-Methoden sollen die folgenden fachunspezifischen Transversalkompetenzen trainiert werden:

- Das logische Denken der Teilnehmer:innen
- Die Teamfähigkeit
- Die Fähigkeit zum Erschließen und Aufbereiten von Informationen
- Die Fähigkeit, komplexere (physikalische) Probleme zu rekonstruieren

Weiterhin liegt der Gestaltung der Escape Story das Ziel zugrunde, nach Möglichkeit alle Kompetenzebenen der Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife (vgl. Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen, 2020) zu adressieren. Im Folgenden soll erläutert werden, durch welche Inhalte, Methoden und Gestaltungsprinzipien eine Schulung innerhalb der jeweiligen Kompetenzbereiche erreicht werden soll. Anschließend werden konkrete kompetenzorientierte Lernziele abgeleitet.

#### ***Sachkompetenz***

*Methoden und Theorien zur Bearbeitung von Aufgaben und Problemen nutzen:* Die Kenntnisse über das Phänomen der Radioaktivität werden innerhalb des Kurses gefestigt, indem strahlungs-physikalische Grundlagen wiederholt werden. Diese müssen des Weiteren genutzt werden, um die Ausgangssituation – das angedeutete Radonproblem – zu rekonstruieren und ein tieferes Verständnis zu generieren. Im Konkreten werden die Kenntnisse genutzt, um Umwandlungsgleichungen zu lösen, die Zerfallskette von Radon herzuleiten und biologische Auswirkungen auf Basis der bekannten physikalischen Eigenschaften der radioaktiven Strahlungsarten abzuschätzen.

#### ***Erkenntnisgewinnungskompetenz***

*Fragestellungen und Hypothesen auf Basis von Beobachtungen und Theorien bilden:* Die Lernenden werden bereits zu Beginn mit einer unkonkreten Hypothese konfrontiert, die es zu überprüfen gilt. Aus dieser wird die Fragestellung identifiziert, die die Escape Story antreibt: Was steckt hinter dem Radonproblem und wie gefährlich ist es wirklich? Die Escape Story soll dabei einen durch den Kontext eingerahmten, abgeschlossenen Prozess der Erkenntnisgewinnung ermöglichen.

### **Kommunikationskompetenz**

Die Kommunikationskompetenz hat für die Escape Story eine besondere Gewichtung, da die Methode des Escape Rooms selbst im Allgemeinen primär diese Kompetenzebene adressiert. Verstärkend kommt der Gruppenaspekt bei der Bearbeitung der Escape Story hinzu.

*Informationen erschließen:* Es müssen relevante Informationen aus gegebenen Texten und Darstellungen selektiert und miteinander vernetzt werden. Dabei handelt es sich nicht nur um die Informationen zum physikalischen Sachverhalt, die schrittweise gesammelt werden, sondern auch um Informationen und Hinweise für die Bearbeitung der Rätsel, welche sich nicht ausschließlich auf physikalische Probleme beziehen.

*Informationen aufbereiten:* Die Informationen werden schrittweise semantisiert, um ein Gesamtbild des Escape-Story-Kontextes zu erlangen. Weiterhin müssen gefundene Hinweise korrekt zugeordnet und interpretiert werden, um die Herausforderungen zu lösen.

*Informationen austauschen und wissenschaftlich diskutieren:* Übergeordnetes Ziel der Escape Story ist es, dass die Lernenden Argumentationsketten erarbeiten können, um dazu in der Lage zu sein, das Radonproblem sowie Schutzmaßnahmen und rechtliche Aspekte diskutieren und die Risiken differenziert abschätzen zu können.

### **Bewertungskompetenz**

*Sachverhalte und Informationen multiperspektivisch beurteilen:* Der Sachverhalt der Radonbelastung wird hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte physikalischer, biologischer und praktischer Art beleuchtet, um ein abschließendes Bild zu erhalten, aus dem sich Risiken sowie die Sinnhaftigkeit ausgewählter Schutzmaßnahmen beurteilen lassen.

*Entscheidungsprozesse und Folgen reflektieren:* Die erworbenen Kenntnisse sollen abschließend genutzt werden, um Folgen der Radonbelastung zu reflektieren, auf den Alltag zu übertragen und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

## **3.2.2 LERNZIELE**

Die Lernziele der Escape Story bauen auf den vorangegangenen Betrachtungen der Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife (vgl. Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen, 2020) sowie des Lernbereichs *Strahlung aus Atomhülle und Atomkern* des Grundkurses Physik Klasse 12 (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 43 f.) auf. Aufgrund der Vertiefung eines solch konkreten Kontextes werden auch Themen aus dem Physikleistungskurs – insbesondere Strahlenschutzmaßnahmen und Dosisgrößen – behandelt (vgl. Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung, 2019a, S. 60).

Es ergeben sich die folgenden sachkompetenzorientierten Lernziele, wobei jedem Schritt der Sachstruktur (siehe Kapitel 1.3) ein Lernziel zugeordnet wurde:

Die Schüler:innen ...

- S 1 können das Phänomen der Radioaktivität erklären.
- S 2 nutzen ihre Kenntnisse über den Aufbau von Atomkernen und die Umwandlungsarten, um Kernumwandlungsgleichungen aufzustellen.
- S 3 kennen die Eigenschaften von Alpha- und Beta-Strahlung.
- S 4 verstehen, weswegen Radon-222 den größten Teil zur natürlichen Strahlenbelastung beiträgt.
- S 5 kennen die biologische Wirkung von ionisierender Strahlung.
- S 6 kennen die Bedeutung von Strahlendosisgrößen.
- S 7 können Maßnahmen zum Schutz vor Radon beurteilen.

und die weiteren Lernziele<sup>6</sup>:

Die Schüler:innen ...

- L 1 trainieren anhand von Escape-Room-Rätseln ihr logisches Denken.
- L 2 trainieren anhand der gemeinsamen Bewältigung von Herausforderungen ihre Teamfähigkeit.
- L 3 können Informationen erschließen und interpretieren, um Logikrätsel zu lösen.
- L 4 wenden ihre Kenntnisse über das Radonproblem an, um Risiken einzuschätzen.
- L 5 reflektieren und beurteilen die Folgen der Radonbelastung.

### 3.3 STRUKTUR UND INHALT DER ESCAPE STORY

Die einzelnen Escape-Story-Kapitel und ihre Herausforderungen sowie die Rahmenhandlung sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Der Kontext der Escape Story ist die Radonbelastung in Deutschland. Dieser wird innerhalb der vorgegebenen Geschichte erforscht, ausgehend von einer spannungsinduzierenden Prämisse und mit wenig Hintergrundinformationen. Im Gegensatz zu typischen Escape Storys sollen die notwendigen Lehrinhalte während der Escape Story vermittelt werden, um schrittweise ein Gesamtbild des Phänomens zu erlangen.

#### **Struktur**

Die Escape Story ist linear aufgebaut. Sie besteht aus sechs Kapiteln bzw. Teilherausforderungen, welche sich inhaltlich an der Sachstruktur des Radonproblems orientieren (siehe Kapitel 1.3). Die Kapitel werden nach und nach freigeschaltet, indem eine vorhergegangene Aufgabe gelöst wird und dadurch ein Schlüssel ermittelt wird. Die einzelnen Herausforderungen sind in drei Phasen unterteilt:

---

<sup>6</sup> Erwähnenswert ist, dass die hier aufgelisteten Lernziele mit Vorsicht zu betrachten sind, da sie i.A. nicht im Rahmen der Escape Story überprüfbar sind. Genaueres zur Überprüfbarkeit der Lernziele siehe Kapitel 5.2



1. **Erzählung:** Zu Beginn jeder Herausforderung wird die Erzählung vorangetrieben und es ist bei einigen Kapiteln ein Audiolog zu hören. In diesem fasst ein Unbekannter die Ergebnisse der vorherigen Herausforderung(en) zusammen, trägt mit seinen Kommentaren die Geschichte voran und gibt einen Auftrag, welcher das Rätsel des jeweiligen Kapitels darstellt.
2. **Informationsvermittlung:** Es werden in multimedialer Form Informationen und Hinweise gegeben, die dem *Inventar* der Spielenden hinzugefügt werden. Diese enthalten sowohl Lehrinhalte als auch für die erfolgreiche Bearbeitung der Aufgaben notwendige Hinweise. Einige der zur Verfügung gestellten Materialien können/müssen auch für spätere Aufgaben wiederverwendet werden.
3. **Aufgabenteil:** Hier wird das vorgegebene Rätsel mithilfe der gesammelten Informationen bearbeitet. Durch das Lösen des Aufgabenteils erlangt man einen Schlüssel, der für das Vorankommen in der Escape Story notwendig ist. Die Rätsel sind teilweise mehrschrittig gestaltet. Die Spielenden müssen selbstständig die Informationen und Hinweise sammeln und kombinieren, um die Rätsel zu lösen.

### **Erzählung**

Die Geschichte ist in der Kleinstadt Kirchberg (Landkreis Zwickau in Sachsen) angesiedelt, welche sich, wie sich am Ende der Escape Story herausstellen wird, in einem Radonvorsorgegebiet befindet. Die Spielenden werden in die Rolle eines Jugendlichen versetzt, der mit seiner Familie nach Kirchberg zieht und dort in einem Zimmer im Untergeschoss wohnt. Die Hauptfigur bekommt von einem Unbekannten, der während der gesamten Geschichte anonym bleibt und aus unbekanntem Gründen einige Informationen über sie hat, eine kryptische Nachricht. Diese umfasst eine Mail und einen Audiolog, welcher die Warnung enthält, dass es in dem Kellerzimmer gefährlich sei und bereits auf Radon-222 hindeutet. Des Weiteren enthält die Nachricht einen Auftrag, der gleichermaßen das Rätsel des ersten Kapitels ist. Im Laufe der Escape Story muss die Hauptfigur die jeweiligen Aufträge lösen und bekommt immer wieder neue Aufträge und Informationen vom Unbekannten. Die sechs Aufträge verlangen von der Hauptfigur, sich mit der Radonbelastung auseinanderzusetzen, um zu verstehen, was der Unbekannte mit seiner Warnung meinte. Schrittweise wird das Bild vom Radonproblem immer klarer, während der Unbekannte Hilfestellungen gibt, bis letztendlich deutlich wird, dass die Radonkonzentration in dem Zimmer einen gefährlich hohen Wert angenommen hat. Am Ende der Escape Story erfährt die Hauptfigur, wie sie sich vor Radon schützen kann und ergreift gemeinsam mit ihrer Familie die entsprechenden Maßnahmen, damit das Zimmer im Untergeschoss bewohnbar ist. Während die Geschichte in Textform und über Audiologs erzählt wird, stellen die jeweiligen Rätsel bzw. Aufgaben dazwischen, die die Spielenden in der Rolle der Hauptfigur lösen müssen, den interaktiven Teil der Escape Story dar.

Im Folgenden werden die sechs Kapitel der Escape Story genauer beschrieben und die jeweiligen sachkompetenzorientierten Lernziele angegeben (siehe Kapitel 3.2.2). Eine Übersicht über die Rätsel (mit Lösungsweg, Lösung usw.) befindet sich im *Anhang A 1*.

#### **1. Die Umwandlung von Radon (S 1, S 2)**

Bei der ersten Informationsvermittlung handelt es sich um eine kurze Zusammenfassung der Grundlagen der Kernphysik (Aufbau und Kennzeichnung von Nukliden, Radioaktivität, Kernumwandlungsarten). Die erste Aufgabe wird eindeutig formuliert und lautet „*Berechne die drei nachfolgenden Umwandlungsprodukte von Radon-222*“. Zusätzlich zur Informationsvermittlung, die

erklärt, wie Umwandlungsprodukte ermittelt werden können, wird den Lernenden ein interaktiver Nuklidkartenausschnitt zur Verfügung gestellt, aus denen neben zusätzlichen Informationen die Umwandlungsarten der jeweiligen Nuklide abgelesen werden kann. Die Elementsymbole der Umwandlungsprodukte ergeben gemeinsam das erste Codewort.

### **2. Die Strahlung der Radonumwandlung (S 3)**

Im Informationsteil stellen sich die Alpha- und Beta-Strahlung in Form von Briefen vor. Hier werden ihre Eigenschaften beschrieben und die Wirkung bei externer Strahlenexposition angerissen. Das Rätsel ist zweiteilig und für jede Strahlungsart soll ein Codewort ermittelt werden. Das erste Codewort versteckt sich visuell in einem Video von Nebelkammeraufnahmen. Das zweite Codewort ergibt sich aus einem im Informationsteil versteckten Logikrätsel, in dem logische Aussagen miteinander kombiniert werden müssen. Es wird ein erstes Fazit gezogen: Die Radonumwandlung ist ungefährlich, da es sich nur um Alpha- und Betaumwandlungen handelt und diese bei externer Strahlenexposition nahezu keine schädliche Wirkung auf den menschlichen Körper haben.

### **3. Der Weg von Radon (S 4)**

Den Lernenden wird ein Ausschnitt aus einem Paper des Bundesamtes für Strahlenschutz zur Verfügung gestellt (Bundesamt für Strahlenschutz, 2016, S. 1-5). In diesem wird die Ansammlung von Radon in der Bodenluft und der Weg in die menschliche Lunge erklärt. In einer Abbildung wird ein Zahlenrätsel eingebaut, aus dem sich der Code extrahieren lässt, sobald man einen Hinweiszettel, der in älteren Informationsteilen hinterlegt ist, findet. Der Hinweiszettel bietet Gleichungen, deren logische Kombination bei Anwendung auf die Abbildung zum Code führt.

### **4. Die biologische Wirkung von Radon (S 5)**

Mithilfe einer Präsentation über die biologische Wirkung ionisierender Strahlung wird über das Risiko der Radonbelastung und mögliche Folgeschäden informiert. Dabei wird auf direkte und indirekte Strahlenwirkung sowie auf die Entstehung von Krebszellen eingegangen. Hier muss ein Anagramm gelöst werden. Als Zwischenschritt dafür muss eine in der Präsentation verschlüsselte Telefonnummer decodiert und angerufen werden. Die Teilnehmenden hören dort einen Hinweis über die Mailbox, der den Suchraum für das Anagramm eingrenzt. Die Herausforderung ist auch ohne das Anrufen der Telefonnummer lösbar, wird dadurch jedoch wesentlich anspruchsvoller.

### **5. Die Radondosis (S 6)**

Der Hauptfigur wird ein Radondetektor zur Verfügung gestellt, mit dem die Aktivitätskonzentration von Radon-222 gemessen werden kann. Des Weiteren enthält eine unsortierte Zettelsammlung Informationen über Expositions- und Dosisgrößen, die miteinander verknüpft werden müssen, um das Rätsel zu lösen. Es soll erst mithilfe der Interaktion mit dem Radondetektor über Klicks die Aktivitätskonzentration gemessen werden und diese anschließend mithilfe eines angegebenen Dosiskoeffizienten in die Organ-Äquivalentdosis umgerechnet werden. Aus dem Lösen dieser Aufgabe ergibt sich, dass die Radonkonzentration innerhalb des Zimmers den Schwellenwert überschreitet und entsprechend von einer hohen Radonbelastung auszugehen ist.

### **6. Schutz vor Radon (S 7)**

Im Informationsteil wird ein Zeitungsartikel über die Festlegung von Radonvorsorgegebieten zur Verfügung gestellt sowie ein Informationsvideo, das Schutzmaßnahmen gegen die Radonbelastung beschreibt. Hier besteht das Rätsel aus dem Finden und Decodieren eines Morsecodes, der

über alle bisherigen Audiodateien und das Video verteilt ist. Die nötigen Informationen zur Entschlüsselung des Codes sind über einen im Zeitungsartikel versteckten Link zugänglich. Nach Abschließen des letzten Kapitels ergreift die Hauptfigur die entsprechenden Schutzmaßnahmen.

