

iRadioactivity

Untersuchung radioaktiver Strahlung mit Smartphones & Co.

Von Alexander Molz, Jochen Kuhn, Sebastian Gröber, Jan Frübis und Andreas Müller

KLASSE:	12/13
ZEITUMFANG:	3 Schulstunden
THEMEN:	Radioaktivität; Abstandsgesetz, Abschirmung, Halbwertszeit
KOMPETENZEN:	Erkenntnisgewinnung
METHODEN:	Demonstrationsexperimente
SOZIALFORM:	Partnerarbeit
WEITERE MATERIALIEN:	App „RadioactivityCounter“ ¹⁾ ; Tablet-PC/Smartphone

Mittlerweile nutzt gut ein Drittel der Jugendlichen in Deutschland einen Tablet-PC und mehr als 80 % haben ein Smartphone.²⁾ Auch in Schulen hält der Tablet-PC zunehmend Einzug, wobei die Nutzung bisher primär als Notebook-Ersatz erfolgt. Die technische Entwicklung und der alltägliche Umgang der Schülerinnen und Schüler mit diesen Geräten können den Unterricht durchaus bereichern, wobei bisher häufig noch Möglichkeiten außer Acht gelassen werden, Smartphone und Tablet-PC als Experimentiermittel im naturwissenschaftlichen Unterricht allgemein und im Physikunterricht im Speziellen zu verwenden.

Der Einsatz dieser Geräte ist gerade im Physikunterricht sehr vielfältig möglich und darauf zurückzuführen, dass sie mit vielen internen Sensoren ausgestattet sind, u. a. mit Mikrofon und Kamera, Beschleunigungs-, Magnetfeldstärke- und Beleuchtungsstärkesensor, Gyroskop, GPS-Empfänger und teils sogar Temperatur-, Druck- und Luftfeuchtesensor. Mit den Sensoren erfasste Daten lassen sich über verschiedene Apps auslesen, sodass sowohl qualitative als auch quantitative Experimente möglich sind. Smartphones und Tablets stellen somit kleine, mobile Messlabore dar, die unübersichtliche Versuchsanordnungen ersetzen können und den Lernenden zudem aus ihrem Alltag gut bekannt sind.

Der lerntheoretische Ansatz dieser Einsatzmöglichkeiten beruht auf der hohen Authentizität des Experimentiermittels „Smartphone“ bzw. „Tablet-PC“ und gliedert sich in die Rahmentheorie des Situierens ein. Diese legt nahe, dass Schülerinnen und Schüler motivierter sind und höhere Leistungszuwächse erlangen, wenn sie mit Materialien experimentieren, die ihnen aus dem Alltag bekannt sind (s. dazu [1]).

In den letzten Jahren wurden im deutschen Sprachraum bereits verschiedene Beiträge zum Einsatz von Smartphones als Experimentiermittel im Physikunterricht (z. B. [2]–[7]) sowie entsprechende Lehrerhandreichungen [8] veröffentlicht. Seit 2013 publiziert außerdem die Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“ in jedem Heft die Beschreibung einer App samt zugehörigem Beispiexperiment [9].

Während in den bisherigen Darstellungen Experimente zur Mechanik unter Verwendung des Beschleunigungssensors und Experimente zur Akustik unter Verwendung des Mikrofons überwiegen (s. [10]–[11]), stellen wir in diesem Artikel Experimentiermöglichkeiten zur Radioaktivität vor. Dabei beschränken wir uns auf die Untersuchung des Abstandsgesetzes und des Absorptionsgesetzes von β -Strahlung sowie der Halbwertszeit radioaktiver Strahlung. Die Ablenkung von β -Strahlung im Magnetfeld sowie die Aufnahme deren Energiespektrums wird in [12] diskutiert.

Der Kamerasensor

Die Detektion ionisierender Strahlung erfolgt bei Smartphone und Tablet-PC durch meist als CMOS-Sensoren („Complementary Metal Oxide Semiconductor“) ausgeführte Kamerasensoren (s. [13]). Diese bestehen aus mehreren Millionen Sensorzellen, welche die Pi-

xel bilden, aus denen auch Fotos oder Videos zusammengesetzt sind. Jede Sensorzelle ist eine nur wenige Mikrometer kleine p-n-Diode, deren Halbleiterübergang strahlungsempfindlich ist und beim Eintreffen radioaktiver Strahlung ein weißes Pixel erzeugt. Obwohl CMOS-Sensoren in ihrer Funktionsweise mit Halbleiterdetektoren vergleichbar sind, sind diese wegen der fehlenden intrinsischen Schicht weniger empfindlich für γ -Strahlung. Beim Nachweis von β -Strahlung sind CMOS-Sensoren hingegen mit schulüblichen Halbleiterdetektoren vergleichbar.

Damit kein Umgebungslicht die Detektion überdeckt, muss die Kameralinse mit einer Kombination aus Klebeband und Kartonstreifen beziehungsweise Alufolie lichtdicht abgedeckt werden (s. **Abb. 1**). Aufgrund der Abdeckung und der Kameralinse können keine α -Teilchen detektiert werden.

Als Software zum Messen der eintreffenden Teilchen wird eine App wie z. B. „RadioactivityCounter“ (s. **Kasten 1**) benötigt, die im günstigsten Fall mit der Framerate des Smartphones bzw. Tablet-PCs (meist 30 Bilder/s) das Bild des Kamerasensors auswertet und die Anzahl

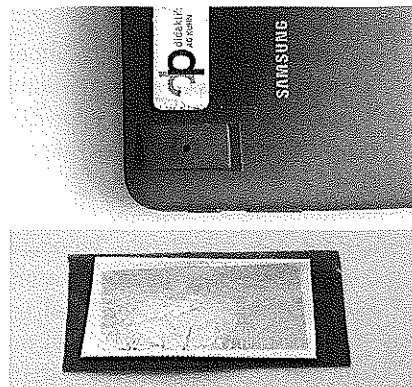


Abb. 1: Abdeckstreifen, aufgeklebt auf die Kameralinse eines Samsung Galaxy Tablet 2 7.0