### **Zusammenfassung**

Die Escape Story endet mit einer Zusammenfassung, die die wesentlichen *Take-Home-Messages* der Escape Story formuliert. Hier werden die Charakteristiken von Radon-222 kurz rekapituliert, der stochastische Charakter von Strahlenschäden betont und Möglichkeiten zum Schutz sowie aktuelle Maßnahmen in Deutschland zusammengefasst. Des Weiteren werden weiterführende Materialien verlinkt (Radon-Handbuch, um sich genauer über Schutzmaßnahmen zu belesen, Informationen über Radonmessungen sowie das interaktive BfS-Geoportal, in dem man sich die Verteilung der Radonkonzentration und Radonvorsorgegebiete anzeigen lassen kann).

## **3.4 GESTALTUNG UND DIDAKTISCH-METHODISCHE BEGRÜNDUNG**

Im Folgenden werden die Vorüberlegungen zur Gestaltung der Escape Story dargelegt und die Gestaltungsentscheidungen didaktisch-methodisch begründet.

### **Interesse am Lerngegenstand**

Den im Folgenden dargelegten Gestaltungsprinzipien liegt das wesentliche Ziel zugrunde, das *Interesse* am Lerngegenstand zu fördern. Nach der Person-Gegenstands-Konzeption nach Krapp, 1998 ergibt sich Interesse aus der Interaktion zwischen dem Lernenden und der gegenständlichen Umwelt – in diesem Fall konkret das Escape-Room-Spiel mit seinen Regeln und Erzählrahmen. Um das Interesse am Lerngegenstand zu erzeugen, müssen allgemein zwei Voraussetzungen erfüllt sein (vgl. Krapp, 1998, S. 186): Einerseits muss eine hohe subjektive Wertschätzung des Gegenstandsbereiches vorliegen, bspw. in Form von einer hoch eingeschätzten Relevanz des Lerngegenstands oder durch Neugierde, andererseits ist „[eine positive] Einschätzung der emotionalen Erfahrungen [...] während der Interessenhandlung“ (Krapp, 1998, S. 186) notwendig. Das digitale Lernspiel als solches bietet einen geeigneten Rahmen, um letztere Bedingung zu adressieren: Es simuliert eine Umwelt, innerhalb derer die spielerische Interaktion mit Interessengegenständen notwendig gemacht wird und auf diese Weise ein Bezug zu ihnen hergestellt werden kann. Der Interaktionsspielraum ist im Lernspiel im Vergleich zu herkömmlichem Unterricht erweitert und kann den Spielenden die Möglichkeit eröffnen, ihre Interessenhandlungen selbstständig zu lenken. Auch die in Kapitel 2.1 beschriebenen psychologischen Grundbedürfnisse sind ein wesentlicher Grundstein für die Interessengenese (vgl. Krapp, 1998, S. 193 ff.). Um nun die Bedingungen zur Erzeugung von Interesse zu erfüllen, ist es einerseits Ziel der Gestaltung der Escape Story, die Relevanz der Thematik entweder herauszustellen oder mithilfe der Geschichte zu simulieren. Andererseits sollen die Erfahrungen während der Interaktion mit dem Interessengegenstand positiv belegt werden, indem die in Kapitel 2.3 beschriebenen Gestaltungsmöglichkeiten aufgegriffen werden, um eine anhaltende Bereitschaft zur Auseinandersetzung mit den Lerngegenstand zu generieren.

### ***Narrativ und Ziel***

Zu Beginn der Escape Story wird der Lernende in eine Ausgangssituation versetzt, die er schrittweise analysieren und bewältigen soll. Dafür wird er von einem Unbekannten gewarnt, dass es aufgrund von Radon in seinem Zimmer gefährlich sei. Ziel der Escape Story ist es somit nicht, einem virtuellen Raum zu entkommen, sondern sich über die Radonbelastung zu informieren und ihr zu "entkommen". Dadurch wird der Lehrinhalt in einen Kontext versetzt (*Radonbelastung*) und eine Zielorientierung (Helmke, Schrader, 2009) gegeben (*Wie schütze ich mich davor?*) So wird eine Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit den Inhalten suggeriert. Um Neugierde und Interesse zu wecken, soll die Kontaktperson als eine mysteriöse und auf dem ersten Blick nicht vertrauenswürdige Informationsquelle dargestellt werden. Auf diese Weise soll bei den Lernenden das Bedürfnis bestärkt werden, sich selbst ein Bild der Sachverhalte erarbeiten zu wollen und den Wahrheitsgehalt der Anfangsinformationen zu überprüfen. Zwischen jedem Kapitel der Escape Story findet ein Kontakt mit dem Unbekannten statt. Dies soll der Escape Story eine klare Struktur verleihen und jedes Mal Momente der Relevanz erzeugen (vgl. Kapitel 2.2: Erleben sozialer Eingebundenheit). Ein weiteres wesentliches Ziel der Geschichte ist das Erzeugen von Immersion. Dies wird einerseits über detailliertere Beschreibungen und Ausgestaltungen der Erzählungen (unter anderem mit Bildern, die eine Repräsentationsfunktion für die simulierte Umgebung erfüllen) und andererseits durch die Erzählform induziert. Um den Spielenden soweit wie möglich in die Handlung einzubinden, wird die "Du-Perspektive" verwendet (vgl. Sambor, 2004, S. 6), bei der die Spielenden mit der Hauptfigur gleichgesetzt werden. Dies dient gleichermaßen der Möglichkeit zur Identifikation mit dem Handlungstragenden und simuliert auf diese Weise eine Form der sozialen Eingebundenheit (vgl. Kapitel 2.2: Erleben sozialer Eingebundenheit). Ein weiterer, der Gestaltung der Erzählung zugrundeliegende Aspekt ist der Versuch, die Geschichte spannend und dennoch so einfach wie möglich zu halten, damit sie nicht von den Lehrinhalten ablenkt oder am Ende den Schüler:innen sogar eher im Gedächtnis bleibt als die eigentlichen Sachverhalte. Die Erzählung soll primär nur dazu dienen, das Interesse an der Auseinandersetzung mit den Inhalten und Herausforderungen zu fördern, indem ihnen Relevanz verliehen wird.

### ***Mediale Gestaltung***

Die Form des Unterrichtsmoduls als digitaler Escape Room ermöglicht verschiedene mediale Gestaltungsansätze, die zum Zwecke der Medien- und Methodenvielfalt möglichst breitgefächert ausgenutzt werden sollen. Insbesondere die Lehrinhalte sollen mithilfe unterschiedlichster Medien vermittelt werden, wobei zwischen rezeptiven Medien, die der Informationsvermittlung und -darstellung dienen und interaktiven Medien, die das selbstgesteuerte Lernen der Spieler:innen unterstützen, unterschieden wird. Auf diese Weise sollen die Medien nicht nur als Lerngegenstände mit Lehrinhalt dienen, sondern auch Mechanismen zur Aktivierung der Lernenden zu subjektiven Handlungen bereithalten.

Ein Großteil der Lehrinhalte wird in Textform vermittelt, bei der fachlicher Hintergrund zusammengefasst und didaktisch aufbereitet dargelegt wird. Dabei werden Gestaltungsrichtlinien nach Langer, von Thun & Tausch, 2019 aufgegriffen (Einfachheit, Gliederung, Prägnanz und Anregende Zusätze). Beispielsweise werden im ersten Kapitel in einer Zusammenfassung von Radioaktivität und Kernumwandlungen die Informationen durch visuelle Hilfsmittel wie farbliche und räumliche Abgrenzungen gegliedert und strukturiert und besonders auf die Kürze und Prägnanz der Aussagen

geachtet. Die Nuklidkarte wird mit anregenden zusätzlichen Informationen versehen, die besondere Merkmale der jeweiligen Elemente herausstellen.

Mehrfach werden Bilder verwendet, die mehrheitlich Symbolfunktionen oder Zeigefunktionen erfüllen und einfache bildhafte Vorstellungen vermitteln sollen (vgl. Kircher, Girwidz & Häußler, 2020, S. 311). Um verschiedenste Sinnesebenen anzusprechen, werden des Weiteren auditive (Audiologs der Kontaktperson), visuelle (Nebelkammeraufnahmen) und audiovisuelle (Lehrvideo zu Strahlenschutz) Medien verwendet.

Zu den interaktiven und teilweise adaptiven Medien zählt bspw. eine Präsentation im vierten Kapitel über die biologische Wirkung von ionisierender Strahlung. Sie wird mit Animationen von physikalischen und biologischen Prozessen angereichert, welche als optische Vorstellungshilfen dienen (vgl. Kircher, Girwidz & Häußler, 2020, S. 312) und die Prozesse nicht nur visualisieren, sondern auch nachvollziehbar machen sollen. Die vorlesungsartige Präsentation kann von Teilnehmenden durch Klicks durchgeblättert werden. Diese kleinschrittige Zerlegung des Lerninhalts soll unterstützend bei der gedanklichen Strukturierung der Lehrinhalte wirken. Des Weiteren zeigten Leonhardt, Damnik & Bergner (2020), dass bereits minimale Interaktionen mit dem Medium „*einen Mehrwert hinsichtlich der Behaltensleistung gegenüber einer passiven Betrachtung an Standardbildschirmen bietet*“ (Leonhardt, Damnik & Bergner, 2020, S.101). Auch die weiteren interaktiven Elemente der Escape Story lassen sich durch einfache Klicks bedienen und umfassen einen interaktiven Ausschnitt aus der Nuklidkarte, versteckte Elemente innerhalb der Informationen, die aufgedeckt werden können und Abbildungen von Objekten und Räumen, mit denen die Spielenden interagieren können. All diese interaktiven Elemente dienen dazu, eine Spielumgebung mit gewissen Handlungsfreiheiten und Entscheidungsmöglichkeiten aufzuspannen und können in diesem Sinne das Autonomieerleben befördern (siehe Kapitel 2.1: Autonomieerleben).

### **Rätsel**

Nach Mitchell (1993) wird zur Genese eines situationalen Interesses eine *Catch*- und *Hold*-Komponente benötigt. Die *Catch*-Komponente – in der Escape Story die Geschichte und das allgemeine Escape-Room-Format - soll das Interesse oder die Aufmerksamkeit der Lernenden einfangen, also Neugierde wecken und zur Exploration anregen. Die Rätsel stellen die *Hold*-Komponente dar und dienen dazu, das Interesse über die gesamte Escape Story zu stabilisieren und aufrechtzuerhalten. Dafür erweitern die Rätsel den Zielhorizont des Spielenden vom bloßen Verständnis der Inhalte auf die Bewältigung von damit verzahnten Herausforderungen, um ein weiteres indirektes Interesse zu fördern (vgl. Krapp, 1998, S. 192). Gleichermäßen segmentieren die Rätsel die gesamte Spielerfahrung, um die bereits angesprochene Motivationsschleife zu erzeugen (siehe Kapitel 2.2). Die Wahl der Aufgabenformen basiert auf dem Ziel, eine möglichst große Abwechslung hinsichtlich der Lernziele und der Art der Herausforderungen zu bieten. Die Rätsel dienen dazu, unterschiedlichste Kompetenzen anzusprechen und umfassen sowohl physikalische Aufgaben als auch nicht-physikalische Problemstellungen. Aufgrund der Vielfalt der Herausforderungen sollen die Aufgabenformen im Folgenden lediglich kurz benannt werden:

- Extrahierung von relevanten Informationen aus dem Informationsteil
- Finden von in Informationsteilen versteckten, anklickbaren Hinweisen
- Lösen von Logikrätseln und Zahlenrätseln durch Kombination logischer Aussagen oder Gleichungen

- Das Lösen von Kernumwandlungsgleichungen, um Umwandlungsprodukte herauszufinden
- Durchsuchen von Nebelkammeraufnahmen nach visuellen Hinweisen
- Ermitteln einer Telefonnummer, die angerufen werden muss
- Lösen eines Anagramms
- Interaktionen mit Bildern vom Kellerraum und Messgerät, um Messungen durchzuführen
- Berechnung von Dosisgrößen aus Messungen
- Entschlüsseln eines Audiocodes, der über mehrere Informationsteile verteilt ist

### **Tipps**

Um den Lernenden genügend Raum für eine selbstständige Bearbeitung der Aufgaben im eigenen Tempo zu bieten und gleichzeitig Sackgassen bei der Bearbeitung der Rätsel (also Situationen, in denen dem Kompetenzerleben aufgrund von zu hohem Anspruch entgegengewirkt wird) zu vermeiden, werden alle Rätsel mit optionalen Lernhilfen unterstützt. Dadurch können die Lernenden jederzeit selbstgesteuert Unterstützung anfordern. Diese gestuften Lernhilfen dienen des Weiteren der Selbstständigkeitsunterstützung, der inneren Differenzierung und dem Autonomieerleben (vgl. Hänze, Schmidt-Weigand & Stäudel, 2010, S. 64). Damit wird auch dem Problem entgegengesteuert, dass je nach Einsatz der Escape Story evtl. keine direkte Überwachung des Lernfortschritts oder Unterstützung seitens der Lehrkraft möglich ist. Die Lernhilfen enthalten aufgrund der Tatsache, dass viele Rätsel aus mehreren Teilherausforderungen bestehen, nicht nur Denk- oder Handlungsimpulse, sondern beschreiben des Öfteren auch schon auf niedrigeren Stufen Lösungsansätze. Es wird in die folgenden Hilfestufen unterschieden (wobei es nicht bei jedem Rätsel notwendig sein muss, alle Hilfestufen anzubieten):

- Die genaue Aufgabenstellung wird paraphrasiert und erklärt, sodass die Lernenden verstehen, was sie tun müssen.
- Der Suchraum für fehlende Hinweise wird eingegrenzt oder es werden kleine Hinweise gegeben, die beim Suchen unterstützend wirken.
- Es wird ein Teil der Herausforderung gelöst und der Lösungsweg erklärt, sodass die Lernenden die Erkenntnisse auf die weitere Bearbeitung der Aufgabe übertragen können.
- Es wird die korrekte Lösung dargelegt und erklärt.

Basierend auf den hier beschriebenen Gestaltungsprinzipien wurde die digitale Escape Story mit dem Titel *Escape Radon* entwickelt. Die Escape Story ist online über die Adresse <http://escape-radon.bplaced.net/> zugänglich. Des Weiteren befinden sich alle verwendeten Dateien und Medien im Anhang (CD).

## 4 EVALUATION DER ESCAPE STORY

Die Evaluation der Escape Story fand in zwei Evaluationsstufen statt. In der ersten Stufe haben zwei Gruppen von Studierenden (eine Dreier- und eine Vierergruppe) die Escape Story gespielt und anschließend einen digitalen Fragebogen ausgefüllt. Die Vorevaluation zielte darauf ab, eventuelle Fehler und technische Schwierigkeiten der Escape Story auszumachen und vor der Hauptevaluation zu beheben sowie das Messinstrument zu verbessern. Die erste Evaluationsstufe soll im Folgenden nicht genauer beleuchtet werden. Stattdessen soll nur die Hauptevaluation beschrieben und ausgewertet werden.

### 4.1 FORSCHUNGSFRAGEN

Die Entwicklung und Evaluation der Escape Story hat das Ziel, folgende Forschungsfragen zu untersuchen:

1. Auf welche Weise lässt sich eine digitale Escape Story sinnvoll in den Schulunterricht einbinden und realistisch umsetzen?
2. Fragen bezüglich der Förderung von Interesse
  - a. Inwieweit kann das Format einer digitalen Escape Story eine Auseinandersetzung mit den Lerninhalten anregen?
  - b. Welche Gestaltungselemente der Escape Story führen dazu, dass die Lernenden sie gerne durchführen?

### 4.2 BESCHREIBUNG DES ERHEBUNGSINSTRUMENTS

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein Fragebogen in digitaler Form als Messinstrument verwendet. Die Fragen des Evaluationsbogens wurden von den Teilnehmenden nach der Durchführung der Escape Story asynchron und selbstständig beantwortet. Der Evaluationsbogen verwendet sowohl offene als auch geschlossene Fragen. Bei Letzterem handelt es sich abgesehen von Fragen zu den Probanden-Merkmalen und einer Rangordnungsfrage ausschließlich um Rating-Fragen.