Die App „RadioactivityCounter“

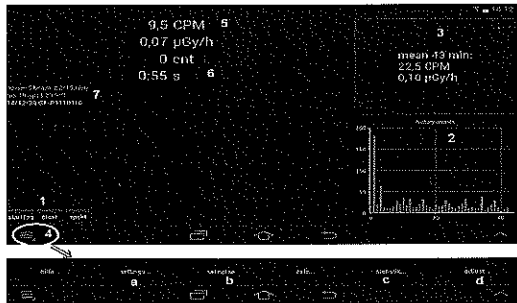


Abb. 2: Benutzeroberfläche der App RadioactivityCounter (Android): Hauptmenü

Die App RadioactivityCounter¹⁾ ist sowohl für iOS- als auch für Android-Geräte verfügbar. Hier sollen die wichtigsten Funktionen der App exemplarisch für die Android-Version verdeutlicht werden. RadioactivityCounter zählt innerhalb einer beliebigen Zeitspanne für jede einzelne Minute die Ereignisse auf dem Kamerasensor und speichert diese Ereigniszahl jeweils in einem Zeit-Ereigniszahl-Balkendiagramm (s. **2** in **Abb. 2**). Die Zeitachse ist dabei in diskrete Minutenschritte unterteilt. Bei der ersten Ausführung der App ist zunächst eine Kalibrierung des Kamerasensors durch Betätigen des Buttons „set noise“ im erweiterten Menü nötig (s. u. und **b** in **Abb. 2**). Dabei erkennt das Programm die sensoreigenen Rauschsignale automatisch und blendet diese in weiteren Messungen als Offset aus. Nach der Kalibrierung ist RadioactivityCounter einsatzbereit.

Das Hauptmenü

Die Schaltfläche „start/stop log“ (**1** in **Abb. 2**) startet bzw. stoppt die Protokollierung der Zählraten, „clear“ löscht vorher noch vorhandene Daten aus dem Zwischenspeicher, so dass eine neue Messreihe aufgenommen werden kann. Die Schaltfläche „spekt/graph“ schaltet zwischen den Anzeigen Spektrum (Intensitäts-Häufigkeits-Diagramm) und Graph (Zeit-Zählwert-Diagramm) hin und her (**2** in **Abb. 2**). Die Anzeige **3** in **Abbildung 2** stellt die detektierten Ereignisse, die während der gesamten Messdauer erfasst wurden, auf dem zugehörigen Ort des Kamerasensors in Form weißer Pixel grafisch dar. Dort werden außerdem die gesamte Messdauer und der darüber berechnete Mittelwert der Zählrate pro Minute angezeigt. Sind Kalibrierwerte zur Zuordnung von Zählrate und Dosisleistung in den erweiterten Einstellungen vorhanden, so wird hier außerdem ein gemittelter Wert für die Dosisleistung angezeigt.

Die Anzeige **5** in **Abbildung 2** stellt die Mittelwerte der Zählrate und der Dosisleistung über einen festen Zeitbereich dar, der sich im erweiterten Menü definieren lässt. Eine zusätzliche Funktion dieser Anzeige ist die Darstellung bei sich ändernden Werten (*rot*: Erhöhung; *grün*: Reduktion; *gelb*: gleich bleibend). Darunter (**6**) werden die verbleibende Zeit der laufenden Minute und die in dieser Minute bisher erfassten Ereignisse angezeigt. In Anzeige **7** lassen sich wichtige Werte zum Gerät (Bezeichnung, Framerate und Temperatur) und zu verschiedenen Einstellungen wie dem Noise-Wert ablesen.

Das erweiterte Menü

Durch Betätigung des Android-Menübuttons (**4**) erhält man weitere Einstellungsmöglichkeiten.

Zu den wichtigsten Bedienelementen dieses erweiterten Menüs gehört der Button „settings“ (**a**), der die Grundeinstellungen aufruft:

- „interval“ legt das Zeitintervall zur Mittelwertbildung der Zählrate in Anzeige **5** fest.
- „noise“ dient zur Anpassung des Rauschlevels: Ein kleiner Wert steht hier für eine hohe Sensitivität und für wenige durch den Kamerachip verursachte und zu unterdrückende Rauschsignale. Eine Erhöhung dieses Wertes um eine Stufe bedeutet für die meisten Geräte gleichzeitig eine Verminderung der Empfindlichkeit um etwa 10%, da ankommende Strahlung ebenfalls als Kamerarauschen aufgefasst und unterdrückt wird. Die Noise-Sensitivität wird bei der ersten Benutzung der Software automatisch erfasst und festgelegt (s. o.). Sie kann jedoch auch innerhalb des Settings-Menüs so angepasst werden, dass für den Nulleffekt eine sinnvolle Anzahl an Ereignissen pro Minute erfasst werden, die sich mit einem Vergleichsmessgerät ermitteln lässt (gewöhnlich 10 bis 20 Impulse pro Minute).
- Die Werte für „expose“ und „border“ sind bereits voreingestellt³⁾ und kommen nur zum Einsatz, wenn die Empfindlichkeit auf Kosten höherer Rauschsignale erhöht oder das Rauschen an den Rändern des Kamerasensors vermindert werden soll.
- Die Hintergrund-Strahlendosisleistung „backgrnd“ kann in 10-nSv/h-Schritten festgelegt werden und ist hier auf 90 nSv/h gesetzt.

Weitere Einstellmöglichkeiten sind die Benutzung der vorderen oder der rückseitigen Kamera, die Einspielung eines Alarm- oder Klicktons oder die Speicherung der per GPS erfassten Geodaten in Protokolldateien (Log-Dateien). Darin werden die gesammelten Daten tabellarisch gespeichert, was beispielsweise für die Dokumentation der Strahlenbelastung an unterschiedlichen Orten nützlich ist.

Der Button „set noise“ (**b** in **Abb. 2**) dient zur automatischen Erfassung und Festlegung des Rauschlevels des Kamerasensors. Dieser muss bei der ersten Inbetriebnahme der App betätigt werden, um unverfälschte Messwerte zu erfassen.

Beim Betätigen der Schaltfläche „statistik“ (**c**) gelangt man zu einer Auflistung der bereits aufgezeichneten Log-Dateien, die dann erneut angezeigt werden können.

Für die Darstellung der Daten gibt es verschiedene Möglichkeiten, z. B. als Balken- oder Liniendiagramm. Über den Menübutton des Smartphones können die einzelnen Messreihen als CSV-Dateien via E-Mail versendet oder auf das interne Speichermedium geschrieben werden. Von dort aus lassen sich die Daten dann z. B. per USB-Verbindung oder Dropbox exportieren. Schließlich kann man das Smartphone mit „adjust“ (**d**) kalibrieren.

detektierter β -Teilchen in aufeinanderfolgenden wählbaren Zeitintervallen aufsummiert.⁴⁾

Untersuchung des Abstandsgesetzes

Das Abstandsgesetz beschreibt die allein geometrisch und nicht durch Absorption bedingte Abnahme der Strahlungsintensität I bzw. der detektierten Zählrate n einer punktförmigen, isotropen radioaktiven Strahlungsquelle mit zunehmendem Abstand r zwischen Quelle und Detektor (s. **Kasten 2** und **Abb. 3**). Die im Abstand r zur Punktquelle detektierte Zählrate $n(r)$ sinkt dabei mit dem Quadrat dieses Abstandes. Es gilt

$$n(r) \cong I(r) = \frac{A}{4\pi \cdot r^2} \propto \frac{n_0}{4\pi r^2} \propto \frac{1}{r^2},$$

wobei n_0 die vom Nachweisgerät detektierte Zählrate im kleinsten Abstand zur Quelle und A die Gesamtaktivität des Strahlers ist.

Unter den genannten Voraussetzungen ist das Abstandsgesetz für die polyenergetische β -Strahlung streng erfüllt, da es für jeweils getrennt betrachtete Zählraten monoenergetischer β -Teilchen und damit für alle β -Teilchen bzw. die Summe der Zählraten erfüllt ist.

Versuch und Messergebnisse

Zur Untersuchung dieser Gesetzmäßigkeit wird der in **Kasten 2** dargestellte experimentelle Aufbau aus schultypischen Geräten verwendet (s. a. **Abb. 3**).

In **Abbildung 4** sind die ermittelten Zählraten gegen r^2 aufgetragen. Zusätzlich sind Regressionsgeraden dargestellt und deren Bestimmtheitsmaße R^2 angegeben.

Die nahe bei 1 liegenden Bestimmtheitsmaße bestätigen den Zusammenhang zwischen Zählrate und inversem Abstandskadrat. Unterschiedliche Steigungen der Regressionsgeraden sind auf die unterschiedliche Nachweisempfindlichkeit und die damit verbundenen, unterschiedlich hohen Zählraten der Geräte zurückzuführen. Weiterhin zeigen die guten Bestimmtheitsmaße, dass mobile Endgeräte vergleichbare Ergebnisse wie konventionelle Gaszählrohre liefern, allerdings mit etwa um den Faktor 10 kleineren Zählraten. Aus diesem Grund

sollte die Messdauer pro Messpunkt mindestens drei Minuten betragen.

Ein qualitativer experimenteller Nachweis zur Abnahme radioaktiver Strahlung mit zunehmendem Abstand zur Quelle gelingt mit der in **Kasten 2** vorgestellten Versuchsanordnung auch bei Verwendung schwach strahlender Präparate wie z. B. thoriumhaltiger Glühstrümpfe oder uranhaltiger Pechblenden.

Untersuchung des Absorptionsgesetzes

Für den Strahlenschutz ist das Absorptionsverhalten radioaktiver Strahlung in Materie von großer Bedeutung. Hierbei sind β - und γ -Strahlung von besonderem Interesse, da sie im Vergleich zur kurzreichweitigen α -Strahlung mittlere bis große Reichweiten in Luft und teilweise auch in fester Materie besitzen.

Die Absorption eines Teils der ursprünglichen Strahlung kann durch die exponentielle Abnahme der Zählrate n mit zunehmender Dicke d der durchstrahlten Materie nach dem Absorptionssgesetz beschrieben werden:

$$n(d) = n_0 \cdot e^{-\mu d},$$

wobei n_0 die Zählrate für die Dicke $d = 0$ bezeichnet und der Absorptionskoeffizient μ die Materialabhängigkeit der Absorption beschreibt.

Im Gegensatz zu monoenergetischer Strahlung beschreibt das Absorptionssgesetz die Absorption der polyenergetischen β -Strahlung wegen der Energieabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten allerdings nur näherungsweise.

Versuch und Messergebnisse

Den experimentellen Aufbau beschreibt **Kasten 3**.

Um die Messwerte in geeigneter Form darstellen zu können, muss man zunächst die o. g. Gleichung linearisieren

$$-\ln \left(\frac{n(d)}{n_0} \right) = \mu \cdot d$$

und anschließend die Werte für $-\ln \left(\frac{n(d)}{n_0} \right)$ gegen die Dicke d des Absorbermaterials auftragen.

Abbildung 6 stellt die Ergebnisse für die verschiedenen Absorbermaterialien, bezogen auf die drei als Messgeräte verwendeten mobilen Endgeräte, grafisch

dar. Die Steigung der Regressionsgeraden ist hier der Absorptionskoeffizient μ , wobei alle Geraden – wegen $n(d=0) = n_0$ – Ursprungsgeraden sein müssen. Für iPod und SGT 2 (s. **Abb. 6a–b**) können Regressionsgeraden mit etwa gleichen Steigungen ermittelt werden. Das S3 liefert hingegen wegen der kleineren Nachweisempfindlichkeit durchweg kleinere Absorptionskoeffizienten (s. **Abb. 6c**).

Aufgrund der bis auf einzelne Ausnahmen guten Bestimmtheitsmaße (s. **Tab. 1**) kann der exponentielle Abfall der Zählraten mit allen drei Geräten sehr gut nachgewiesen werden. Ebenso ist die Materialabhängigkeit der Strahlungsabsorption anhand der unterschiedlichen Geradensteigungen deutlich zu erkennen: Dichtere Materialien absorbieren β -Strahlung besser als weniger dichte.⁵⁾

Um die Qualität der ermittelten Absorptionskoeffizienten bewerten zu können, werden in **Tabelle 1** die relativen Abweichungen der Werte vom jeweiligen Wert eines schulischen Geiger-Müller-Zählrohrs als computerbasiertem Referenzgerät (CASSY) angegeben. Die Abweichungen variieren zwischen 17,3 % und 46,8 %, womit die mobilen Medien sicherlich nicht mit konventionellen Messgeräten konkurrieren können, aber immerhin Ergebnisse in derselben Größenordnung liefern.