Ein Großteil der geschlossenen Fragen basieren auf der Likert-Skala (vgl. Gritsch, 2012) und versuchen, die persönliche Einstellung der Teilnehmenden zu konkreten Aussagen (sowohl hinsichtlich der Einschätzung von Qualitätsmerkmalen der Escape Story als auch der Selbsteinschätzung) zu erfassen. Dabei wurde eine vierstufige Antwortskala verwendet, um eine einseitige Entscheidung zu erzwingen, neutrale Ausprägungen zu vermeiden und somit Tendenzen auch bei einer kleineren Anzahl von Teilnehmenden besser erfassen zu können. Die Mehrheit der Rating-Fragen ist folgendermaßen standardisiert: Die Frage lautet „*Geben sie bitte an, wie sehr sie persönlich jeder dieser Aussagen zustimmen*“ und die Antwortmöglichkeiten sind *Stimme nicht zu*, *Stimme eher nicht zu*, *Stimme eher zu* und *Stimme voll zu*. Die Antwortmöglichkeiten wurden symmetrisch formuliert, um für eine vereinfachte Auswertung möglichst äquidistante Antwortstufen zu konstruieren.

Neben den standardisierten Rating-Fragen wurden einige geschlossene Rating-Fragen verwendet, die andere Fragenformulierungen und Antwortmöglichkeiten bieten. Bis auf zwei Ausnahmen mit fünfstufigen Antwortskalen standen ebenfalls vier Antwortmöglichkeiten zur Verfügung. Des

Weiteren wurden offene Fragestellungen genutzt, um komplexere Antwortmöglichkeiten zu bieten oder Begründungen für Einschätzungen und Meinungen sowie weitere Anmerkungen der Probanden zu erfassen.

Der Evaluationsbogen umfasst insgesamt 22 Fragen, die thematisch in die folgenden sechs Gruppen gegliedert wurden:

- 1. Allgemeines:** Hier werden die Merkmale der Probanden erfasst (siehe Kapitel 4.3) und die Bearbeitungsdauer der Escape Story in einer offenen Fragestellung abgefragt.
- 2. Motivation:** Hier werden allgemeine Fragen zur Motivation und der Geschichte gestellt. Motivationale Aspekte werden auch in späteren Fragegruppen konkretisiert abgefragt.
- 3. Rätsel:** Ziel dieses Abschnitts ist es, den Anspruch der Rätsel sowie deren motivationale Wirkung und Verknüpfung mit den Lehrinhalten zu erfassen. Des Weiteren wird abgefragt, wie oft Hinweise genutzt wurden und wie hilfreich diese waren.
- 4. Inhalt:** In diesem Abschnitt werden Fragen hinsichtlich der Aufbereitung der Lehrinhalte gestellt. Des Weiteren müssen die Probanden ihre Vorkenntnisse vor dem Spielen der Escape Story sowie ihr Verständnis der verschiedenen Lerninhalte selbst einschätzen und das Verhältnis Lerninhalt/Rästelanteil bewerten.
- 5. Zielgruppe:** Hier wurde die Eignung der Escape Story für die gewählte Zielgruppe und ihre Anwendbarkeit im Schulunterricht erfragt. Bei der Zielgruppe handelt es sich um Schülerinnen und Schüler der Oberstufe (Gymnasium, Grundkurs). Aufgrund der Tatsache, dass einige der Teilnehmenden Schüler:innen niedrigerer Klassenstufen sind, ist die Beantwortung der Fragen dieses Abschnitts optional.
- 6. Abschluss:** Zuletzt werden die Probanden um eine abschließende Gesamtbewertung der Escape Story gebeten. Des Weiteren besteht eine letzte Möglichkeit, um sonstige Anmerkungen anzugeben.

Die einzelnen Fragen und deren Format sind im *Anhang A 2* aufgelistet. Am Ende der Abschnitte 3 bis 6 haben die Probanden jeweils in einer offenen Fragestellung die Möglichkeit, zusätzliche Anmerkungen bzgl. des jeweiligen Themas anzugeben. Bei den Fragen bzgl. der Zielgruppe sowie den meisten offenen Fragestellungen war die Beantwortung nicht verpflichtend.

### 4.3 BESCHREIBUNG DER PROBANDEN

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Zielgruppe der Escape Story um Schülerinnen und Schüler der Oberstufe Gymnasium. Die Evaluation fand während der COVID-19-Pandemie statt, in der starke Abstriche in Schulunterricht gemacht werden mussten. Insbesondere wurde für das Schuljahr aufgrund der zeitweiligen Schulschließungen der Lernbereich der 12. Klasse Grundkurs „Strahlung aus Atomhülle und Atomkern“ gestrichen, weswegen es nicht möglich war, in Sachsen Probanden aus der ursprünglich gewählten Zielgruppe zu finden. Stattdessen wurden Schüler:innen der Klassenstufen 9 bis 11 gefunden, die sich freiwillig bereit erklärten, in ihrer Freizeit die Escape Story zu spielen. Des Weiteren wurde die Probandengruppe um interessierte Lehrkräfte und Lehramtsstudent:innen ergänzt, damit eine genügende Anzahl an Teilnehmer:innen zustande kommen konnte. Letzten Endes konnten 21 Probanden für die Erprobung und Evaluation der Escape Story gewonnen werden, deren Zusammensetzung Tabelle 3 entnommen werden kann. Die



Probanden haben sich teilweise in Gruppen zusammengefunden und insgesamt haben elf „Arbeitsgruppen“ die Escape Story gespielt (siehe Tabelle 4).

Tab. 3: Zusammensetzung der Probanden

	Anzahl
<b>Lehrkräfte</b>	2
<b>Lehramtsstudent:innen</b>	8
<b>Schüler:innen</b>	11
... der 9. Klasse	4
... der 10. Klasse	3
... der 11. Klasse	3
... der 12. Klasse	1

Tab. 4: Zusammensetzung der Arbeitsgruppen

	Anzahl
<b>Einzel</b>	5
<b>Zweier-Gruppen</b>	2
<b>Dreier-Gruppen</b>	4

#### 4.4 AUSWERTUNG DER BEFRAGUNGSERGEBNISSE

Bei der Betrachtung der Befragungsergebnisse ist zu beachten, dass aufgrund der geringen Teilnehmeranzahl von 21 Probanden die Stichprobe nicht repräsentativ ist. Dies gilt insbesondere für die eigentlich anvisierte Zielgruppe, zumal nur die Hälfte der Probanden Schüler:innen waren. Ziel der folgenden Betrachtung ist es lediglich, Tendenzen zu interpretieren, um daraus qualitative Aussagen abzuleiten. Die offenen Fragen wurden von den Probanden vielfältig beantwortet. Aufgrund des Umfangs der Antworten<sup>7</sup> soll ihre Auswertung lediglich anhand ausgewählter, charakteristischer oder für die abschließende Diskussion besonders relevanter Aussagen stattfinden.

Die Antworten auf die standardisierten Rating-Fragen werden graphisch dargestellt. Dabei wird der Mittelwert der Bewertungen angegeben, wobei die Antwortmöglichkeiten folgendermaßen codiert sind: *trifft nicht zu* = 1, *trifft eher nicht zu* = 2, *trifft eher zu* = 3, *trifft voll zu* = 4. Unter der Annahme, dass die Antwortmöglichkeiten äquidistant sind, lässt sich somit die allgemeine Tendenz der Probandengruppe ablesen. Es wurde bei der Auswertung zur Vereinfachung lediglich zwischen Lernende (Schüler:innen aller Klassenstufen) und Lehrkräfte (Lehrer:innen und Lehramtsstudent:innen) unterschieden. Im Folgenden werden die Befragungsergebnisse, sortiert nach den fünf Kapiteln, ausgewertet.

Zur Bearbeitung der Escape Story haben die Probanden durchschnittlich 2h 10min benötigt. Auffällig ist, dass diejenigen, die allein gearbeitet haben, durchschnittlich lediglich 1h 54min brauchten, während Zweier-Gruppen mit 2h 23min und Dreier-Gruppen mit 2h 8 min im Mittelwert mehr Zeit benötigten.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Eine vollständige Auflistung der Antworten der offenen Fragen befindet sich im Anhang (CD).

<sup>8</sup> Die Bearbeitungsdauer wurde nicht genau erfasst. Die hier angegebenen Werte basieren auf Schätzungen der Probanden und sind entsprechend mit Vorsicht zu interpretieren.

## MOTIVATION

Zu Beginn der Evaluation wurden allgemeine motivationale Aspekte<sup>9</sup> in einer standardisierten Rating-Frage erfasst (siehe Abb. 7). Auffällig ist, dass bis auf einen Schüler alle Lernenden der Aussage „Das Escape-Room-Format hat zur Motivation beigetragen“ voll zugestimmt haben. Ansonsten liegen die Antworten größtenteils zwischen *stimme eher zu* und *stimme voll zu*. Einzige Ausnahme bildet die Aussage „Die Geschichte hat eine Auseinandersetzung mit den Inhalten motiviert“, der zwei der Probanden eher nicht zugestimmt haben.

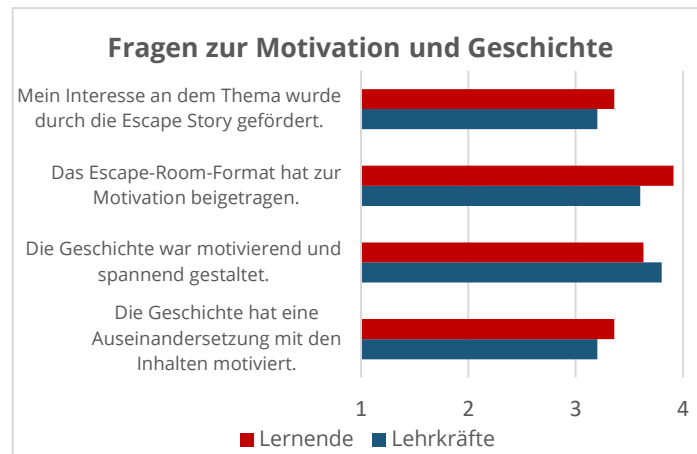


Abb. 7: Mittelwerte der Antworten auf Fragen zur Motivation und Geschichte

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Geschichte und das Gestaltungsformat zur Motivation beigetragen und damit das willentliche Bearbeiten der Escape Story gefördert haben. Inwieweit dies auch eine gezieltere Auseinandersetzung mit den Lehrinhalten befördert, lässt sich hieraus jedoch nicht direkt schlussfolgern. Diesem Ziel soll allerdings auch mithilfe der Rätsel nachgegangen werden.

## RÄTSEL

Zu den Rätseln wurden anfangs allgemeine Fragen in einer standardisierten Rating-Frage gestellt, die ebenfalls größtenteils auf motivationale Aspekte abzielen (siehe Abb. 8). Den Aussagen zum Anspruch, dem Spaß bei der Bearbeitung und der allgemeinen Motivation stimmten alle Teilnehmenden vollständig oder teilweise zu. Unter den Schüler:innen ergab sich auch zu den Fragen, ob die Rätsel eine Auseinandersetzung mit den Inhalten motiviert oder notwendig gemacht haben, ausschließlich positive Tendenzen. Lediglich zwei bzw. drei Lehrkräfte stimmten diesen beiden Aussagen eher nicht zu.

---

<sup>9</sup> Für einige der Teilfragen wurde bewusst der Begriff der *Motivation* verwendet. Auch wenn die Auslegung des Begriffs den Teilnehmenden selbst überlassen bleibt, lassen sich aus der Selbsteinschätzung der eigenen Motivation dennoch Tendenzen bzgl. der Interessenförderung durch das Escape-Room-Format und die Geschichte ableiten.

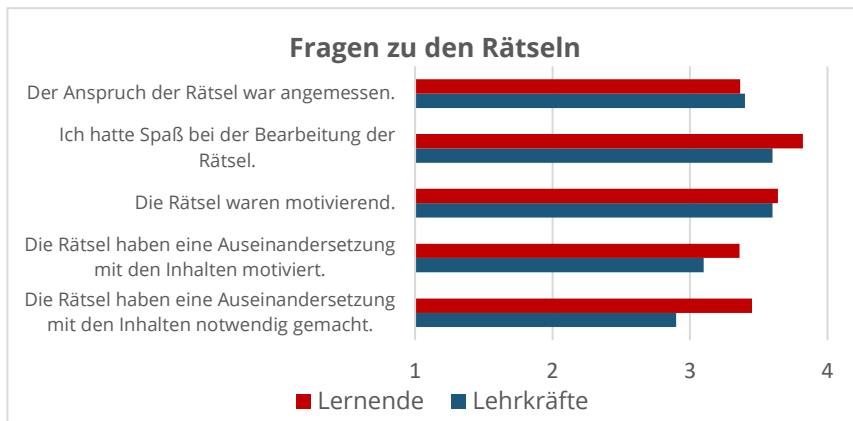


Abb. 8: Mittelwerte der Antworten auf Fragen zu den Rätseln

Der Anspruch der Rätsel wurde mit einer Rangordnungsfrage detaillierter betrachtet, bei der die Rätsel von den Teilnehmenden nach Schwierigkeitsgrad sortiert werden sollten. Der durchschnittliche relative Schwierigkeitsgrad der Rätsel wurde in einem Diagramm aufgetragen (siehe Abb. 9). Ein durchschnittlicher Schwierigkeitsgrad von 1,0 würde in dieser Darstellung bedeuten, dass alle Teilnehmenden das Rätsel als das schwierigste Rätsel bewerteten. Die Sortierungen vielen sehr unterschiedlich aus und für keines der Rätsel lässt sich ein auffällig abweichender Anspruch von den Restlichen feststellen. Lehrkräfte nahmen das erste Rätsel (*Umwandlungsprodukte ermitteln*) als leichter wahr als Schüler:innen und das reine Logikrätsel des dritten Kapitels (*Buchstaben-Zahlenrätsel*) als schwieriger. Besonders bei Schüler:innen weichen die relativen Schwierigkeitsgrade nur unwesentlich vom Erwartungswert von 3,5 ab (*Dosisgrößen berechnen* mit 3,0 durchschnittlich am schwierigsten, *Umwandlungsprodukte berechnen* mit 4,1 am leichtesten).

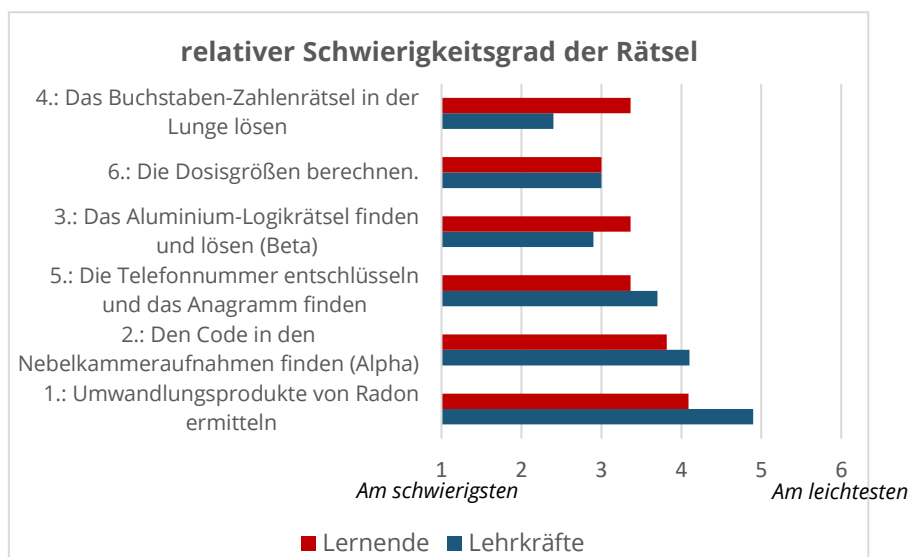


Abb. 9: Mittelwerte der relativen Schwierigkeitsgrade der Rätsel

Aus diesen Befragungsergebnissen lässt sich noch nicht ableiten, ob der Anspruch für alle Rätsel angemessen war. Um dieser Frage nachzugehen, mussten die Teilnehmenden an die Rangordnungsfrage anschließend in einer offenen Frage beantworten, ob eines der Rätsel zu schwierig oder zu leicht war und dies begründen. Die Antworten variierten stark. Das Rätsel zur Berechnung der Dosisgrößen war das einzige Rätsel, bei dem bei mehreren Schwierigkeiten aufgetreten sind.

Konkret schätzten drei der neun Probanden, die hier eine Antwort gegeben haben, den Schwierigkeitsgrad als zu hoch ein (von denen allerdings zwei Schüler:innen der 9. Klasse waren). Größtenteils wurde das Niveau als angemessen empfunden und nur einige Schwierigkeiten angesprochen (mal wurde ein anklickbares Element nicht gefunden, mal wurde die Aufgabenstellung fehlinterpretiert), die sich jedoch nicht doppelten. Bspw. lautete eine Antwort einer Schülerin:

*„Mir ist es hin und wieder passiert, dass ich meines Erachtens nach theoretisch logischen Ideen gefolgt bin, die sich jedoch als falsche Ansätze entpuppten. Wenn man gewillt ist den jeweils ersten Tipp zu verwenden, dann ist es meiner Meinung nach ein angemessenes Niveau“*

In einer weiteren offenen Frage sollten die Probanden angeben, bei welchen Rätseln die optionalen Hinweise genutzt wurden. Mit dieser Frage sollte nicht nur erfasst werden, wie anspruchsvoll und zugänglich die Aufgaben waren, sondern auch, ob die Teilnehmer:innen bereit waren, Hinweise zu nutzen. Rätsel bei denen auffällig viele Probanden Hinweise nutzten waren

1. Die Dosisgrößen berechnen (bei 5 Probanden): Hier sind die Schwierigkeiten größtenteils bei der Umrechnung entstanden, bspw. aufgrund eines Kommafehlers.
2. Das Aluminium-Logikrätsel finden und lösen: (4-mal) Hinweise wurden vermehrt benutzt, da die Alufolie nicht gefunden oder die Aufgabe des Logikrätsels nicht verstanden wurde.
3. Den Code in den Nebelkammeraufnahmen finden (9-mal): Für einige war nicht klar, dass das Video im Zusammenhang mit der Aufgabe oder den Zeitangaben stand.

Insgesamt haben 19 der 21 Probanden ein- oder mehrmals Hinweise verwendet. Lediglich zwei Teilnehmer:innen haben konkret angegeben, dass sie sich auch Lösungen anzeigen lassen mussten. Des Weiteren haben Einige sinnvollerweise die Zwischenlösung von Rätsel 5 (Telefonnummer) genutzt, um sicher zu gehen, dass die richtige Nummer angerufen wird.

Abgeschlossen wurde der Umfrageabschnitt zu den Rätseln mit einer Ratingfrage, bei der eingeschätzt werden sollte, wie hilfreich die zur Verfügung gestellten Hinweise waren. Alle Teilnehmenden empfanden die Hinweise als sehr hilfreich (12), größtenteils hilfreich (7) oder haben diese nicht genutzt (2).

Aus den abschließenden Anmerkungen zu diesem Abschnitt lässt sich entnehmen, dass die Rätsel tendenziell positiv aufgenommen wurden, wie es sich bspw. in dieser Aussage eines Lehramtsstudenten widerspiegelt: *„Ich finde die Rätsel super. Sie decken verschiedene Anforderungsniveaus und Fähigkeiten ab, sodass der Escape Room abwechslungsreich bleibt.“* Von Probanden wurden in den Anmerkungen unterschiedliche, kleinere Probleme angesprochen, bspw. *„Auf Aluminium klicken war schwerer zu finden, da es vorher hauptsächlich um inhaltsbasierte Rätsel ging.“* oder *„Anfangs war mir leider nicht klar, dass ich die Materialien nutzen muss [...]. Mein erster Impuls in Kapitel 1 war daher, die [...] Zerfallsreihe zu googeln.“* Diese lassen sich mehrheitlich auf eine Einstiegshürde zurückführen, bei der sich die Teilnehmenden erst mit den Interaktionsmöglichkeiten, den Aufgabenarten und den *Regeln* des Spiels vertraut machen mussten. Es lässt sich vermuten, dass aus demselben Grund besonders bei den beiden Rätseln des zweiten Kapitels Hinweise vermehrt genutzt werden mussten.

Insgesamt lässt sich für die Rätsel festhalten, dass der Anspruch angemessen war und sie ihren Zweck, eine Auseinandersetzung mit den Inhalten zu induzieren, erfüllen können. Außerdem zeigt

sich, dass die Hinweise bei der Bearbeitung hilfreich waren und die Teilnehmenden auch bereit sind, diese selbstständig zu nutzen.

## INHALT

Zu Beginn dieses Abschnitts wurden die Vorkenntnisse der Teilnehmenden erfasst. Dafür mussten sie in zwei Fragen mit festgelegten Antwortmöglichkeiten ihre Vorkenntnisse zu den inhaltlichen Grundlagen (fünfstufig) und zur Radonbelastung (vierstufig) angeben. Acht der Teilnehmenden gaben an, dass sie sich bereits gut oder sehr gut mit den behandelten physikalischen Prozessen auskannten, 10 kannten sich etwas mit den wesentlichen physikalischen Grundlagen aus und 3 brachten wenig bis gar keine Vorkenntnisse mit. Bzgl. des Radonproblems gab eine Lehrkraft an, dass sie sich sehr gut mit dem Radonproblem auskennt. 9 Teilnehmende wussten bereits etwas über das Radonproblem und 7 haben zumindest davon gehört. 4 Teilnehmende gaben an, dass sie noch nie etwas von der Radonbelastung gehört haben.

Anschließend folgte die Frage danach, wie sehr sich die Teilnehmenden mit den Lehrinhalten auseinandergesetzt haben, also konkret die Texte durchgelesen haben (vierstufig mit festgelegten Antwortmöglichkeiten). 13 der Teilnehmenden gaben eine positive Tendenz an (so gut wie alles gelesen oder alles ausführlich gelesen), 7 gaben an, dass sie die Texte eher überflogen haben. Ein:e Schüler:in wählte sogar die Antwortmöglichkeit „*Ich habe das Lesen der Texte vermieden und sie mir nur dann angeguckt, wenn ich darin Hinweise vermutet habe*“.

In einer standardisierten Rating-Frage mussten allgemeine Aussagen zur Aufbereitung der Lehrinhalte beantwortet werden. Es lassen sich nahezu ausschließlich positive Tendenzen beobachten (siehe Abb. 10). Bei Schüler:innen gab es lediglich vereinzelte Ausnahmen. Je zwei Schüler:innen haben den Aussagen „*Die Inhalte sind spannend*“, „*Ich erachte die Inhalte als relevant*“ und „*Der inhaltliche Umfang war angemessen*“ eher nicht zugestimmt. Ein:e Schüler:in hat der Aussage „*Ich habe die Inhalte verstanden*“ eher nicht zugestimmt.



Abb. 10: Mittelwerte der Antworten auf Fragen zu den Lehrinhalten

In einer weiteren standardisierten Rating-Frage wurde das Verständnis für die Lehrinhalte abgefragt, wobei der Einfachheit halber lediglich auf eine Selbsteinschätzung der Probanden zurückgegriffen wird. Dazu wurde für jedes Kapitel das allgemeine Verständnis anhand der Zustimmung

oder Ablehnung einer Aussage erfasst (siehe Abb. 11). Auch hier stimmten die Teilnehmenden größtenteils den Aussagen eher oder voll zu. Vermehrte Schwierigkeiten beim Verständnis gab es unter Schüler:innen allerdings bei dem vierten Kapitel zur biologischen Wirkung und dem fünften Kapitel zu den Dosisgrößen. 4 Schüler:innen stimmten der Aussage „*Ich habe die biologische Wirkung von ionisierender Strahlung verstanden*“ eher nicht zu. Der Aussage „*Ich habe verstanden, wofür Strahlendosisgrößen verwendet werden*“ stimmte ein:e Schüler:in eher nicht zu und zwei Schüler:innen gar nicht zu. Die Probleme beim Verständnis der Lehrinhalte dieser Kapitel sind nicht nur auf den anspruchsvolleren Lernstoff, sondern auch auf die Aufbereitung der Inhalte zurückzuführen.



Abb. 11: Mittelwerte der Antworten auf Fragen zum Verständnis

In der letzten Frage zu den Inhalten sollte das Verhältnis von Rätselumfang zu Lehrinhalt eingeschätzt werden. 9 Teilnehmer:innen empfanden das Verhältnis als genau richtig, eine Lehrkraft gab an, dass es etwas zu viele Rätsel waren und 10 Teilnehmer:innen schätzten den Anteil des Lehrinhalts als etwas zu hoch ein.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Inhalte trotz der Tatsache, dass ein paar der Schüler:innen wenig, bis kein Vorwissen mitbrachten und niedrigerer Klassenstufe als die anvisierte Zielgruppe waren, für die Mehrheit der Lernenden verständlich aufbereitet und ansprechend gestaltet waren. Ausnahme bilden die Kapitel 5 und 6, wobei die hier auftretenden Schwierigkeiten in der Reflexion betrachtet und Verbesserungsvorschläge angegeben werden sollen (siehe Kapitel 5.2). Kritisch zu betrachten ist des Weiteren die Tatsache, dass eine nicht unerhebliche Menge der Teilnehmenden die Texte eher überflogen hat (und somit unzureichend zu einer Auseinandersetzung mit den Lehrinhalten animiert wurde) und knapp die Hälfte den Anteil des Lehrinhalts als tendenziell zu hoch einschätzte.

## ZIELGRUPPE

In diesem Kapitel sollten die Probanden die Eignung der Escape Story für die Zielgruppe (Oberstufe Gymnasium Grundkurs Physik) einschätzen. Anhand einer optionalen standardisierten Rating-Frage mussten diesbezüglich Aussagen bewertet werden (siehe Abb. 12). Die erste Teilfrage wurde von 17 der 21 Teilnehmenden beantwortet, die restlichen jeweils von 14. Auch hier wurde den meisten Aussagen im Allgemeinen zugestimmt. Leicht negative Tendenzen ließen sich ausschließlich bei dem Zeitumfang feststellen, wo drei Teilnehmende den Zeitumfang der Escape Story eher nicht als angemessen für die Zielgruppe empfanden.

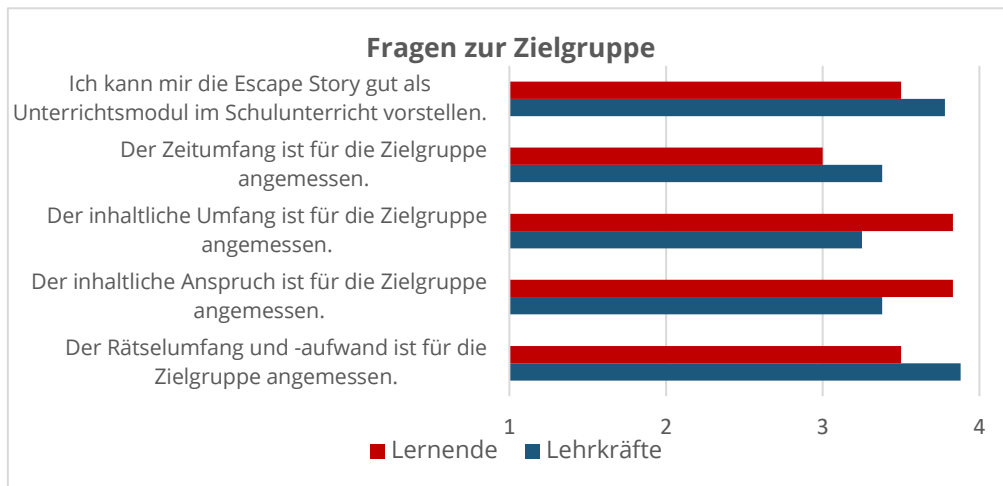


Abb. 12: Mittelwerte der Antworten auf Fragen zur Zielgruppe

Dies wurde auch von einigen Aussagen in der abschließenden offenen Frage für zusätzliche Anmerkungen unterstützt. Nach der Aussage einer Lehrkraft sei die Escape Story zu lang für den Unterricht und würde mehr als eine Doppelstunde in Anspruch nehmen, wobei die Unterbrechung vermutlich „störend“ wäre. Eine weitere Lehrkraft gab an, dass sie die Escape Story nicht geschlossen spielte, sondern zwischendurch eine Pause von einem Tag einlegte. Sie erwähnte, dass sich „die Motivation am nächsten Tag wieder einzusteigen [...] etwas in Grenzen [hielt].“ Ansonsten wurden der Umfang, Arbeitsaufwand und Anspruch von den Teilnehmenden als angemessen für die Zielgruppe eingeschätzt.

Es folgten zwei offene Fragen. Die erste lautete „Stimmen Sie zu, dass die 11./12. Klasse (Gymnasium, Physik Grundkurs) die geeignete Zielgruppe für die Escape Story ist? Falls nicht, geben Sie bitte die aus ihren Augen geeignete(n) Zielgruppe(n) an und begründen Sie“ und die zweite ermöglichte weitere Anmerkungen für die Anwendbarkeit im Unterricht. Hier haben einige Teilnehmende bereits konkrete Vorschläge für die Unterrichtsumsetzung angegeben, die in der Diskussion aufgegriffen werden. Bezüglich der Zielgruppe ergab sich eine auffällige Diskrepanz zwischen Lehrkräften und Schüler:innen. Lehrkräfte erachteten die Oberstufe Grundkurs ausnahmslos als die geeignete Zielgruppe. Schüler:innen gaben mehrmals an, dass sie sich die Escape Story auch für niedrigere Klassenstufen vorstellen können. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass auch die 9.- und 10.-Klässler unter den Teilnehmenden die Escape Story erfolgreich bewältigen konnten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Escape Story sowohl von Lehrkräften als auch von Schüler:innen als eine sinnvolle Ergänzung des Schulunterrichts eingeschätzt wurde. Trotz der Tatsache, dass die Probandengruppe nicht repräsentativ für die anvisierte Zielgruppe ist, sind die Ergebnisse der Auswertung übertragbar (insbesondere auf Grundlage von Aussagen der Lehrkräfte, für die angenommen werden kann, dass sie die Eignung für die Zielgruppe einschätzen können). Wie sich die Escape Story nun konkret in der Oberstufe anwenden lässt, soll in den Schlussfolgerungen beleuchtet werden (siehe Kapitel 6.1).

## ABSCHLUSS

Abschließend mussten die Teilnehmenden eine Gesamtbewertung der Escape Story in einer fünf-stufigen Rating-Frage angeben. Die Ergebnisse sind der Tabelle 5 zu entnehmen und vielen insgesamt positiv aus.

Tab. 5: Antworten auf die Frage „Hat Ihnen die Escape Story gefallen? Bewerten Sie bitte den Gesamteindruck“

Antwort	Lernende	Lehrkräfte
1 (mangelhaft)	0	0
2	0	0
3	0	0
4	4	3
5 (sehr gut)	7	7

Die letzte offene Frage ermöglichte den Teilnehmenden, abschließende Anmerkungen und Feedback zu geben. Hier wurde von einer Lehrkraft darauf hingewiesen, dass das fünfte Kapitel zu den Dosisgrößen wenig motivierend war und zu viel Zeit in Anspruch nahm. Eine weitere Anmerkung erwähnte, dass eine Erklärung zu den Nebelkammeraufnahmen fehlte. Ansonsten gab es viel positives Feedback, bspw. die Aussage „Mit ein paar kleinen (Ab-) Änderungen der Rätsel und Reduzierung des reinen Leseanteils kann die Escape Story wirklich super werden“ oder „Die Escape Story ist sehr liebevoll, detailliert und spannend gestaltet. Besonders gut gefällt mir die große Abwechslung, sowohl bei den Inhalten als auch bei den Rätseln“. Insgesamt zeigt sich, dass die Escape Story und ihr Lernerfolg von den Teilnehmenden positiv aufgenommen wurde.