Untersuchung von Zerfallsgesetz und Halbwertszeit

Kernumwandlungen radioaktiver Nuklide sind stochastische Prozesse, durch die der Zeitpunkt eines einzelnen Zerfalls zwar nicht vorhergesagt werden kann, wohl aber, wie viele Umwandlungen sich in einer Gesamtzahl von N vorhandenen radioaktiven Kernen über einen gewissen Zeitraum im Mittel ereignen.

Mathematisch lässt sich dies in Form des exponentiellen Zerfallsgesetzes ausdrücken $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, wobei λ als Umwandlungs- oder Zerfallskonstante bezeichnet wird. Sie stellt ein Maß für die Umwandlungswahrscheinlichkeit dar. $N(t)$ gibt die Anzahl der vorhandenen radioaktiven Kerne zur Zeit t an, N_0 die der Ausgangsnuklide. Die Halbwertszeit ist diejenige Zeit, in der die Zahl der radioaktiven Kerne auf die Hälfte des Anfangswertes abgesunken

ist. Durch Gleichsetzen der obigen Gleichung mit $\frac{1}{2}N_0$ ergibt sich:

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

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ und die Zerfallskonstante λ sind charakteristische Konstanten des jeweiligen Radionuklids. Da die Zahl der Radionuklide eines Präparats nicht direkt zugänglich ist, nutzt man zur experimentellen Überprüfung des Zerfallsgesetzes den proportionalen Zusammenhang zwischen der Anzahl vorhandener radioaktiver Kerne N und der mittels Detektor messbaren Zählrate n . Das Zerfallsgesetz lautet damit:

$$n(t) = n_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Versuch und Messergebnisse

Der Versuchsaufbau ist detailliert in **Kasten 4** beschrieben. Anhand des Balkendiagramms, das durch die App RadioactivityCounter (s. **Kasten 1**) erstellt wird, kann bereits unmittelbar nach der Datenaufnahme qualitativ der Abfall der detektierten Zählraten erkannt werden. Zur quantitativen Analyse der Messdaten sollten jedoch die von den Geräten in Form von Log-Dateien gespeicherten Messwerte auf einen PC übertragen und dort ausgelesen werden (s. **Kasten 1**).

Der experimentelle Nachweis des Zerfallsgesetzes wird mittels linearer Regressionsanalyse erbracht. Dazu wird das Zerfallsgesetz analog zum Absorptionsgesetz linearisiert und die Werte für

$$-\ln\left(\frac{n(t)}{n_0}\right)$$

werden gegen die Zeit t aufgetragen. **Abbildung 10** zeigt sowohl die Daten von SGT 2 und S3, als auch die des Referenzmesssystems CASSY mit Geiger-Müller-Zählrohr.⁹ Anhand der Regressionsgeraden und deren guten Bestimmtheitsmaßes kann für das SGT 2 der exponentielle Zerfall bestätigt werden. Das S3 liefert dagegen Daten, die stark um die Regressionsgerade streuen.

In der gewählten Darstellung ist die Steigung der Regressionsgeraden gleichzeitig auch die Zerfallskonstante λ . Aus ihr kann mittels o.g. Gleichung die Halbwertszeit berechnet werden. **Tabelle 2** fasst die so ermittelten Halbwertszeiten zusammen. Der mit dem GMZ und dem zugehörigen CASSY-Messwertsystem ermittelte Wert stimmt mit dem Lite-

raturwert der Halbwertszeit nahezu überein, wohingegen das SGT 2 um ca. 16 % davon abweicht. Das S3 liefert mit einer Abweichung von 2 % zwar einen relativ nah am Literaturwert liegenden Wert für die Halbwertszeit, der jedoch aufgrund der großen Streuung der Daten eher kritisch zu bewerten ist.

Da die Kamerachips mobiler Endgeräte β -Strahlung besser detektieren als γ -Strahlung, sollte für den quantitativen Nachweis letzterer eher auf externe Sensoren wie beispielsweise den Pocket Geiger⁷ zurückgegriffen werden.

Resümee

Mobile Endgeräte wie Smartphones und Tablet-PCs können nicht nur in der Mechanik oder der Akustik als Experimentiermittel im Physikunterricht eingesetzt werden, sondern lassen sich auch in auf den ersten Blick eher ungewöhnlichen Einsatzgebieten wie dem Themenfeld Radioaktivität zum qualitativen Nachweis ionisierender Strahlung – also als Messgerät – verwenden (s. auch [13]). Allerdings sind die Geräte für quantitative Aussagen, z.B. zur Bestimmung der Dosisleistung insbes. im schwachstrahlenden Bereich (Dosisleistung unter 1–10 $\mu\text{Gy/h}$) und im Bereich alltäglicher Umgebungsstrahlung – auch infolge ihrer verglichen mit professionellen Halbleiterdetektoren geringeren Sensitivität – nicht geeignet.

Trotz dieser Einschränkung erlauben die Geräte aber eine experimentelle Bestätigung physikalischer Gesetzmäßigkeiten radioaktiver Strahlung. Darüber hinaus können damit unübersichtliche Versuchsaapparaturen ersetzt werden und die mobilen Geräte sind den Lernenden aus ihrem Alltag gut bekannt, sodass die Untersuchung physikalischer Gesetzmäßigkeiten ein Stück näher in die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler gerückt werden kann.

Anmerkungen

- 1) <http://play.google.com/store/apps/details?id=com.rdklein.radioactivity&hl=de> (Kosten: 3,49 €)
- 2) http://www.bitkom.org/files/documents/BITKOM_Vortrag_Kempf_PK_Kinder_und_Jugendliche_3.0_-_28.04.2014.pdf [06/2014]
- 3) <http://www.hotray-info.de/html/radioactivity.html> [06/2014]
- 4) Die Handhabung der App RadioactivityCounter zur Messung radioaktiver Strahlung wird ausführlich in [14] beschrieben.

- 5) Die einzige Ausnahme ist das S3, dessen Messwerte keinen Unterschied im Absorptionsverhalten zwischen Pertinax und Papier aufweisen.
- 6) Der iPod touch kann in diesem Experiment nicht als Detektor verwendet werden. Die lange Messdauer von 15 min führt bei ihm vermehrt zu Kameraausfällen und damit zu fehlerhaften Zählraten.
- 7) s. dazu: <http://www.radiation-watch.org/p/english.html> [06/2014]
- 8) Da die maximale Reichweite von β -Strahlung in Luft ca. 10 m beträgt, können aufgrund des vergleichsweise kleinen Maximalabstands störende Effekte wie z.B. Absorption der Strahlung durch Luftmoleküle hier vernachlässigt werden.

Literatur

- [1] Kuhn, J.; Vogt, P.: Smartphone & Co. in Physics Education: Effects of Learning with New Media Experimental Tools in Acoustics. In: Kauertz, A. et al. (eds.): Multiple Perspectives on Teaching and Learning. 2014 (paper accepted).
- [2] Hirth, M.; Klein, P.; Kuhn, J.: Experimente mit Smartphone & Co. im Physikunterricht. In: MINTZirkel 2 (2013), Nr. 5/6, S. 10–11.
- [3] Kuhn, J.; Vogt, P.; Müller, S.: Handys und Smartphones. Einsatzmöglichkeiten und Beispiele Experimente im Physikunterricht. In: PdN – Physik in der Schule 60 (2011), Nr. 7, S. 5–11.
- [4] Vogt, P.; Kuhn, J.; Gareis, S.: Beschleunigungssensoren von Smartphones. Möglichkeiten und Beispiele Experimente zum Einsatz im Physikunterricht. In: PdN – Physik in der Schule 60 (2011), Nr. 7, S. 15–22.
- [5] Hirth, M. et al.: Smartphones im Physikunterricht: Experimente mit Mikrofon, Beschleunigungs- und Lichtstärkesensor. In: MNU 67 (2014), Nr. 3, S. 139–145.
- [6] Klein, P. et al.: Mobile Videoanalyse mit Tablet PC im Physikunterricht am Beispiel des freien Falls mit Luftreibung. In: PdN – Physik in der Schule 63 (2014), Nr. 6, S. 33–35.
- [7] Molz, A. et al.: Tablet-PCs als Experimentiermittel im Oberstufenunterricht – Experimente aus Optik und Kernphysik. In: PdN – Physik in der Schule 63 (2014), Nr. 6, S. 27–31.
- [8] Vogt, P.; Kuhn, J.; Wild, M.: Experimente mit Smartphones – grundlegende Mechanik. RAAbits Physik SEK III. Stuttgart: Dr. Josef Raabe Verlag, 2012.
- [9] Kuhn, J.; Wilhelm, T.; Lück, S.: Smarte Physik: Physik mit Smartphones und Tablet-PCs. In: Physik in unserer Zeit 44 (2013), Nr. 1, S. 44–45.
- [10] Kuhn, J.: Relevant information about using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments. In: Am. J. Phys. 82 (2014), p. 94.
- [11] Kuhn, J.: Smartphone-Physik: Ein Überblick über Experimente mit Smartphone und Tablet-PC im Physikunterricht. In: LA. Multimedia (2014), Nr. 1, S. 17–21.
- [12] Gröber, S.; Molz, A.; Kuhn, J.: Using Smartphones and tablet PCs for β -spectroscopy in an educational experimental setup. In: European Journal of Physics 36 (2014), paper submitted
- [13] Kaireit, T.; Stamm, G.; Hoeschen, C.; Wacker, F. K.: Smartphones jetzt noch smarter? Möglichkeit des Einsatzes als „Dosiswarner“. In: RöFo – Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren 185 (2013), Nr. 6, S. 558–562.
- [14] Kuhn, J.; Frübis, J.; Lück, S.; Wilhelm, T.: Smarte Physik: Smartphone als Geigerzähler? Die App RadioactivityCounter. In: Physik in unserer Zeit 44 (2013), Nr. 5, S. 253–255.

Nachweis des Abstandsgesetzes

Strahlungsquelle und Detektor

Als Präparat dient ein Sr-90-Stiftstrahler ($A = 45 \text{ kBq}$), der negativ geladene β -Teilchen emittiert und als bauartzugelassener Strahler in der Regel in Schulen vorhanden ist.

Als Detektoren werden drei verschiedene mobile Endgeräte mit der App „RadioactivityCounter“ (s. **Kasten 1**) genutzt: das Smartphone Samsung Galaxy S3 (S3), der Tablet-PC Samsung Galaxy Tab 2 7.0 GT P3100 (SGT 2) und der Apple iPod touch 4G (iPod).

Strahlenschutzmaßnahmen

Zum Schutz vor radioaktiver Strahlung wird der strahlungsaktive Teil des Stiftstrahlers zusätzlich von einer Metallabschirmung umgeben. Hierzu dient ein Standfuß aus Eisen. Durch ihn können der gesamte rückwärtige Bereich und Teile des seitlichen Bereiches des Strahlers, in dem sich meist der Experimentator befindet, vor radioaktiver Strahlung geschützt werden.

Zur zeitweisen Abschirmung des verbleibenden Strahlungsfeldes, z.B. bei der Veränderung des Detektorabstandes r , dient eine 1 cm dicke Aluminiumplatte, die bei Bedarf in eine im Aufbau befindliche Halterung eingesetzt werden kann (s. **Abb. 3**). Da sich der Detektor während der Messung im direkten Strahlungsfeld befindet, dient ein Spiegel (s. **Abb. 3**) dazu, Messdaten abzulesen, ohne sich selbst einer Strahlenexposition auszusetzen.

Aufbau

Die Strahlungsquelle und der Detektor werden auf einer optischen Bank so ausgerichtet, dass der Stiftstrahler und die Kamera auf einer zum Gerät senkrechten Achse durch die Kamera liegen.