## 5 REFLEXION

Im Folgenden sollen zuerst die Erhebungsmethodik reflektiert und Verbesserungsvorschläge angegeben werden. Anschließend werden die Auswertungsergebnisse reflektiert und Schwierigkeiten der Escape Story herausgestellt und ebenfalls Verbesserungsmöglichkeiten vorgeschlagen.

### 5.1 REFLEXION DER METHODIK

Wie bereits angesprochen, konnte für die Evaluation nicht die Zielgruppe der Escape Story gewonnen werden. Auch wenn sich aus der Erhebung Beobachtungen bezüglich der Forschungsfragen ableiten lassen, wäre die Evaluation erfolgreicher gewesen, wenn bspw. eine vollständige Schulklasse der Oberstufe die Escape Story getestet hätte. Der Fragebogen kann Tendenzen der Probandengruppe erfassen und die Antworten auf offene Fragen bieten hilfreiche Anregungen für die folgende Diskussion.

Zu betonen ist jedoch, dass mit dem Fragebogen nicht der Lernerfolg der Escape Story gemessen wird. Die Teilnehmer:innen haben lediglich in Selbsteinschätzung angegeben, welche der Themengebiete für sie verständlich waren und welche nicht. Hieraus lassen sich zwar grob Tendenzen ablesen, allerdings kann an dieser Stelle keinesfalls von Lernerfolgskontrolle gesprochen werden. Sinnvoller wäre es gewesen, wenn eine Form von Abschlusstest stattgefunden hätte, der gleichermaßen zur Überprüfung der Lernziele dient. Darauf wurde für die Evaluation verzichtet, da die der Evaluation zugrundeliegenden Forschungsfragen einen anderen Schwerpunkt setzen. Insbesondere bei der Diskussion konkreter Schwierigkeiten der Escape Story (siehe Kapitel 5.2) wäre diese Erhebungsform jedoch von Vorteil gewesen. Erwähnenswert ist des Weiteren, dass aus der Messung des Lernerfolgs auch Rückschlüsse auf die Forschungsfragen bzgl. der Interessenförderung gezogen werden könnten, da ohne Frage eine Korrelation zwischen Interesse der Teilnehmenden an der Escape Story und dem Lernerfolg angenommen werden kann. Bei einer Messung der Lernerfolgs ist es des Weiteren sinnvoll, die Vorkenntnisse der Teilnehmenden zu erfassen. Die Erhebung der Vorkenntnisse hätte detaillierter vorgenommen werden können, bspw. in einer Vorevaluation, in der die Teilnehmer:innen konkretere Fragen gestellt bekommen (bspw. eine standardisierte Rating-Frage zu Aussagen wie *„Ich kann den Begriff Ionisierende Strahlung erklären“*). Da in dieser Erhebung jedoch der Lernerfolg nicht gemessen wurde, ist auch eine Erfassung der Vorkenntnisse, vor allem wenn sie wie in diesem Fragebogen oberflächlich vorgenommen wird, nicht zielführend und bietet keine weiteren Erkenntnisse (außer der Möglichkeit, Teilnehmende, die sehr viele Vorkenntnisse mitbringen bei weiteren Betrachtungen auszuklammern).

Ebenfalls detaillierter hätte die generierte Motivation bei den Teilnehmenden erfasst werden können. In den späteren Abschnitten der Evaluation zeigte sich, dass die offenen Fragen einige Ergebnisse vorbrachten, die mithilfe der Rating-Fragen nicht hätten erfasst werden können. Insofern lässt sich vermuten, dass es auch beim ersten Abschnitt des Fragebogens hilfreich gewesen wäre, wenn offene Fragen gestellt worden wären. Bspw. würde sich eine Ergänzung des Fragebogens um folgende Frage anbieten: *„Welche Elemente der Escape Story haben sie zur Auseinandersetzung mit dem Thema und den Lehrinhalten besonders motiviert oder demotiviert? Begründen sie.“*

Eine weitere sinnvolle Alternative wäre es gewesen, motivationale Aspekte genauer zu erfassen, indem bspw. eine Orientierung an der Kurzskala intrinsischer Motivation von Wilde, Bätz, Kovaleva

und Urhahne stattfindet (vgl. Wilde et. al., 2009). Auf diese Weise kann konkret das Interesse, das Kompetenzerleben sowie das Autonomieerleben der Probanden während der Escape Story erfasst werden.

Ansonsten sei noch zu erwähnen, dass die Bearbeitungszeit der Escape Story nur sehr ungenau erfasst wurde. Hier wäre es sinnvoll gewesen, wenn die Teilnehmenden vor der Escape Story darauf hingewiesen worden wären, auf die benötigte Bearbeitungszeit zu achten. Gleiches gilt für die Nutzung der Hinweise. Der vorangestellte Hinweis, dass die Teilnehmenden sich notieren sollen, bei welchen Rätseln sie welche Hinweise und Lösungen genutzt haben, hätte dabei geholfen, konkreter statistisch relevante Schwierigkeiten bei der Rätselbearbeitung festzustellen.

Abgesehen von diesen Punkten war das Erhebungsinstrument dazu in der Lage, Ergebnisse zu liefern aus denen sich qualitative Aussagen ableiten lassen und mithilfe derer den Forschungsfragen der Evaluation nachgegangen werden kann.

## 5.2 REFLEXION DER ERGEBNISSE

Die Escape Story wird von den Teilnehmenden allgemein als interesselördernd und gut auf den Schulunterricht übertragbar beschrieben. Besonders die Vielfalt der Herausforderungen und die Abwechslung in der Aufbereitung der Inhalte werden gelobt. Insofern lässt sich allgemein dieser Entwurf einer Escape Story positiv bewerten. Allerdings bleibt wie bereits erwähnt die Frage nach dem Lerneffekt offen. Sowohl die fachlichen als auch die kompetenzorientierten Lernziele werden im Rahmen der Escape Story und der Evaluation nicht überprüft.

Vermehrte Schwierigkeiten traten besonders bei dem fünften Kapitel „Die Radon-Dosis“ auf. Hier besteht die Herausforderung aus der Berechnung der Organ-Äquivalentdosis mithilfe von Dosisoeffizienten. Die Aufgabe ist physikalischer Art, was sich an dieser Stelle anbietet, da bereits die meisten der vorangegangenen Rätsel keine physikalische Sachkompetenz erfordern. Allerdings ist die Rechenaufgabe recht spezifisch und unterstützt nicht das übergeordnete Lernziel „Die Schüler:innen kennen die Bedeutung von Strahlendosisgrößen“. Hinzu kommt, dass die Aufgabe vom Anspruch her von den restlichen Herausforderungen abweicht. Bspw. hat ein:e Teilnehmer:in angegeben: „leider hat die Aufgabe allein knapp 30-45min gedauert, da man sich auch über Umformungen [...] informieren [...] musste und die Spannung auf dem Weg geblieben ist.“ Hier zeigt sich, dass auch motivationale Schwierigkeiten aufgetreten sind, das fünfte Kapitel in dieser Form nicht den Mehrwert von Escape Story nutzen kann und nicht interesselördernd ist. Des Weiteren sind Dosisgrößen im Physik Grundkurs nicht Teil des Lehrplans. Aus diesen Gründen soll im Folgenden ein Verbesserungsansatz für das Kapitel vorgeschlagen werden.

Im sächsischen Lehrplan ist die Behandlung des Umwandlungsgesetzes und der Aktivität wesentlicher Bestandteil der Kernphysik. Somit ist es sinnvoll, dies auch in die Escape Story zu integrieren und im fünften Kapitel nicht anhand von Dosisgrößen, sondern von Expositionsgrößen eine quantitative Betrachtung durchzuführen. Diese physikalischen Zusammenhänge sind zugänglicher und helfen, das Verhalten von radioaktiven Stoffen zu verstehen. Analog zum bisherigen Entwurf kann ebenfalls eine Rechnung auf Grundlage einer vorgenommenen Messung durchgeführt werden. Um das Spielgefühl des Escape Rooms stärker herauszuheben ist es sinnvoll, eine vereinfachte Rechenaufgabe zu stellen, bei der auch die Halbwertszeit, welche die Teilnehmenden der

Nuklidkarte entnehmen müssen, verwendet werden muss. So kann bspw. die Aktivität oder Aktivitätskonzentration berechnet werden. Die notwendigen Lehrinhalte bezüglich der verschiedenen Größen (Aktivität, Stoffmenge, Umwandlungskonstante, Halbwertszeit, ...) können ebenfalls analog auf mehreren unsortierten Zetteln verteilt sein, die bspw. erst im Zimmer eingesammelt und anschließend verknüpft werden müssen. Auf diese Weise besteht die Herausforderung nicht nur in der Berechnung, sondern auch im Beschaffen und Strukturieren der notwendigen Informationen selbst. Eine weitere Alternative für dieses Kapitel wäre ein stärkerer Fokus auf die Messung und technische Aspekte. Hier könnte man mit interaktiven Simulationen arbeiten und das Spielgefühl eines Escape Rooms damit befördern, dass die Teilnehmenden eine simulierte Messung selbst durchführen. Dieser Ansatz scheiterte jedoch an dem stark erhöhten Programmieraufwand, der mit der Erstellung eines solchen Applets einhergeht.

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Erstellung der Escape Story war die Verknüpfung der Rätsel mit den Lehrinhalten. Ziel sollte es eigentlich sein, dass die Herausforderungen die Lernenden dazu motivieren oder zwingen, die Lehrinhalte zu verstehen. Wie sich in der Auswertung zeigte, gelingt dies nur bedingt. In der Escape Story werden die Materialien, die wesentlichen Lehrinhalte enthalten, den Teilnehmenden ausnahmslos zu Beginn der jeweiligen Kapitel zur Verfügung gestellt. Zur Bearbeitung der Rätsel müssen die Spieler:innen die Hinweise innerhalb der Inhalte finden. Dies stellt allerdings nicht sicher, dass die Inhalte auch verstanden wurden und motivierte auch nur einen kleinen Teil der Probanden dazu, die Lehrinhalte ausführlich zu lesen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, müssen die Lehrinhalte stärker in die Rätsel eingebunden werden. Bspw. könnten die Teilfragen im vierten Kapitel zur biologischen Wirkung konkret Lehrinhalte aus der Vorlesung abfragen, sodass das Verständnis der Vorlesungsinhalte Notwendigkeit zum Weiterkommen ist. Auch der Umfang der Lehrinhalte wurde teilweise kritisiert. Insbesondere beim dritten Kapitel könnte der Textanteil stark reduziert werden und die Lehrinhalte auf diese Weise ansprechender für die Lernenden sein (zumal nicht alle Informationen aus dem Text relevant sind). Eine weitere Möglichkeit, die auch bereits im Verbesserungsvorschlag des fünften Kapitels ange-rissen wurde, ist der Ansatz, die Zugänglichkeit der Lehrinhalte zu erschweren. In der Escape Story besteht die Herausforderung darin, Hinweise für die Bearbeitung der Rätsel in den Lehrinhalten zu finden und diese zu nutzen, um das Rätsel zu lösen. Wenn jedoch die Lehrinhalte selbst erst gefunden und erarbeitet werden müssen, ließe sich vermuten, dass die Schüler:innen mehr Interesse daran haben, diese "*selbst erarbeiteten*" Inhalte auch zu verstehen.

Auch bei der Implementierung der hier angegebenen Verbesserungsvorschläge bleibt – solange man das Escape-Room-Format aufrechterhalten möchte und Rätsel nichtphysikalischer Art einen Großteil der Herausforderungen ausmachen - das Problem, dass das erfolgreiche Abschließen der Rätsel keinesfalls nachweist, dass die jeweiligen Lernziele erfüllt wurden. Ein Abschlusstest am Ende der Escape Story würde hier entgegensteuern, sprengt allerdings das Spielgefühl auf. Stattdessen ist es empfehlenswert, die explizite Lernzielüberprüfung aus der Escape Story auszulagern. Diese wesentliche Beobachtung sollte bei der Einbindung der Escape Story in den Schulunterricht beachtet werden und wird im folgenden Kapitel aufgegriffen.

## 6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In diesem Kapitel wird die Anwendbarkeit der Escape Story im Schulunterricht und ihr didaktischer Mehrwert vor dem Hintergrund der gestellten Forschungsfragen (siehe Kapitel 4.1) und den Auswertungsergebnissen diskutiert.

### 6.1 EINORDNUNG IN DEN UNTERRICHT

#### ZIELGRUPPE

Die Auswertung der Befragungsergebnisse bezüglich der Zielgruppe zeigte, dass die Escape Story für die 12. Klasse Grundkurs nach Einschätzung der teilgenommenen Lehrkräfte geeignet ist. Allerdings haben auch die Schüler:innen niedrigerer Klassenstufen die Escape Story gelobt und darauf hingewiesen, dass die Escape Story auch in der 9. und 10. Klasse anwendbar ist. Dies bestätigt die der Auswertung vorangegangene Annahme, dass das Escape-Room-Format sehr gut auf unterschiedliche Klassenstufen und Anforderungsniveaus skalierbar ist. Eine Lehrkraft betonte, dass *„dieser Aufbau ohne Frage für jede Klasse jeden Alters [motivierend ist]“* und eine Schülerin gab an, dass *„die [12.] Klassen eine geeignete Zielgruppe sind. Jedoch kann es für interessierte Schüler auch schon im jüngeren Alter passen“*. Die Auswertung zeigte, dass die Escape-Room-Rätsel sowohl für Schüler:innen der 9. bis 11. Klasse als auch für Lehramtsstudent:innen und Lehrkräfte gleichermaßen herausfordernd und motivierend sind. Interessant wäre der Versuch, die Escape Story insofern zu überarbeiten, dass sie sowohl für den Lernbereich in der 9. Klasse als auch für die Oberstufe geeignet ist. Dafür könnte man beispielsweise das vierte und fünfte Kapitel (biologische Wirkung und Dosisgrößen) in zwei unterschiedlichen Anforderungsniveaus entwerfen, zwischen denen die Lernenden wählen können oder eines der Kapitel optional machen. Besonders das fünfte Kapitel ist für 9.-Klässler ungeeignet<sup>10</sup> und könnte weggelassen oder durch eine der Klassenstufe gerechten Messaufgabe ersetzt werden. Für die restlichen Kapitel lässt sich feststellen, dass sie in der neunten Klasse umsetzbar sind und auch in der Oberstufe die Lernenden nicht unterfordern werden. Besonders die ersten beiden Kapitel lassen sich gut in den Lernbereich der 9. Klasse einbinden und können gleichzeitig in der 12. Klasse als Wiederholung dienen.

#### EINSATZ IM SCHULUNTERRICHT

Für die Escape Story sind unterschiedliche Formen der Einbindung in den Schulunterricht denkbar. Neben der rein asynchronen Form, bei der die Schüler:innen die Escape Story selbstständig bearbeiten (bspw. als Hausaufgabe), lässt sich die Escape Story auch in ein Flipped-Classroom-Konzept einbinden, wie es auch von einem der Teilnehmenden vorgeschlagen wurde. Auch ein Blended-Learning-Szenario wäre hierfür denkbar. Im Folgenden sollen die letzteren beide Ansätze konkretisiert werden. Bei beiden Formen sollten die Lernvoraussetzungen, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, gegeben sein. Kernumwandlungen, Strahlungsarten und der Aufbau von Nukliden sind zwar Lerninhalt der Escape Story, werden jedoch in komprimierter Form behandelt, sodass eine Betrachtung in den vorangegangenen Unterrichtsstunden sinnvoll ist und die ersten beiden Kapitel zur Wiederholung und Festigung dienen können. Der Beschreibung der Lernszenarien liegt

---

<sup>10</sup> Auch der Alternativentwurf, der das Umwandlungsgesetz behandeln würde, ist aufgrund der Exponentialfunktion nicht auf die 9. Klasse übertragbar.

insbesondere die Tatsache zugrunde, dass eine Überprüfung der Lernziele nur bedingt Teil der Escape Story selbst ist und im Anschluss an diese stattfinden sollte.