Abstände können mithilfe der Skala der optischen Bank gemessen werden. Diese sollten mindestens dem fünf-fachen Durchmesser der aktiven Strahlungsfläche der Quelle entsprechen. Nur dann kann das Präparat als punktförmig angesehen werden. Die hohe Aktivität der

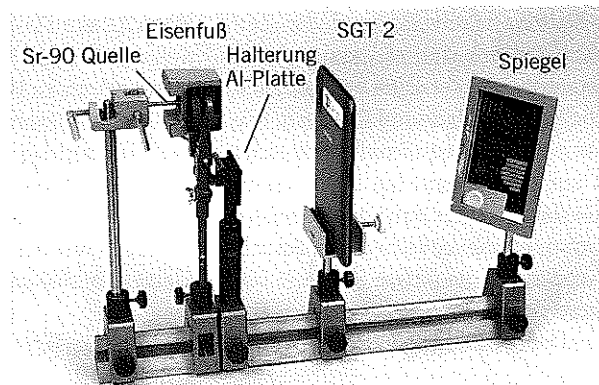


Abb. 3: Versuchsaufbau zum Abstandsgesetz; als Detektor wird hier das Samsung Galaxy Tab 2 (SGT 2) verwendet

Sr-90-Quelle und die gute Nachweispfinglichkeit von SGT 2 und iPod für β -Strahlung ermöglichen einen Anfangsabstand von $r_0 = 5 \text{ cm}$ und einen maximalen Abstand von $r_{\text{max}} = 25 \text{ cm}$. Die Schrittweite zwischen zwei Messwerten beträgt jeweils 2,5 cm. Für das S3 werden aufgrund seiner geringeren Sensitivität ein Messbereich von $r_0 = 2,5 \text{ cm}$ bis $r_{\text{max}} = 4,9 \text{ cm}$ und eine Schrittweite von 2 mm gewählt. Damit kann der Stiftstrahler mit einem Durchmesser der aktiven Strahlungsfläche von 5 mm zwar lediglich für SGT2 und iPod als punktförmige Quelle angesehen werden, es lässt sich jedoch auch für das S3 eine ausreichende Zahl Messwerte aufnehmen.⁸⁾

Durchführung

Nach Bestimmung der durch die natürliche Umgebungsstrahlung verursachten Nullrate werden die Zählraten zwischen den Abständen r_0 und r_{max} in den genannten Schrittweiten gemessen (mind. 3 min Messzeit pro Messpunkt), in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen und nullratenkorrigiert.

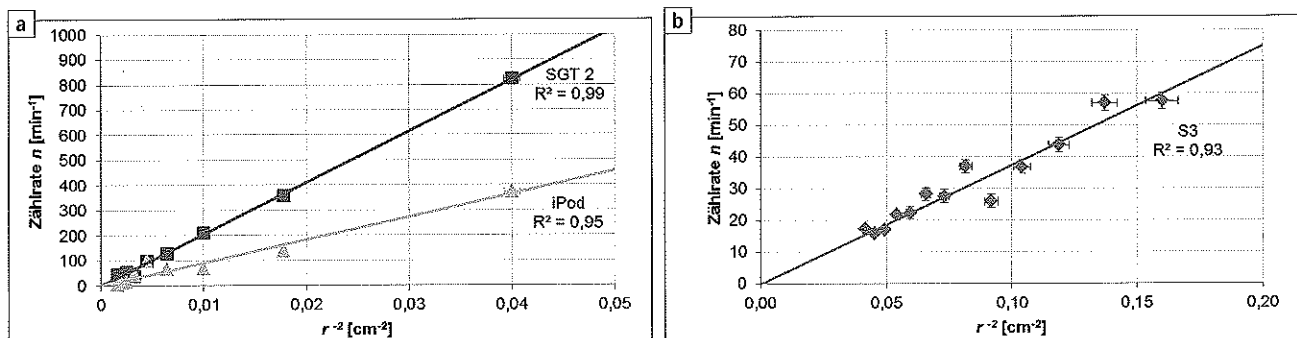


Abb. 4: Experimentelle Überprüfung des Abstandsgesetzes $n \sim r^{-2}$ für β -Strahlung mit a) iPod und SGT 2 und b) S3 als Strahlungsdetektoren

Nachweis des Absorptionsgesetzes

Materialien und Aufbau

Die Grundanordnung von Strahler und Detektor ist analog zum in **Kasten 2** beschriebenen Experiment.

Ergänzt wird der Aufbau lediglich durch eine Halterung für die untersuchten Absorbermaterialien Papier, Pertinax (Faserverbundkunststoff) und Aluminium (s. **Abb. 5**). Zur Untersuchung ihres Absorptionsverhaltens werden mehrere Stücke handelsüblichen Kopierpapiers der Stärke 0,1 mm und je zwei Pertinax beziehungsweise Aluminiumplättchen der Stärken 0,5 mm, 1 mm und 2 mm verwendet.

Durchführung

Vor dem Versuch ist erneut die Nullrate zu ermitteln (s. a. **Kasten 2**).

Im eigentlichen Experiment wird zunächst die Zählrate ohne Absorber n_0 bestimmt. Anschließend wird ein Absorbermaterial in das Strahlungsfeld eingebracht und seine Dicke sukzessive erhöht. Anhand der vom Detektor registrierten, verminderten Zählraten kann so das exponentielle Absorp-