### ***Blended Learning***

In dieser Form würde die Escape Story in den klassischen Präsenzunterricht eingebunden werden. Zur Bearbeitung der Escape Story finden sich die Schüler:innen in 3er- oder 2er-Gruppen zusammen, wobei jeder Gruppe mindestens ein Computer oder ein Tablet zur Verfügung gestellt wird. Aus den Befragungsergebnissen lässt sich ableiten, dass Dreier-Gruppen eine geeignete Gruppengröße sind. Im Vergleich zur Partnerarbeit ließ sich beobachten, dass durchschnittlich weniger Bearbeitungszeit benötigt wurde. Zudem befördert die Gruppenarbeit das Erleben sozialer Eingebundenheit und kann somit motivierend wirken (vgl. Kapitel 2.1). An der Evaluation haben keine Vierer-Gruppen teilgenommen, weswegen sich hierfür keine konkreten Aussagen treffen lassen. Die Lehrkraft betreut das Spiel und kann bei Bedarf unterstützend eingreifen. Da für die Umsetzung zwei Doppelstunden notwendig sind, muss die Escape Story unterbrochen werden, wobei die Unterbrechung nach dem Kapitel 4 eingeplant ist und auch entsprechend in die Geschichte eingebunden wurde (zu diesem Zeitpunkt geht die Hauptfigur schlafen und es findet ein Zeitsprung statt). Dadurch ist zu Beginn der folgenden Doppelstunde eine kurze Wiederholung notwendig, sodass die Schüler:innen auch bei längerer Pause zwischen den Unterrichtsstunden gedanklich an die bisherige Geschichte anknüpfen können. Des Weiteren sollten die Schüler:innen eine zeitliche Orientierung bekommen, damit sie sich nicht in Kleinigkeiten verlieren. Hier wäre ein Ansatz, der auch bei herkömmlichen Escape Rooms genutzt wurde, einen ablaufenden Timer in die Escape Story einzubauen oder für jedes Kapitel empfohlene Bearbeitungszeiten anzugeben. Des Weiteren könnte die Escape Story auf einen Wettbewerb erweitert werden, bei dem die Lernenden mit möglichst wenig Hinweisen durch die Escape Story kommen müssen und entsprechend belohnt werden. Im Anschluss an die Escape Story sollte eine Form der Lernzielüberprüfung stattfinden. Eine Möglichkeit wäre eine Art Abschlusstest, welcher je nach Präferenz auch bewertet werden kann. Für das hier beschriebene Unterrichtsszenario wurde eine Verlaufsplanung erstellt (siehe *Anhang A 3*), die auch Vorschläge für Aufgabenstellungen des Abschlusstests enthält<sup>11</sup>.

### ***Flipped Classroom***

Eine Alternative bietet das integrierte Lernkonzept des Flipped Classroom. Hier bearbeiten die Lernenden die Escape Story in der ersten Phase als Hausaufgabe. Dafür können sie sich in Gruppen treffen (auch über Online-Konferenzen möglich) und die Escape Story selbstständig spielen. Dieses Format würde ein höheres Maß an Autonomieerleben begünstigen und dafür sorgen, dass die Lernenden die Inhalte in ihrem eigenen Tempo rezipieren können. Auch die Evaluation zeigte, dass keine Lehrkraft für die Betreuung notwendig ist, zumal die optionalen Hinweise Sackgassen verhindern. In der anschließenden Präsenzphase können nun die in der Escape Story erlangten Erkenntnisse angewendet, darauf aufbauende Aufgaben bearbeitet oder eine Zusammenfassung und Ergebnissicherung vorgenommen werden. Auf diese Weise kann die Escape Story an die restliche Unterrichtsreihe anknüpfen.

---

<sup>11</sup> Die Planung soll lediglich als Orientierungshilfe für Lehrkräfte dienen. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wurde auf eine detailliertere Ausarbeitung des Unterrichtsentwurfs verzichtet.

Es zeigt sich, dass durchaus umsetzbare Konzepte für die Einbettung der Escape Story in den Schulunterricht denkbar sind<sup>12</sup>. Zusammenfassend lässt sich, auf Grundlage der Evaluationsergebnisse, die Escape Story als ein zielführendes, auch im Rahmen herkömmlichen Schulunterrichts realisierbares Unterrichtsmodul bewerten. Dennoch ist zu betonen, dass die Escape Story zwar einen inhaltlich abgeschlossenen Rahmen bietet, allerdings nicht als ein Unterrichtsmodul zu verstehen ist, dass ohne weitere Anknüpfungspunkte und alleinstehend im Unterricht genutzt werden kann und Lernerfolg garantiert. Stattdessen kann dieses Format zielführend eingesetzt werden, wenn es auf vorher behandelte Inhalte aufbaut (hier Kernumwandlungen und Strahlungsarten), die Inhalte anhand einer konkreten Kontextorientierung vertieft (hier das Radonproblem) und anschließende Unterrichtsphasen die Erkenntnisse aufgreifen, zusammenfassen oder der Lernzielüberprüfung dienen. Auf diese Weise kann die Escape Story durchaus in den Lernbereichen zur Kernphysik angewendet werden. Ergänzend bleibt jedoch auch die Alternative, die Escape Story lediglich als "*Spiel an und für sich*" zu betrachten, dass interessierte Schüler:innen selbstständig bearbeiten können, um sich über den Schulunterricht hinaus mit der Radonbelastung auseinanderzusetzen. Auch in dieser Form ohne explizite Lernerfolgskontrolle kann die Escape Story einen didaktischen Mehrwert bieten.

## 6.2 DIDAKTISCHER MEHRWERT DES ESCAPE-ROOM-FORMATS

Zuletzt sei zu klären, inwieweit und durch welche Gestaltungselemente das Escape-Room-Format einen didaktischen Mehrwert bietet.

Im Allgemeinen zeigte sich in der Evaluation, dass die Gestaltungsprinzipien, wie sie in der didaktisch-methodischen Begründung beschrieben wurden, mehrheitlich ihren Zweck erfüllt haben. Die Teilnehmer:innen gaben an, dass das Escape-Room-Format zur Motivation beiträgt, die Escape Story motivierend und spannend gestaltet ist und bei der statistischen Mehrheit das Interesse am Thema der Radonbelastung durch dieses Format befördert wurde. In den Antworten auf offene Fragen wurde mehrmals die Vielfalt der Aufgaben positiv herausgestellt. Des Weiteren zeigte sich, dass die Rätsel indirektes Interesse am Lernstoff wecken können und die Lernenden zu einer Auseinandersetzung mit diesem animieren. Hier auftretende Schwierigkeiten (insbesondere, dass ein erheblicher Anteil der Lernenden die Texte eher überflogen hat) sind nicht auf das Escape-Room-Format an sich, sondern vielmehr auf die Aufbereitung zurückzuführen. Mithilfe der bereits angesprochenen Verbesserungsvorschläge ließe sich vermutlich auch diesem entgegenwirken.

Im Folgenden sind qualitative Aussagen, die aus der Auswertung, den vorangegangenen Betrachtungen und meinen persönlichen Erfahrungen während der Erstellung der Escape Story abgeleitet wurden, aufgelistet:

---

<sup>12</sup> Die hier beschriebenen Ansätze wurden nicht erprobt. Es wurde im Laufe der Evaluation lediglich die Escape Story selbst getestet.

- Das Escape-Room-Format bietet die Möglichkeit zur hohen Vielfalt in den Herausforderungen. Dies sorgt nicht nur für die Adressierung breit gefächerter Lernziele, sondern trägt auch wesentlich zur Motivation und dem Spaßfaktor bei.
- Ein weiterer entscheidender Mehrwert der digitalen Form sind die vielfältigen Möglichkeiten zur Mediennutzung, die unterschiedlichste didaktische Ansätze eröffnen.
- Die Geschichte hat die Lernenden dazu animiert, die Escape Story zu spielen und hat somit ihren Zweck als Catch-Komponente erfüllt.
- Die Rätsel waren die Elemente der Escape Story, die den Lernenden am meisten im Gedächtnis blieben und augenscheinlich für die Mehrheit der Probanden den wesentlichen Spaßfaktor ausmachten.
- Der Anspruch der Rätsel ist für den Erstellenden der Escape Story schwer einzuschätzen und muss gut abgewogen werden. Bei einem zu hohen Anforderungsniveau bleibt das Kompetenzerleben auf der Strecke (siehe Anmerkungen zum fünften Kapitel).
- Ein weiterer möglicher Ansatz, der nicht Teil dieses Escape-Story-Entwurfs war, ist die Möglichkeit, dass die Lernenden sich innerhalb der Regeln der Escape Story die Inhalte auf irgendeine Weise selbst erarbeiten müssen, wodurch sie evtl. weiter zur Auseinandersetzung mit den Lerninhalten angeregt werden können.
- Keiner der Teilnehmenden brach die Escape Story vorzeitig ab. Es lässt sich vermuten, dass hierfür die innere Differenzierung, die die Bereitstellung von Hinweisen ermöglichte, entscheidend war.
- Um eine Auseinandersetzung mit den Lehrinhalten anzuregen, ist es essenziell, die Rätsel mit den Inhalten zu verzahnen. Dies stellte sich bei der Erstellung der Escape Story als die größte Herausforderung dar und bei den Kapiteln, in denen dies nicht konsequent gelang, gaben die Teilnehmer:innen mehrfach Probleme mit dem Verständnis an (insb. Kapitel 4).
- Bei der Verwendung von digitalen Escape Rooms im Schulunterricht ist zu beachten, dass ihre Erstellung mit einem erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden ist.

Zusammenfassend haben sich zwar einige Kritikpunkte an dem hier vorliegenden Entwurf der Escape Story ergeben. Doch bereits die erhöhte Interaktivität und die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten ermöglichen bei sinnvoller Umsetzung eine interessenfördernde Lernumgebung. Die Anreicherung um eine ausgestaltete Geschichte führt ebenfalls dazu, dass Lernende die Escape Story gerne durchführen. Insgesamt hat sich gezeigt, dass das Escape-Room-Format einen didaktisch wertvollen Rahmen für spielerisches, selbstgesteuertes und kompetenzorientiertes Lernen bietet.

## 7 FAZIT

Die in dieser wissenschaftlichen Arbeit entworfene Escape Story wurde von 11 Schüler:innen und 10 Lehrer:innen bzw. Lehramtsstudent:innen erprobt. Die Escape Story konnte sich insofern bewähren, dass die Evaluation allgemein positiv ausfiel. Die verwendeten Gestaltungselemente hatten eine motivierende Wirkung auf die Spieler:innen und die Escape Story wurde allgemein von den Teilnehmenden gelobt. Hier ist besonders die Methoden- und Herausforderungsvielfalt hervorzuheben. Die Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten und der kreative Freiraum – sowohl für die Lehrkraft, die eine solche Escape Story entwirft, als auch für die Spieler:innen – eröffnen einige didaktische Potentiale und die Abwechslung hält sowohl die Neugierde an der Bearbeitung als auch das Kompetenzerleben aufrecht. Auch die Einbettung in ein Narrativ zeigte eine interessenfördernde Wirkung. Weiterer Vorteil ist die Überwindung von zeitlichen und räumlichen Schranken und die Möglichkeit, dass die Schüler:innen die Escape Story selbstständig spielen können.

Bezüglich der Unterrichtseinbindung hat sich gezeigt, dass es durchaus realisierbare Konzepte gibt, um die Escape Story in den Schulunterricht einzubetten. Die 12. Klasse des Grundkurses Physik ist eine geeignete Zielgruppe, mit einigen Anpassungen ließe sich die Escape Story sogar auch auf die 9. Klasse übertragen. Auch die Skalierbarkeit der Escape-Room-Herausforderungen auf unterschiedliche Anforderungsniveaus sowie die Möglichkeit zur inneren Differenzierung sind weitere entscheidende Vorteile.

Dennoch sind einige Schwierigkeiten aufgetreten, die Schlussfolgerungen für weitere Entwürfe von digitalen Escape Rooms ermöglichen. Zum einen sei die Tatsache erwähnt, dass eine Verzahnung der Lehrinhalte mit den Rätseln nur bedingt gelang. Es stellte sich heraus, wie wesentlich eine enge Verknüpfung dieser beiden Elemente ist, um wirklichen Lernerfolg bzgl. sachkompetenzorientierter Lernziele zu ermöglichen. Bei der Entwicklung einer Lehrinhalte vermittelnden Escape Story ist also besonders darauf zu achten, Mechanismen einzubauen, die Schüler:innen zu Bearbeitung der Lehrinhalte unmittelbar motivieren oder gar zwingen. Ein weiterer entscheidender Punkt, der jedoch nicht als Kritik an dem Escape-Room-Format an sich zu verstehen ist, ist die Tatsache, dass es ein Lernspiel bleibt und als solches betrachtet werden sollte. Dieses spielerische Format kann zwar auch für die Erarbeitung neuer Inhalte genutzt werden, bietet aber keine Ergebnissicherung oder explizite Lernerfolgskontrolle. Dieser Aspekt sollte bei der Einbettung in den Unterricht beachtet werden und es sollten entsprechende Lernphasen eingeplant werden, die hier entgegenwirken. Durch realisierbare Verbesserungen oder äußere Ergänzungen lässt sich die Mehrheit der erwähnten Schwierigkeiten der Escape Story beheben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Rätseln innerhalb eines fachlichen Kontexts sowie eine spannend gestaltete Rahmengeschichte direkt oder indirekt Interesse am Lernstoff befördern können. Letzten Endes bleibt die Beobachtung, dass die Inspiration des Escape Rooms eine didaktisch wertvolle Vorlage bietet, um kompetenzorientierte und interessenfördernde Unterrichtsmodule zu entwerfen.