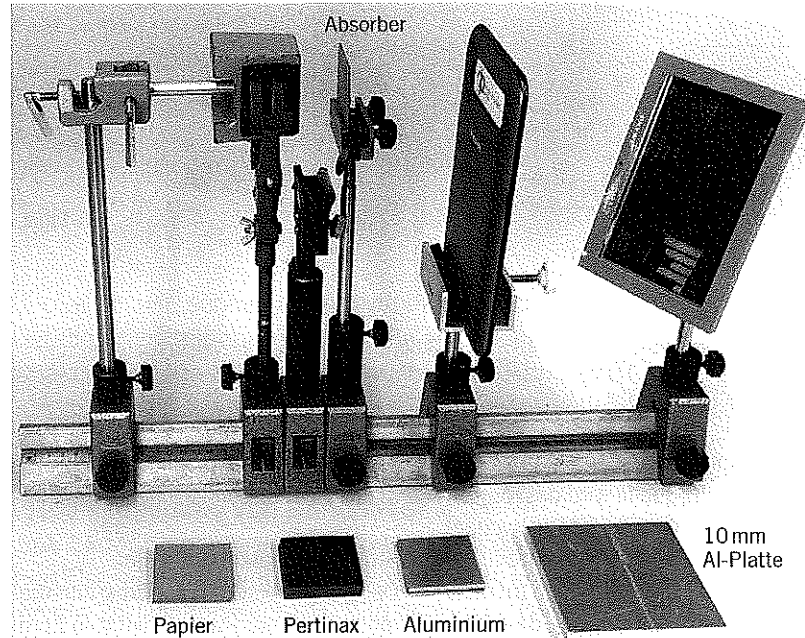


Abb. 5: Versuchsaufbau zum Absorptionsgesetz; als Detektor wird hier das SGT 2 verwendet

tionsgesetz überprüft und der jeweilige Absorptionskoeffizient bestimmt werden.

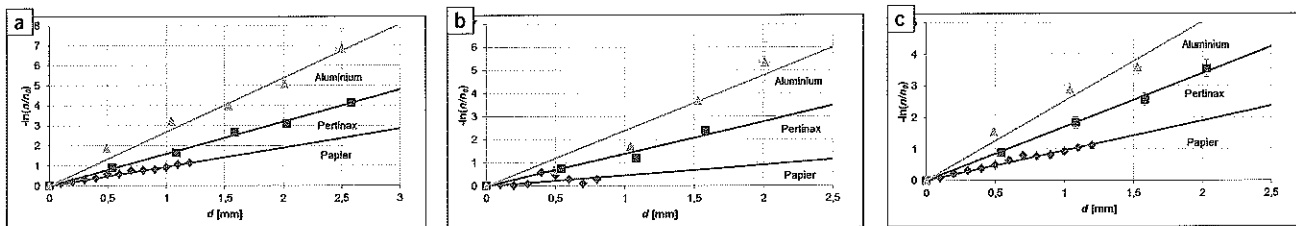


Abb. 6: Nachweis des Absorptionsgesetzes mit Sr-90-Quelle und a) SGT 2, b) iPod und c) S3

Absorber		CASSY	SGT 2	S3	iPod
Papier	μ in mm^{-1}	0,694	0,950	0,815	0,457
	Abweichung		36,9 %	17,3 %	34,2 %
	R^2		0,98	0,81	0,21
Pertinax	μ in mm^{-1}	1,087	1,596	0,808	1,391
	Abweichung		46,8 %	25,7 %	27,9 %
	R^2		0,99	0,92	0,95
Aluminium	μ in mm^{-1}	1,985	2,694	1,2506	2,3909
	Abweichung		35,7 %	37,0 %	20,5 %
	R^2		0,98	0,94	0,94

Tab. 1: Abweichungen der ermittelten Absorptionskoeffizienten von denen des GMZ des Messwerterfassungsystems CASSY

Nachweis des Zerfallsgesetzes und Messung der Halbwertszeit

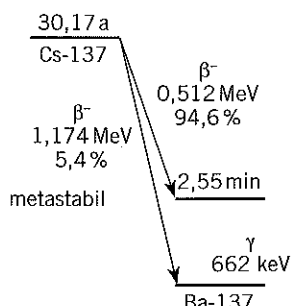


Abb. 7: Zerfallsschema von Cs-137

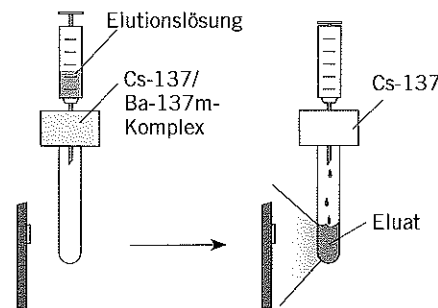


Abb. 8: Schematischer Versuchsaufbau zum Zerfallsgesetz

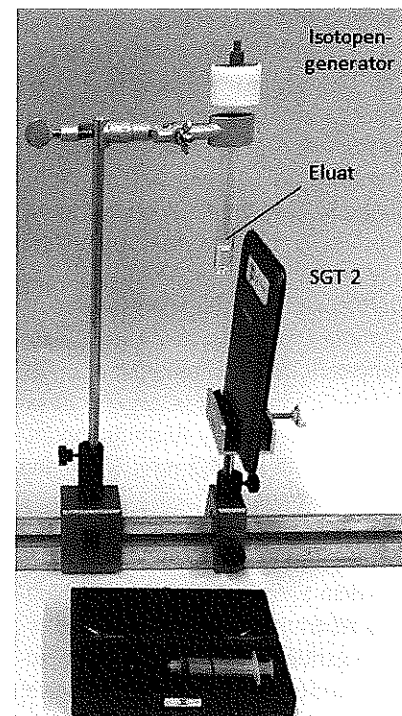


Abb. 9: Versuchsaufbau zum Zerfallsgesetz; als Detektor wird hier das SGT 2 verwendet

Strahlungsquelle

Als Strahlungsquelle wird das radioaktive Cäsiumisotop Cs-137 verwendet. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 30 Jahren zu 95% in den metastabilen Zustand von Barium Ba-137m, der wiederum mit einer Halbwertszeit von 2,55 Minuten durch Emission von γ -Strahlung in seinen Grundzustand übergeht (s. Abb. 7).

Das Präparat ist als Isotopengenerator (Leybold Nr. 559815) konstruiert: Das Cs-137 befindet sich in einem Kunststoffbehälter, aus dem die bereits zu Ba-137m zerfallenen Kerne mittels einer speziellen Elutionslösung in geringer Konzentration ausgewaschen werden. Die so gewonnene, bariumhaltige Lösung wird in einem Reagenzglas aufgefangen (s. Abb. 8) und steht damit zur experimentellen Bestimmung der Halbwertszeit zur Verfügung. Der gesamte Elutionsvorgang sollte aufgrund der kurzen Abkling-

zeit der Aktivität möglichst innerhalb 10–20 Sekunden geschehen.

Strahlenschutzmaßnahmen

Da dieser Versuch das Experimentieren mit offener Radioaktivität in Form einer flüssigen Lösung beinhaltet, die durch Augen- oder Mundkontakt leicht inkorporiert werden kann, sind zur Versuchsdurchführung Schutzhandschuhe und Schutzbrille zu verwenden.

Aufbau und Durchführung

Abbildung 9 zeigt die Versuchsanordnung. Sie besteht aus schultypischem Stativ- bzw. Halterungsmaterial, einem Reagenzglas samt aufgesetztem Isotopengenerator und dem jeweils als Detektor verwendeten mobilen Endgerät (s. dazu Kasten 2).

Um Störstrahlung durch den Isotopengenerator zu vermeiden, sollte dieser während der Messung vom Re-

agenzglas entfernt werden. Zudem ist es ratsam, die Anordnung vor Messbeginn so zu justieren, dass sich der Boden des Reagenzglases auf der Höhe des Detektors (also hier der Kamera) und möglichst dicht an diesem befindet.

Nach einer Messdauer von ca. 10–15 Minuten kann der Messvorgang beendet werden.

	CASSY	SGT 2	S3
λ in min^{-1}	0,272	0,325	0,277
R_2	0,995	0,966	0,679
$T_{1/2}$ in min	2,55	2,14	2,50
Abweichung vom Literaturwert $T_{1/2} = 2,55$ min	<1 %	16,1 %	2,0 %

Tab. 2: Experimentell ermittelte Halbwertszeiten von Ba-137m und deren Abweichungen zum Literaturwert

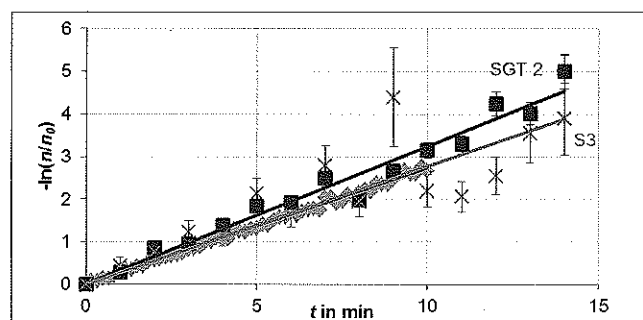


Abb.10: Verifizierung des Zerfallsgesetzes mit Leybold Cs/Ba-137m-Isotopengenerator und SGT 2, S3 und CASSY

Zerfallsgesetz und Halbwertszeit

Vor dem Reaktorunglück von Fukushima 2011 war die Kernkraft eine tragende Säule unserer Energieversorgung. Bis zum Jahr 2022 soll diese in Deutschland nun nach und nach durch andere Energieformen ersetzt und es sollen alle deutschen Kernkraftwerke abgeschaltet werden.

Der Rückbau eines Kernkraftwerkes dauert etwa 10 Jahre.

Doch wie lange strahlen seine radioaktiven Abfälle?

INFO: ZERFALLSKONSTANTE

Radionuklide unterliegen dem exponentiellen Zerfallsgesetz:

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

Die Zerfallskonstante λ gibt an, wie schnell die Aktivität eines radioaktiven Stoffes mit der Zeit abnimmt. Sie ist die entscheidende Kenngröße zur Bestimmung der Restaktivität eines radioaktiven Stoffes nach einer bestimmten Abklingzeit.

AUFGABEN

1. Bestimmen Sie die Zerfallskonstante von Barium-137.

a) Führen Sie hierzu das Experiment wie in Bild 1 dargestellt durch. Bestimmen Sie aus den gewonnenen Daten mithilfe von EXCEL oder eines anderen Tabellenkalkulationsprogramms die Zerfallskonstante (s. Bild 1).

Beachten Sie die Hinweise zur Durchführung an der Experimentierstation!

b) Berechnen Sie die Halbwertszeit von Ba-137.

2. Im Atommüll unserer Kernkraftwerke befinden sich eine ganze Reihe unterschiedlicher Nuklide, wie beispielsweise Plutonium-239 (Pu-239).

Geben Sie auf der Basis eigener Berechnungen an, wie lange der radioaktive Pu-239-Atommüll unter Verschluss gehalten werden muss.

→ Nehmen Sie dazu an, dass seine Reststrahlung ungefährlich ist, sobald sie unter 1/1000 ihrer ursprünglichen Aktivität abgesunken ist. Recherchieren Sie benötigte Informationen.

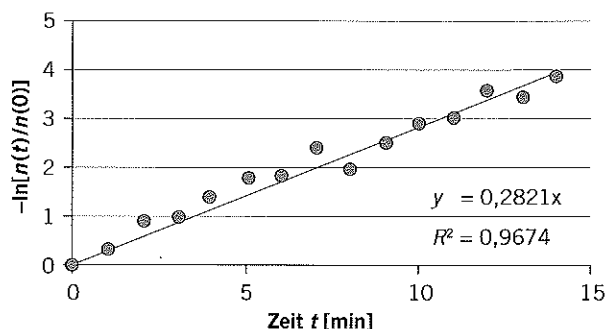
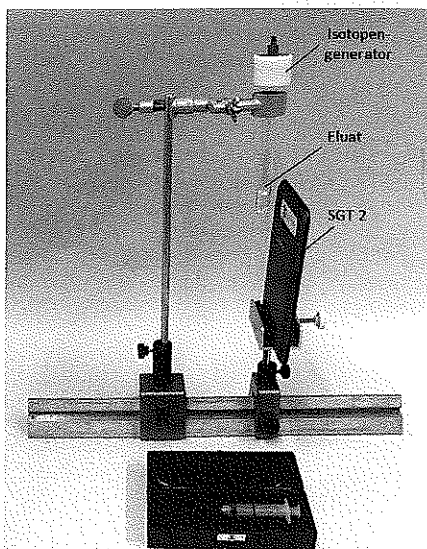


Bild 1: Aufbau zur Bestimmung der Halbwertszeit von Ba-137 (links) und Auswertung mittels EXCEL (rechts)