## LITERATURVERZEICHNIS

- Bethge, K., Walter, G., Wiedemann, B. (2008). *Kernphysik: Eine Einführung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.). (2016). *Radon. Ein kaum wahrgenommenes Risiko*.  
Abgerufen am 18.01.2020 von [https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/stko-radon.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/stko-radon.pdf?__blob=publicationFile&v=10)
- Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.). (2019). *Radon-Handbuch Deutschland*.  
Abgerufen am 18.01.2020 von [https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/radon-handbuch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/radon-handbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=9)
- Deci, E., & Ryan, R. (1993). *Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik*. Zeitschrift für Pädagogik 39(2), S. 223-238.  
Abgerufen am 07.05.2021 von [https://www.pedocs.de/volltexte/2017/11173/pdf/ZfPaed\\_1993\\_2\\_Deci\\_Ryan\\_Die\\_Selbstbestimmungstheorie\\_der\\_Motivation.pdf](https://www.pedocs.de/volltexte/2017/11173/pdf/ZfPaed_1993_2_Deci_Ryan_Die_Selbstbestimmungstheorie_der_Motivation.pdf)
- Gritsch, S. (2012). *Die Likert-Skala – Meinungen abbilden*. ergopraxis, 5(01), S. 16-17.  
Abgerufen am 03.04.2021 von <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/pdf/10.1055/s-0031-1300814.pdf>
- Hänze, M., Schmidt-Weigand, F. & Stäudel, L. (2010). *Gestufte Lernhilfen. Individuelle Förderung durch Innere Differenzierung*. Ein Praxishandbuch für Lehrerinnen und Lehrer der Sekundarstufe II, S. 63-73.
- Heinicke, S. (2014). *Die Erforschung der Radioaktivität – eine „geheimnisvolle Wissenschaft“*. Naturwissenschaften im Unterricht-Physik, 25(141/142).
- Helmke, A., & Schrader, F. W. (2009). *Qualitätsmerkmale „guten Unterrichts“*. Handbuch der Erziehungswissenschaft, S. 701-712. Ferdinand Schöningh.
- Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife*. Berlin.  
Abgerufen am 13.01.2021 von [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2020/2020\\_06\\_18-BildungsstandardsAHR\\_Physik.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf)
- Kapp, K. M. (2013). *The Gamification of Learning and Instruction Fieldbook: Ideas into Practice*. John Wiley & Sons.
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.). (2020). *Physikdidaktik: Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Krapp, A. (1998). *Entwicklung und Förderung von Interessen im Unterricht*. Psychologie in Erziehung und Unterricht, 44(3), S. 185-201.  
Abgerufen am 07.05.2021 von [https://www.researchgate.net/profile/Andreas-Krapp-2/publication/262601721\\_Entwicklung\\_und\\_Forderung\\_von\\_Interessen\\_im\\_Unterricht/links/00b4953837945e-fedc000000/Entwicklung-und-Foerderung-von-Interessen-im-Unterricht.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andreas-Krapp-2/publication/262601721_Entwicklung_und_Forderung_von_Interessen_im_Unterricht/links/00b4953837945e-fedc000000/Entwicklung-und-Foerderung-von-Interessen-im-Unterricht.pdf)

- Krapp, A. (2005). *Das Konzept der grundlegenden psychologischen Bedürfnisse. Ein Erklärungsansatz für die positiven Effekte von Wohlbefinden und intrinsischer Motivation im Lehr-Lerngeschehen.* Zeitschrift für Pädagogik, 51(5), S. 626-641.  
Abgerufen am 02.05.2021 von [https://www.pedocs.de/volltexte/2011/4772/pdf/ZfPaed\\_2005\\_5\\_Krapp\\_Konzept\\_der\\_grundlegenden\\_psychologischen\\_Beduerfnisse\\_D\\_A.pdf](https://www.pedocs.de/volltexte/2011/4772/pdf/ZfPaed_2005_5_Krapp_Konzept_der_grundlegenden_psychologischen_Beduerfnisse_D_A.pdf)
- Krieger, H. (2002). *Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz: Band 1: Grundlagen.* B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Krieger, H. (2019). *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Langer, I., von Thun, F. S. & Tausch, R. (2019). *Sich verständlich ausdrücken.* Ernst Reinhardt Verlag, München.
- Leonhardt, T., Damnik, G., & Bergner, N. (2020). *Touch-Aktionen beim digitalen Lernen: Steigerung der Performance des visuellen Gedächtnisses durch aktive Reizverarbeitung.* 18. Fachtagung Bildungstechnologien der Gesellschaft für Informatik eV.
- Mayer-Kuckuk T. (2002). *Kernphysik: Eine Einführung.* B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Meier, C. & Seufert, S. (2003). *Game-based Learning: Erfahrungen mit und Perspektiven für digitale Lernspiele in der beruflichen Bildung.* Handbuch E-Learning, 5-2003.  
Abgerufen am 19.12.2020 von <https://www.alexandria.unisg.ch/34404/7/Meier-Seufert%20Lernspiele%20Handbuch%20eL%202003%20scan.pdf>
- Mitchell, M. (1993). *Situational interest: Its multifaceted structure in the secondary school mathematics classroom.* Journal of Educational Psychology, 85(3), S. 424 – 436.  
Abgerufen am 07.05.2021 von <http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=3d2e412c-63c7-4e3f-9da2-cb6ed00090c1%40pdc-v-sessmgr03>
- Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung (2019a). *Lehrplan Gymnasium Physik.* Dresden.
- Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung (2019b). *Lehrplan Gymnasium Biologie.* Dresden.
- Sächsisches Landesamt für Schule und Bildung (2019c). *Lehrplan Gymnasium Chemie.* Dresden.
- Sailer, M. (2016). *Die Wirkung von Gamification auf Motivation und Leistung.* Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Sambor, R. (2004). *Die Verwendung der Du-Form in deutschsprachigen Erzählungen.* Diplomarbeit, Universität Wien.  
Abgerufen am 03.04.2021 von <http://othes.univie.ac.at/154/1/sambor.pdf>
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., & Duit, R. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht.* Springer Berlin Heidelberg.
- Schöftner, T., Traxler, P. & Zuliani, B. (2020). *Möglichkeiten und Grenzen der Digitalisierung im Bildungsbereich und der gegenwärtigen Herausforderung in Zeiten der Pandemie.* Medienimpulse, 58(3).  
Abgerufen am 02.04.2021 von <https://journals.univie.ac.at/index.php/mp/article/view/4005/3859>

Stolz, W. (2005). *Radioaktivität: Grundlagen-Messung-Anwendungen*. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden.

Strahlenschutzkommission (Hrsg.) (2017). *Radon-Dosiskoeffizienten. Empfehlung der Strahlenschutzkommission*.

Abgerufen am 12.01.2021 von [https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse\\_PDF/2017/2017-12-05%20Empf%20Radon-Dosiskoeffizienten.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2017/2017-12-05%20Empf%20Radon-Dosiskoeffizienten.pdf?__blob=publicationFile)

Wiemker, M., Elumir, E. & Clare, A. (2015). *Escape Room Games: „Can you transform an unpleasant situation into a pleasant one?“*. *Game Based Learning*, 55.

Abgerufen am 18.12.2020 von <https://thecodex.ca/wp-content/uploads/2016/08/00511Wiemker-et-al-Paper-Escape-Room-Games.pdf>

Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A., & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15.

Abgerufen am 08.05.2021 von [http://archiv.ipn.uni-kiel.de/zfdn/pdf/15\\_Wilde.pdf](http://archiv.ipn.uni-kiel.de/zfdn/pdf/15_Wilde.pdf)

Zichermann, G., & Cunningham, C. (2011). *Gamification by Design: Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps*. O'Reilly Media.

# ANHANG

## A 1 ÜBERSICHT ÜBER DIE KAPITEL VON ESCAPE RADON

KAPITEL 1: DIE UMWANDLUNG VON RADON		Zeit Einarbeitung: 15 min Zeit Rätsel: 10 min
INHALT	<b>Lerngegenstand:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kernphysikalische Grundlagen - <i>Nuklid-Aufbau, Radioaktivität</i></li> <li>- Kernumwandlungen – <i>Umwandlungsarten, -gleichungen, -ketten</i></li> </ul>	<b>Materialien:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Audiolog 1</li> <li>2. radio.pdf - <i>dient als Wiederholung der Grundlagen der Radioaktivität</i></li> <li>3. Nuklidkarte - <i>zum Nachschlagen der Radionuklide</i></li> </ol>
	<b>Lernziel:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Schüler:innen können das Phänomen der Radioaktivität erklären.</li> <li>- ... nutzen ihre Kenntnisse über den Aufbau von Atomkernen und die Umwandlungsarten, um Kernumwandlungsgleichungen aufzustellen.</li> </ul>	
RÄTSEL	<b>Aufgabe:</b> Berechne die ersten drei Umwandlungsprodukte von Radon-222.	
	<b>Benötigte Hinweise:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nuklidkarte - <i>Für die Radionuklide finden sich hier u.a. Angaben zu deren Umwandlungsart</i></li> <li>2. radio.pdf - <i>Hier stehen die Infos zu den Kernumwandlungsgleichungen</i></li> </ol>	<b>Lösung:</b> Po-218 Pb-214 Bi-214
	<b>Lösungsweg:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mithilfe der Nuklidkarte Umwandlungsart von Rn-222 ermitteln</li> <li>2. Nach der in radio.pdf erklärten Vorgehensweise die Umwandlungsgleichung aufstellen und das erste Umwandlungsprodukt berechnen</li> <li>3. Für die nächsten beiden Folgeprodukte analog vorgehen</li> </ol>	
FAZIT	Radon-222 ist radioaktiv. Aus der Radonumwandlung folgt eine Umwandlungskette mit mehreren Umwandlungsprodukten unter der Aussendung von Alpha- und Beta-Strahlung.	

KAPITEL 2: DIE STRAHLUNG DER RADONUMWANDLUNG		Zeit Einarbeitung: 10 min Zeit Rätsel: 10 min
INHALT	<b>Lerngegenstand:</b> Ionisierende Strahlung – <i>Alpha- und Beta-Strahlung, Reichweite, Ionisationsvermögen</i>	<b>Materialien:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Radonreihe - <i>alle Umwandlungsprodukte der Rn-222-Kette sowie die Umwandlungsart</i></li> <li>2. Brief Alpha &amp; Beta - <i>grundlegende Infos zur Alpha- &amp; Beta-Strahlung</i></li> </ol>
	<b>Lernziel:</b> Die Schüler:innen kennen die Eigenschaften von Alpha- und Beta-Strahlung.	
RÄTSEL 1	<b>Aufgabe:</b> Finde den Alpha-Code.	
	<b>Benötigte Hinweise:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Brief Alpha - <i>Hier finden sich Zeitangaben und der Link zum Video</i></li> <li>2. Video Nebelkammer (über Brief Alpha) - <i>Alpha- und Beta-Spuren in der Nebelkammer</i></li> </ol>	<b>Lösung:</b> TPVL

	<b>Lösungsweg:</b> 1. Der Link im PS des Alpha-Briefs führt zum Nebelkammer-Video 2. 4 Zeitangaben im Brief: Zu den Zeiten erzeugen im Video die Ionisationspuren der Alphastrahlung Buchstaben, die in der richtigen Reihenfolge das Codewort ergeben	
<b>RÄTSEL 2</b>	<b>Aufgabe:</b> Finde den Beta-Code.	<b>Lösung:</b> URaRn
	<b>Benötigte Hinweise:</b> 1. Brief Beta - <i>Hier findet man über den Hinweis im PS die Alufolie</i> 2. Alufolie (über Brief Beta) - <i>Hier ist das Logikrätsel abgedruckt</i>	
	<b>Lösungsweg:</b> 1. Laut des PS im Beta-Brief findet sich der Hinweis bei Aluminium 2. Auf die Aluminiumwand in Abbildung klicken, um Alufolie zu erhalten 3. Logikrätsel auf der Alufolie: Die drei korrekten Symbole mithilfe logischer Verknüpfung der Aussagen in der richtigen Reihenfolge anordnen, um Codewort zu bestimmen	
<b>FAZIT</b>	Die durch die Radon-222-Umwandlungen erzeugte Alpha- und Beta-Strahlung ist ionisierend, bei äußerer Exposition jedoch ungefährlich für den menschlichen Körper.	

<b>KAPITEL 3: DER WEG VON RADON</b>		<b>Zeit Einarbeitung:</b> 15 min <b>Zeit Rätsel:</b> 5 min
<b>INHALT</b>	<b>Lerngegenstand:</b> Verhalten von Rn-222 und Folgeprodukten – <i>Entstehung im Boden, Anreicherung in Gebäuden, Aerosolanlagerungen, Weg in die Lunge</i>	<b>Materialien:</b> 1. Audiolog 2 2. stko_1.pdf – <i>Infobroschüre zur Ansammlung von Radon und dessen Wirkung auf den menschlichen Körper</i>
	<b>Lernziel:</b> Die Schüler:innen verstehen, weswegen Radon-222 den größten Teil zur natürlichen Strahlenbelastung beiträgt.	
<b>RÄTSEL</b>	<b>Aufgabe:</b> Ich habe dir etwas bei deinen bisherigen Unterlagen hinterlegen lassen.	
	<b>Benötigte Hinweise:</b> 1. Radonreihe – <i>hier sind weitere Infos versteckt</i> 2. Klebezettel (über Radonreihe) - <i>Hier stehen die nötigen Hinweise für das Bilderrätsel</i> 3. stko_1.pdf – <i>In der Abbildung der Lunge findet sich das Bilderrätsel</i>	<b>Lösung:</b> 2531
	<b>Lösungsweg:</b> 1. Bisherigen Unterlagen untersuchen: Bei der Radonreihe findet sich der Klebezettel mit dem eigentlichen Rätsel „ <i>Finde die Kennziffern für die Teilchen in der menschlichen Lunge!</i> “ und weiteren Infos. 2. Angaben auf dem Zettel mit der Abbildung der Lunge in stko_1.pdf (Seite 5) verknüpfen: Jedes Teilchen hat Zahlenwert und eine bestimmte Häufigkeit in der es in den drei Regionen (Mund, linker und rechter Lungenflügel) auftritt 3. Die Zahlenwerte der Teilchen multipliziert mit der jeweiligen Anzahl ergeben als Summe den Gesamtwert für Mund und Lungenflügel. Mit den	

	Infos auf dem Klebezettel lassen sich die den Teilchen zugeordneten Zahlenwerte berechnen (analog eines Gleichungssystems), welche wie auf Klebezettel angegeben die Lösung ergeben.	
<b>FAZIT</b>	Radon und seine Umwandlungsprodukte können in die menschliche Lunge gelangen. Die in der Lunge entstehenden Kernumwandlungen erzeugen Alpha- und Beta-Strahlung, welche für das Lungengewebe schädlich sind. Gerade in Kellerräumen ist die Radonkonzentration und das Erkrankungsrisiko erhöht.	

<b>KAPITEL 4: DIE BIOLOGISCHE WIRKUNG VON RADON</b>		<b>Zeit Einarbeitung:</b> 10 min <b>Zeit Rätsel:</b> 10 min
<b>INHALT</b>	<b>Lerngegenstand:</b> Biologische Wirkung – (In-)Direkte Strahlenwirkung, Ionisation, Radikalbildung, Entstehung von Krebszellen	<b>Materialien:</b> 1. Vorlesungsausschnitt – Informationen über biologische Strahlenwirkungen als Präsentation
	<b>Lernziel:</b> Die Schüler:innen kennen die biologische Wirkung von ionisierender Strahlung.	
<b>RÄTSEL</b>	<b>Aufgabe:</b> Finde das Anagramm.	
	<b>Benötigte Hinweise:</b> 1. Vorlesungsausschnitt – hier finden sich alle nötigen Infos und das Lösungswort 2. Nuklidkarte – wird für eine Teilaufgabe benötigt	<b>Zwischenlösung:</b> 0178 / 1231936 <b>Lösung:</b> Strahlenbiologie
	<b>Lösungsweg:</b> 1. Am Ende des Vorlesungsausschnitts wird eine verschlüsselte Telefonnummer angegeben. Diese muss entschlüsselt und angerufen werden. 2. Mithilfe Folie 7 der Vorlesung decodieren: Jeder Buchstabe entspricht der Antwort der 3 Fragen: A = 6 (Lösung aus Folie 5), B = 19 (Folie 4), C = 123 (Nuklidkarte) 3. Telefonnummer anrufen und Mailboxnachricht abhören 4. Name des Professors ist Anagramm für sein Fachgebiet, welches das Lösungswort ist	
<b>FAZIT</b>	Ionisierende Strahlung kann direkt oder über die Ausbildung freier Radikale Zellen und Gewebe beschädigen. Dies kann bis zur Beschädigung des Erbguts und damit Ausbildung von Krebsmutationen führen.	

<b>KAPITEL 5: DIE RADON-DOSIS</b>		<b>Zeit Einarbeitung:</b> 5 min <b>Zeit Rätsel:</b> 15 min
<b>INHALT</b>	<b>Lerngegenstand:</b> Quantitative Betrachtung – Aktivität, Dosisgrößen, Dosiskoeffizienten	<b>Materialien:</b> 1. Audiolog 3 2. Radondetektor – Messgerät für die Radon-Aktivitätskonzentration 3. Unsortierte Zettel – Infos über Dosis- und Expositionsgrößen
	<b>Lernziel:</b> Die Schüler:innen kennen die Bedeutung von Strahlendosisgrößen.	

<b>RÄTSEL</b>	<b>Aufgabe:</b> Miss die Aktivitätskonzentration und berechne daraus die Organ-Äquivalentdosis von Radon-222 auf deine Lunge pro Jahr.	
	<b>Benötigte Hinweise:</b> 1. Radondetektor – <i>hiermit muss interagiert werden, um die Messung durchzuführen</i> 2. Unsortierte Zettel – <i>hier stehen benötigte Infos für die Berechnung</i>	<b>Lösung:</b> 29,20
<b>Lösungsweg:</b> 1. Messung mithilfe Zettel 3: Befehle beim Radondetektor durch Klicken durchführen, Radondetektor auf Schreibtisch platzieren und Messergebnis erhalten 2. Messergebnis (Aktivitätskonzentration) mit Dosiskoeffizient multiplizieren (siehe Zettel 7), um Organ-Äquivalentdosis zu erhalten (Auf Einheiten achten)		
<b>FAZIT</b>	Die Strahlenexposition liegt im Zimmer über dem Schwellenwert. Es ist von einer hohen Radonbelastung auszugehen, weswegen dringend Maßnahmen ergriffen werden müssen.	

<b>KAPITEL 6: SCHUTZ VOR RADON</b>		<b>Zeit Einarbeitung:</b> 10 min <b>Zeit Rätsel:</b> 5 min
<b>INHALT</b>	<b>Lerngegenstand:</b> Schutzmaßnahmen – <i>Praktischer Strahlenschutz, Radonvorsorgegebiete, Baumaßnahmen</i>	<b>Materialien:</b> 1. bfs.mp4 – <i>Infovideo über Radon-Schutzmaßnahmen</i> 2. Zeitungsartikel – <i>Artikel über Radonvorsorgegebiete</i>
	<b>Lernziel:</b> Die Schüler:innen können Maßnahmen zum Schutz vor Radon beurteilen.	
<b>RÄTSEL</b>	<b>Aufgabe:</b> Hör noch einmal genau hin.	
	<b>Benötigte Hinweise:</b> 3. Audiologs 1 – 3 & bfs.mp4 – <i>hier ist jeweils Morsecode versteckt</i> 4. Zeitungsartikel – <i>hier finden sich Informationen zur Decodierung von Morsecode</i>	<b>Lösung:</b> SAFE
	<b>Lösungsweg:</b> 1. Am Ende jedes erhaltenen Audiologs und des Videos ist ein Buchstabe morsecodiert 2. Unter dem Zeitungsartikel findet sich ein Link zur Decodierung von Morsecode 3. Mithilfe der Tabelle die vier Buchstaben entschlüsseln, um Codewort zu erhalten	
<b>FAZIT</b>	Es gibt umsetzbare Maßnahmen zum Schutz vor Radon, die nun ergriffen werden müssen, um die Radonbelastung zu reduzieren und das Kellerzimmer bewohnbar zu machen.	

## A 2 FRAGEBOGEN DER EVALUATION

Im Folgenden findet sich eine vollständige Auflistung der Fragestellungen und Antwortmöglichkeiten der digitalen Escape Story „Escape Radon“. Die insgesamt 22 Fragen sind in sechs Gruppen gegliedert. Es sind jeweils die Frageformate angegeben, wobei folgende Abkürzungen verwendet wurden:

- PF = Frage zur Erfassung der Merkmale der Probanden
- OF = offene Frage
- OFA = offene Frage für zusätzliche Anmerkungen
- RO = Frage, bei der Items nach einer Rangordnung sortiert werden müssen
- RF = nicht-standardisierte Ratingfrage
- SRF = standardisierte Ratingfrage.

Die Fragestellung lautet hier jeweils: „*Geben sie bitte an, wie sehr sie persönlich jeder dieser Aussagen zustimmen*“

Die Antwortmöglichkeiten sind *Stimme nicht zu, Stimme eher nicht zu, Stimme eher zu und Stimme voll zu.*

### 1. Allgemeines

#### 1.1. Ich bin ...

Antwortmöglichkeiten:

- *Schüler\*in*
- *Lehrkraft*
- *Lehramtsstudent\*in*
- *Sonstiges*

#### 1.2. Haben Sie in einer Gruppe oder allein die Escape Story bearbeitet?

Antwortmöglichkeiten:

- *Allein*
- *Zu zweit*
- *Zu dritt*
- *Zu viert oder mehr*

#### 1.3. Wie lange haben Sie zur Bearbeitung der Escape Story gebraucht? (OF)

### 2. Motivation

#### 2.1. Fragen zur Motivation und Geschichte (SRF)

zu bewertende Aussagen:

- *Mein Interesse an dem Thema wurde durch die Escape Story gefördert.*
- *Das Escape-Room-Format hat zur Motivation beigetragen.*
- *Die Geschichte war motivierend und spannend gestaltet.*
- *Die Geschichte hat eine Auseinandersetzung mit den Inhalten motiviert.*



### **3. Rätsel**

#### **3.1. Fragen zu den Rätseln (SRF)**

zu bewertende Aussagen:

- *Der Anspruch der Rätsel war angemessen.*
- *Ich hatte Spaß bei der Bearbeitung der Rätsel.*
- *Die Rätsel waren motivierend.*
- *Die Rätsel haben eine Auseinandersetzung mit den Inhalten motiviert.*
- *Die Rätsel haben eine Auseinandersetzung mit den Inhalten notwendig gemacht.*
- *Ich habe bei den Rätseln schnell erkannt, was ich zu tun hatte.*

#### **3.2. Ordnen sie die Rätsel nach Schwierigkeitsgrad (RO)**

zu sortierende Aussagen:

- *1.: Umwandlungsprodukte von Radon ermitteln*
- *2.: Den Code in den Nebelkammeraufnahmen finden (Alpha)*
- *3.: Das Aluminium-Logikrätsel finden und lösen (Beta)*
- *4.: Das Buchstaben-Zahlenrätsel in der Lunge lösen*
- *5.: Die Telefonnummer entschlüsseln und das Anagramm finden*
- *6.: Die Dosisgrößen berechnen.*

#### **3.3. War eines der Rätsel zu schwierig oder zu leicht? Falls ja, bitte benennen Sie dieses und begründen Sie. (OF)**

#### **3.4. Haben Sie Hinweise oder die Anzeige von Lösungen genutzt? Falls ja, bitte geben Sie an, bei welchen Rätseln. (OF)**

#### **3.5. Wie hilfreich waren die Hinweise? (Falls Sie keine Hinweise genutzt haben, bitte keine Antwort wählen) (RF)**

Antwortmöglichkeiten:

- *Sehr hilfreich*
- *Größtenteils hilfreich*
- *Ab und zu hilfreich*
- *Kaum hilfreich*
- *Gar nicht hilfreich*
- *keine Antwort*

#### **3.6. Falls Sie noch sonstige Anmerkungen zu den Rätseln haben, ist hier Platz dafür (Verbesserungsvorschläge, konkrete Kritik, ...). (OFA)**

## **4. Inhalt**

### **4.1. Bitte schätzen Sie ein, wie Ihre Vorkenntnisse zu den inhaltlichen Grundlagen vor dem Spielen der Escape Story waren. (RF)**

Antwortmöglichkeiten:

- *Ich kannte mich bereits sehr gut mit den behandelten physikalischen und biologischen Prozessen aus.*
- *Ich kannte mich bereits gut mit den meisten behandelten physikalischen und biologischen Prozessen aus.*
- *Ich kannte mich bereits etwas mit wesentlichen Grundlagen der Kern- und Strahlungsphysik aus.*
- *Ich wusste ein paar Dinge über Kern- und Strahlungsphysik, hatte aber kein wirkliches Verständnis davon.*
- *Ich hatte keinerlei Vorkenntnisse und die behandelten Inhalte waren alle neu für mich.*

### **4.2. Bitte schätzen Sie ein, wie Ihre Vorkenntnisse zum Radonproblem vor dem Spielen der Escape Story waren. (RF)**

Antwortmöglichkeiten:

- *Ich kannte mich bereits sehr gut mit dem Radonproblem aus.*
- *Ich wusste bereits etwas über das Problem der Radonbelastung und den Risiken.*
- *Ich habe davon gehört, dass Radon gefährlich ist, wusste aber nicht wirklich warum.*
- *Ich habe noch nie etwas von den durch Radon entstehenden Risiken gehört.*

### **4.3. Geben Sie bitte an, wie sehr Sie sich mit den Lehrinhalten auseinandergesetzt haben. (RF)**

Antwortmöglichkeiten:

- *Ich habe alles ausführlich gelesen und versucht, auch alles zu verstehen.*
- *Ich habe (so gut wie) alles gelesen.*
- *Ich habe die Texte eher überflogen.*
- *Ich habe das Lesen der Texte vermieden und sie mir nur dann angeguckt, wenn ich darin Hinweise vermutet habe.*
- *Ich habe noch nie etwas von den durch Radon entstehenden Risiken gehört.*

### **4.4. Fragen zu den Lehrinhalten (SRF)**

zu bewertende Aussagen:

- *Die Inhalte sind ansprechend veranschaulicht.*
- *Die Inhalte sind nachvollziehbar strukturiert.*
- *Die Inhalte sind informativ.*
- *Die Inhalte sind spannend.*
- *Ich habe die Inhalte verstanden.*
- *Ich erachte die Inhalte als relevant.*
- *Der inhaltliche Umfang war angemessen.*
- *Ich fühle mich zur Radonbelastung informiert.*
- *Ich bin durch die Escape Story dazu in der Lage, einen Standpunkt zur Problematik der Radonbelastung einzunehmen.*

#### **4.5. Fragen zum Verständnis (SRF)**

zu bewertende Aussagen:

- *Ich habe verstanden, was bei Kernumwandlungen passiert und wodurch sie entstehen.*
- *Ich habe die Eigenschaften der Alpha- und Beta-Strahlung und deren Wirkung verstanden.*
- *Ich habe die biologische Wirkung von ionisierender Strahlung verstanden.*
- *Ich habe verstanden, wofür Strahlendosisgrößen verwendet werden.*
- *Ich habe verstanden, wie man sich vor Radon schützen kann.*
- *Ich habe verstanden, warum die Radonbelastung ein Risiko darstellen kann.*

#### **4.6. Wie schätzen Sie das Verhältnis von Rätselumfang zum inhaltlichen Umfang ein?**

(RF)

Antwortmöglichkeiten:

- *Viel zu viel Inhalt*
- *etwas zu viel Inhalt*
- *Genau richtig*
- *etwas zu viele Rätsel*
- *viel zu viele Rätsel*
- *keine Antwort*

#### **4.7. Falls Sie noch sonstige Anmerkungen zu den Lehrinhalten haben, ist hier Platz dafür (Verbesserungsvorschläge, konkrete Kritik, ...). (OFA)**

### **5. Zielgruppe**

#### **5.1. Fragen bzgl. der Zielgruppe (SRF)**

zu bewertende Aussagen:

- *Ich kann mir die Escape Story gut als Unterrichtsmodul im Schulunterricht vorstellen.*
- *Der Zeitumfang ist für die Zielgruppe angemessen.*
- *Der inhaltliche Umfang ist für die Zielgruppe angemessen.*
- *Der inhaltliche Anspruch ist für die Zielgruppe angemessen.*
- *Der Rätselumfang und -aufwand ist für die Zielgruppe angemessen.*

#### **5.2. Stimmen Sie zu, dass die 11./12. Klasse (Gymnasium, Physik Grundkurs) die geeignete Zielgruppe für die Escape Story ist? Falls nicht, geben Sie bitte die aus ihren Augen geeignete(n) Zielgruppe(n) an und begründen Sie. (OF)**

#### **5.3. Falls Sie noch sonstige Anmerkungen zu der Eignung der Escape Story und ihrer Anwendbarkeit im Unterricht haben, ist hier Platz dafür. (OFA)**

### **6. Abschluss**

#### **6.1. Hat Ihnen die Escape Story gefallen? Bewerten Sie bitte den Gesamteindruck. (1**

*Stern...mangelhaft, ..., 5 Sterne ... sehr gut).*

Antwortmöglichkeiten: 1 bis 5 Sterne

#### **6.2. Falls Sie noch sonstige Anmerkungen, Feedback oder Verbesserungsvorschläge haben, ist hier Platz dafür. (OFA)**

## A 3 UNTERRICHTSENTWURF

<b>Lernbereich:</b> LB4 - Strahlung aus Atomhülle und Atomkern	<b>Fachliche Lernziele:</b> Die Schüler:innen ... S 1 können das Phänomen der Radioaktivität erklären. S 2 nutzen ihre Kenntnisse über den Aufbau von Atomkernen und die Umwandlungsarten, um Kernumwandlungsgleichungen aufzustellen. S 3 kennen die Eigenschaften von Alpha- und Beta-Strahlung. S 4 verstehen, weswegen Radon-222 den größten Teil zur natürlichen Strahlenbelastung beiträgt. S 5 kennen die biologische Wirkung von ionisierender Strahlung. S 6 kennen die Bedeutung von Strahlendosisgrößen. S 7 können Maßnahmen zum Schutz vor Radon beurteilen.
<b>Thema:</b> Radonbelastung	
<b>Klasse:</b> 12 (GK)	
<b>Zeit:</b> 2x 90min	

Phase/Zeit	Inhalt	Sozialform	Materialien	Bemerkungen
<i>Erste Doppelstunde</i>				
Einstieg 5'	Organisation der Gruppen Lehrkraft gibt allgemeine Hinweise zur Bearbeitung der Escape Story	-	Escape Story <i>Escape Radon</i>	Escape Story über <a href="http://escape-radon.bplaced.net/">http://escape-radon.bplaced.net/</a> zugänglich Hinweise zur Bearbeitung finden sich auf der Startseite unter <i>Info</i>
Erarbeitung 1 Kap. 1: 25' Kap. 2: 20' Kap. 3: 20' Kap. 4: 20'	Die Schüler:innen bearbeiten selbstständig die Kapitel 1 bis 4 der Escape Story Lehrkraft unterstützt bei Bedarf und steht für Fragen zur Verfügung	Gruppenarbeit		Darauf achten, dass die Gruppen ungestört arbeiten können, sodass sich alle Schüler:innen die Texte selbstständig durchlesen können

Zweite Doppelstunde				
Wiederholung 10'	Wiederholung der vorangegangenen Inhalte der Escape Story <ul style="list-style-type: none"> <li>- bisherige Geschichte rekapitulieren</li> <li>- Schüler:innen fassen zusammen, was sie sich gemerkt haben</li> <li>- Klärung offener Fragen</li> </ul>	Unterrichtsgespräch	-	-
Erarbeitung 2 Kap. 5: 20' Kap. 6: 15'	Die Schüler:innen bearbeiten selbstständig die Kapitel 5 und 6 der Escape Story Lehrkraft unterstützt bei Bedarf und steht für Fragen zur Verfügung	Gruppenarbeit	Escape Story Escape Radon	Lange Ladezeiten bei Kapitel 5. Bei technischen Schwierigkeiten: Escape Story auf Computer zur Verfügung stellen, sodass sie nicht online abgerufen werden muss
Zusammenfassung	Schüler:innen lesen sich die abschließende Zusammenfassung durch.	Einzelarbeit		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diskussion offener Fragen</li> <li>- Was ist euch aus der Escape Story hängen geblieben?</li> <li>- Vorstellen des BfS-Geoportals, Aufzeigen der Radonkonzentration in Deutschland und der Vorsorgegebiete</li> </ul>	Unterrichtsgespräch	BfS-Geoportal <a href="https://www.imis.bfs.de/geoportal/">https://www.imis.bfs.de/geoportal/</a>	
Abschlusstest / Aufgaben	Mögliche Aufgabenstellungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Berechne das Umwandlungsprodukt von gegebenen Nukliden</li> <li>- Vergleiche die Alpha- und Beta-Minus-Strahlung hinsichtlich ihrer Teilcheneigenschaften und Reichweite</li> <li>- Beschreibe den Prozess der Ionisation und erkläre, warum Ionisationsprozesse im menschlichen Körper schädlich sein können.</li> <li>- Erkläre, wofür Strahlendosisgrößen genutzt werden</li> <li>- Auflistung von Schutzmaßnahmen: Bewerte, welche der Schutzmaßnahmen für den Schutz vor einer Radonbelastung sinnvoll sind. Begründe deine Entscheidung.</li> </ul>	EA	Test / Arbeitsblatt	-



## **SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht wurden.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift