

Experimente zur Radioaktivität - als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H. J. Jodl

1 Auswahl des Versuchs als RCL

Das Thema „Radioaktivität“ scheint in der öffentlichen Diskussion der letzten Jahre etwas aus der Mode gekommen zu sein: Der Reaktorunfall von Tschernobyl liegt bereits über 20 Jahre zurück, die Laufzeit deutscher Kernkraftwerke wurde von der Politik begrenzt und aktuelle Themen wie alternative Energien, Datenschutz und moderne Kommunikationstechniken stehen mehr im Vordergrund. Doch der Schein mag trügen: Die Auswirkungen des Reaktorunfalls sind immer noch gegenwärtig, im Zuge steigender Mineralölpreise wie auch zur Begrenzung der CO₂-Emissionen streiten die Parteien derzeit über eine Verlängerung der Laufzeit von Kernkraftwerken, und Zwischenfälle über die Freisetzung radioaktiver Substanzen machten kürzlich wieder Schlagzeilen.

Außer dieser gesellschaftlichen Bedeutung hat das Thema physikalische Bedeutung als phänomenologische Grundlage des Strahlenschutzes und der Kernphysik. Des weiteren nutzen zahlreiche Anwendungen in der Medizin (Tracer-Methode zur Untersuchung von Stoffwechselfvorgängen im menschlichen Körper, Verwendung von Radionukliden zur Bestrahlung von Tumoren) und in der Technik (Bestimmung der Dicke und Dichte von Materialien, Altersbestimmung von archäologischen Funden, Konservierung von Lebensmitteln) Erkenntnisse zur Radioaktivität.

Bildungsziele eines Physikunterrichts zum Thema Radioaktivität können daher sein, den Schülern die physikalischen Grundlagen zur Teilnahme am gesellschaftlichen Diskurs, zur Vorbereitung auf ein Physikhochschulstudium oder zur Anwendung in naturwissenschaftlichen-technischen Fächern zu vermitteln. Hierzu ist der Unterricht in essentieller Weise, insbesondere beim Thema Radioaktivität, auf Realexperimente angewiesen, weil wir über kein Sinnesorgan für radioaktive Strahlung verfügen und der statistische Charakter radioaktiver Strahlung eine neue Qualität in Schulexperimenten darstellt. Versuche zur Radioaktivität bzw. das Thema Radioaktivität werden aber aus vielfältigen Gründen häufig nur in eingeschränkter Form oder gar nicht durchgeführt:

- Lehrmittelfirmen bieten ein ganzes Spektrum von Demonstrationsexperimenten an, angefangen vom qualitativen Nachweis/Unterscheidung bis hin zur Energiespektroskopie radioaktiver Strahlung oder der Reichweite von α -Strahlung in einer kontinuierlichen Nebelkammer. Aufgrund der im Vergleich zu den Physikern an Schulen hohen Anschaffungskosten fehlen häufig Experimente oder Experimentiermaterialien.
- Eine quantitative Auswertung der Versuche setzt bei Schülern nicht immer verfügbare oder ausreichend vertiefte mathematische Kenntnisse voraus (z. B. in Sek. I Exponentialfunktionen, in Sek. II die Poisson- und Gauß-Verteilung).
- Radioaktive Präparate stehen nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung, sind in der Anschaffung zu teuer oder im Laufe der Zeit unbrauchbar geworden.
- Aus Sicherheitsgründen müssen Lehrkräfte Strahlenschutzbeauftragte sein, es können nur schwach radioaktive Strahlenquellen mit für Unterrichtszwecke oft zu langen Messzeiten eingesetzt werden, und es existieren kaum Schülerversuche.

- Die stark physikalisch orientierten Versuche erzeugen weit weniger Interesse als anwendungsorientierte Versuche oder solche mit Alltagsbezug.

In den Lehrplänen der Länder findet sich das Thema Radioaktivität am Ende der Sekundarstufe I und in der gymnasialen Oberstufe als Teil der Kernphysik. Allerdings ist der Grad der Verpflichtung zur Behandlung sehr heterogen (Sek I: Pflicht z. B. in Hessen, Wahlpflicht in Rheinland-Pfalz, gar nicht in Sachsen; Sek II: Pflicht z. B. in Sachsen, Wahlpflicht in Rheinland-Pfalz, gar nicht im Saarland). Eine fehlende Unterrichtsverpflichtung und -zeit führt in Kombination mit einer geringen experimentellen Ausstattung und zeitaufwendigen Versuchsdurchführungen dazu, das Thema Radioaktivität zu meiden oder nur Theorieinhalte zu lehren.

Aus den genannten Gründen - Bedeutung der Radioaktivität für eine physikalische Bildung von Schülern und Schwierigkeiten mit Experimenten zur Radioaktivität - wurde ein Remotely Controlled Laboratory (RCL) zur Radioaktivität realisiert. Die Idee eines RCLs besteht dabei darin, einen Versuch real am Ort A aufzubauen und im Internet fortlaufend bereitzustellen. Ein Experimentator am Ort B kann dann von einem Computer aus Versuche mit dem RCL durchführen. Der Leser findet in [1] - [4] weitere Informationen zum RCL-Projekt und zu einzelnen RCLs.

2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Abb. 1a-d zeigt das Messprinzip und Aufnahmen des Versuchsaufbaus: Das Strahlerrad (1) ist mit drei radioaktiven Präparaten (2) Americium-241 (Am-241) als α -Strahler, Strontium-90 (Sr-90) als β^- -Strahler, Kobalt-60 (Co-60) als γ -Strahler [5a] und einem Stab ohne Präparat (3) zur Bestimmung der Nullrate bestückt. Auf dem Absorberrad (4) sind 46 Materialproben (5) aus Blei, Aluminium, Stahl, Edelstahl und PVC mit materialabhängigen Dicken zwischen 0,1 und 9,0 mm angeordnet [6].

Weiterhin befinden sich auf dem Absorberrad für Messungen zum Abstandsgesetz eine Aussparung (6) und ein Kollimator (7) aus Blei zum Erzeugen eines hinreichend schmalen Strahlenbündels. Zur Ablenkung von β^- -Strahlung kann mittels eines Elektromagneten (8) zwischen den Polschuhen eines Ringeisenkerns (9) ein inhomogenes Magnetfeld fester mittlerer Feldstärke $B \approx 20$ mT, Ausdehnung $a \approx 6$ cm in Strahlrichtung und zwei wählbaren Richtungen erzeugt werden.

Die Strahlung wird von einem Fensterzählrohr (10) [5b] detektiert, dessen Abstand von der Strahlenquelle zwischen 0,3 cm (durch die Aussparung im Absorberrad) bzw. 2,7 cm (mit Absorberrad) und 30 cm eingestellt werden kann. Zur Detektion der abgelenkten Strahlung ist das Fensterzählrohr bei eingeschaltetem Magnetfeld im festen Abstand von 11 cm in 5° -Schritten um $\pm 45^\circ$ schwenkbar. Die Anzahl der registrierten Impulse wird von einem Zählgerät (11) [5c] gemessen. Darüber hinaus kann für eine Untersuchung zur Statistik des radioaktiven Zerfalls die Zeit zwischen zwei Impulsen gemessen und auf einem Display (12) angezeigt werden. Der Nutzer kann beide Anzeigen im Bild einer IP-Webcam (13) ablesen. Eine weitere USB-Webcam (14) zeigt ein Bild aller beweglichen Versuchskomponenten. Bleiziegel (15) schirmen unerwünschte Strahlung an allen relevanten Stellen ab.

Zwischen den Webserver und den Versuch ist ein Interface (16) geschaltet. Der darin enthaltene Microcontroller steuert die Schrittmotoren (17) und (18) für das Strahler-

und Absorberrad, die Schrittmotoren für die Abstands- und Winkeleinstellung des Fensterzählrohrs, die Stromversorgung des Magneten sowie das Zählgerät und die Elektronik zur Messung des zeitlichen Impulsabstands.

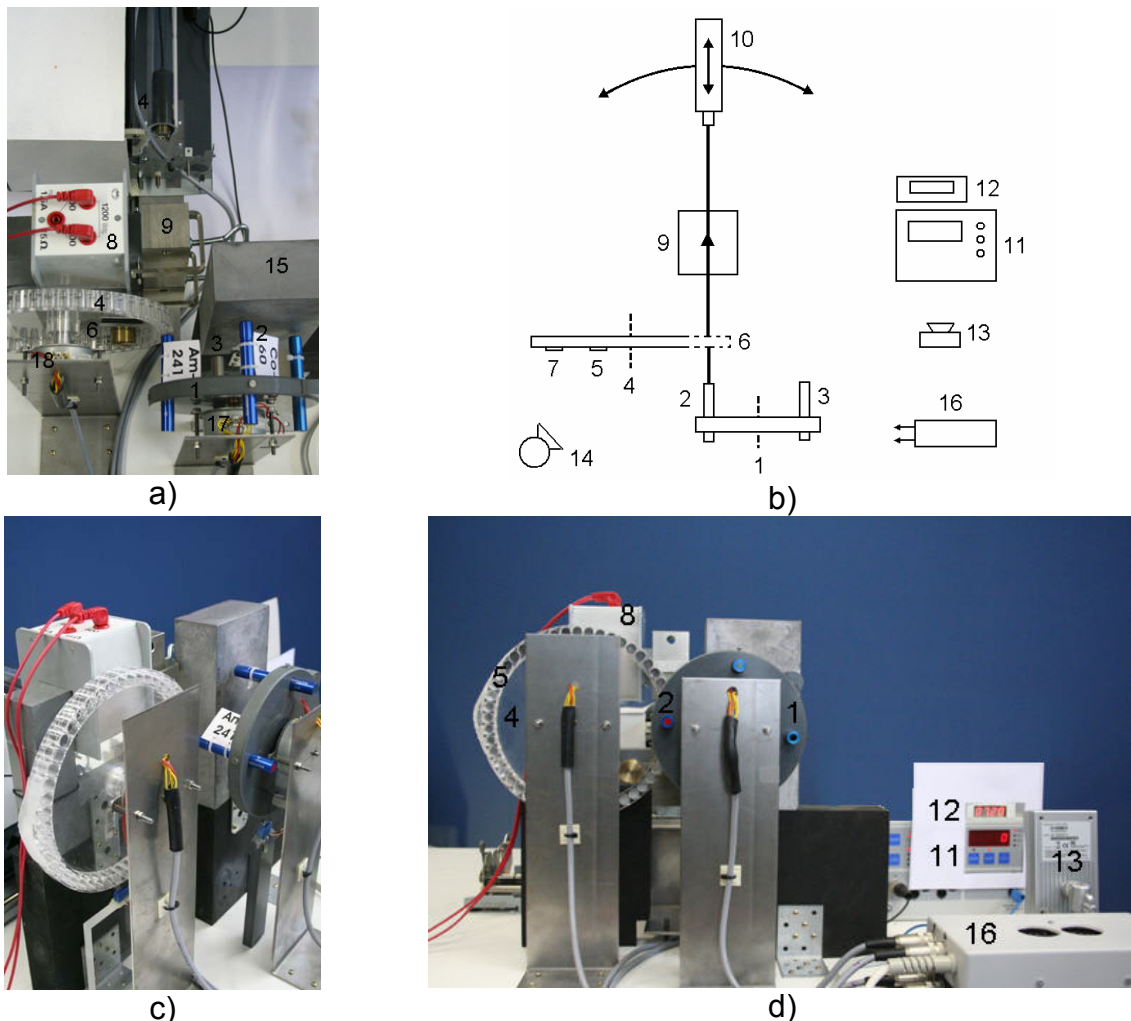


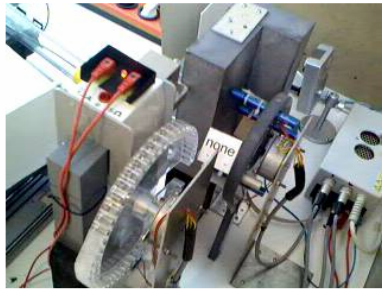
Abb. 1: Schematische Darstellung des Messprinzips (b) und Aufnahmen des Versuchsaufbaus (a, c, d). Strahlerrad (1), radioaktive Präparate (2), Stab ohne Präparat (3), Absorberrad (4), Materialproben (5), Aussparung (6), Kollimator (7), Elektromagnet (8), Ringeisenkern (9), Fensterzählrohr (10), Zählgerät (11), Display (12), IP-Webcam (13), USB-Webcam (14), Bleiziegel (15), Interface (16), Schrittmotor für Strahlerrad (17), Schrittmotor für Absorberrad (18).

Auf dem RCL-Portal [7] ist die Laborseite des Versuchs [8] wie die jedes anderen RCLs Teil einer stets nach den gleichen Menüpunkten strukturierten Lernumgebung (Abb. 2, links). Diese stellt Lehrkräften vielfältiges Unterrichtsmaterial und Schülern alle notwendigen Informationen zum Verständnis und zur eigenständigen Durchführung des Versuchs bereit. Ein Experimentator kann im oberen Webcambild (Abb. 2, mittig) die Ausführung der Befehle durch die beweglichen Versuchskomponenten mitverfolgen. Im unteren Webcambild wird die Anzahl detektierter Impulse und die Zeit zwischen zwei Impulsen angezeigt. Im Bedienfeld (Abb. 2, rechts) werden die Messungen durchgeführt. Unter

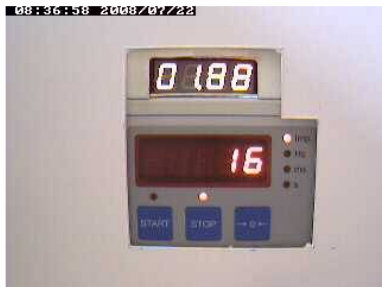
- „Radioaktiver Strahler“ wird einer der Strahler oder kein Strahler ausgewählt,
- „Absorber“ wird ein Absorbiermaterial bestimmter Dicke oder der Kollimator ausgewählt,
- „Zählrohrabstand“ wird der Abstand zwischen Zählrohr und Strahler eingestellt,

Radioaktivität

- Einstieg
- Aufbau
- Theorie
- Aufgaben
- Labor
- Auswertung
- Diskussion
- Material
- Betreuung



LED rot (N-pol oben), LED grün (N-pol unten), LED aus (Magnetfeld aus).



Obere Anzeige: Zeit zwischen zwei Zerfällen in s.
Untere Anzeige: Anzahl der Zerfälle.

RCL - Radioaktivität

Verbleibende Experimentierzeit: 199 s

Hinweis: Zum Schutz des Zählrohrs sind Abstandsänderungen erst nach dem Betätigen des Buttons "ausschalten" (Magnetfeld) möglich.

Radioaktiver Strahler:

Absorber:

Zählrohrabstand: (0.4/2.7 - 29.1 cm) cm

Magnetfeld:

Zählrohrwinkel: (-45°-45°, 5°-Schritte) °

Anzahl der Zerfälle in Zeitintervall: (0 - 60 s) s

Zeit zwischen zwei Zerfällen:

Abb. 2: Laborseite des Versuchs: Versuchsmenü (links), Webcambilder (mittig) und Bedienfeld (rechts).

- „Magnetfeld“ wird das Magnetfeld ein- und ausgeschaltet und seine Richtung festlegt,
- „Zählrohrwinkel“ wird der Winkel zwischen der Fensterzählrohrachse und dem un-abgelenkten Strahl eingestellt,
- „Anzahl der Zerfälle in Zeitintervall“ wird die Anzahl der registrierten Impulse innerhalb einer wählbaren Zeitspanne zwischen 0 und 60 s gemessen,
- „Zeit zwischen zwei Zerfällen“ wird die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen gemessen.

Der Button „Ausrichten und Standardwerte einstellen (ca. 1 min)“ fährt alle Schrittmotoren nach einer eventuellen Fehlfunktion oder bei unklarer Stellung beweglicher Komponenten des Experiments in eine definierte Ausgangsstellung zurück.

3 Experimente zur Radioaktivität und Messergebnisse

Mit dem RCL lassen sich Versuche zur Identifizierung von α -, β - und γ - Strahlung, zum Abstandsgesetz, zur Absorption von β - und γ - Strahlung in Materie, zur Reichweite von α -Strahlung in Luft, zur Ablenkung von β -Strahlung im Magnetfeld und zur Statistik des radioaktiven Zerfalls durchführen. Im Folgenden werden Messergebnisse exemplarisch ausgewählter Versuche vorgestellt und diskutiert:

- Abstandsgesetz (Abb. 3a, b): Die Auftragung der Anzahl N der Impulse über r^2 in Abb. 3a zeigt, dass das Abstandsgesetz $N \sim r^{-2}$ für Abstände zwischen 2 cm und

28 cm erfüllt ist. Beim kleinsten Abstand von 1,3 cm ($r^2 = 0,6 \text{ cm}^2$) wird ein zu kleines N gemessen, da das ebene Glimmerfenster (11 mm Durchmesser) dann eine zu schlechte Annäherung an eine Kugeloberfläche mit konstanter Strahlungsintensität ist und die Strahlenquelle nicht mehr als punktförmig betrachtet werden kann. Abb. 3b zeigt die Gültigkeit des Absorptionsgesetzes für den aus Abb. 3a vergrößert dargestellten Abstandsbereich zwischen 5 cm und 28 cm.

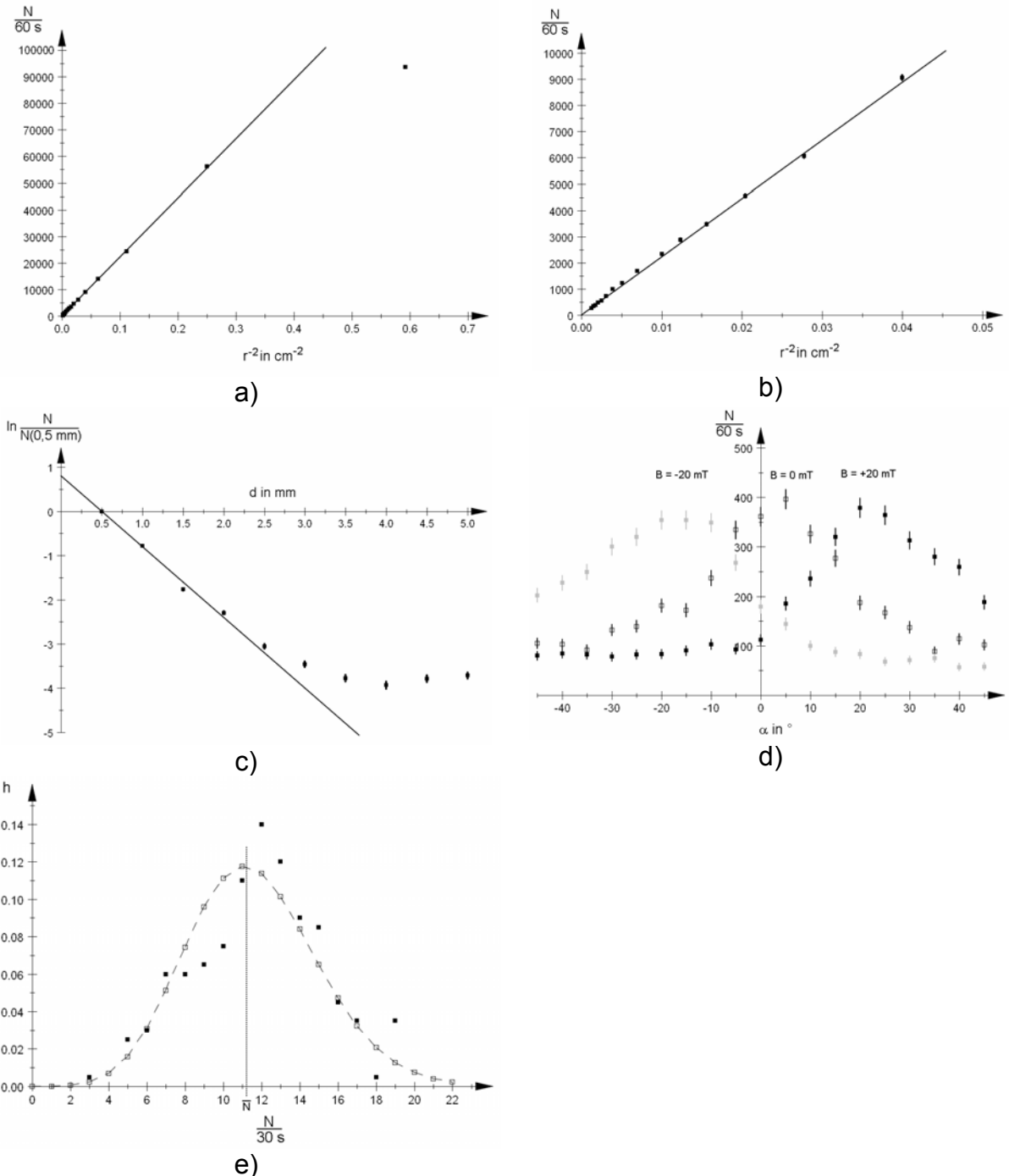


Abb. 3: Messergebnisse mit Sr-90-Strahler, Messzeiten siehe Achsenbeschriftung, Nullrate subtrahiert (außer bei e)), Fehlerbalken $[N - \sqrt{N}, N + \sqrt{N}]$. a) und b) Abstandsgesetz, c) Absorptionsgesetz, d) Ablenkung von β -Strahlung im Magnetfeld, e) Statistik des radioaktiven Zerfalls.

- Absorptionsgesetz (Abb. 3c): Nach dem Absorptionsgesetz gilt mit der Dicke d und Bezugsdicke $d_0 = 0,5$ mm des Absorbers sowie dem Absorptionskoeffizienten μ , dass $\ln \frac{N(d)}{N(d_0)} = -\mu(d - d_0)$. Die Auftragung von $\ln \frac{N(d)}{N(d_0)}$ über der Absorberdicke d zeigt, dass die β^- -Strahlung bei der Absorption in Aluminium nur für Dicken bis ca. 3 mm exponentiell mit einem Absorptionskoeffizient $\mu = 1,6/\text{mm}$ abnimmt. Danach ist zwar die gesamte β^- -Strahlung absorbiert, aber durch das Abbremsen der Elektronen im Aluminium entsteht vom Zählrohr detektierte γ -Strahlung [7, S. 28], die zu einem in etwa konstanten N führt.
- Ablenkung von β^- -Strahlung im Magnetfeld (Abb. 3d): Zur Messung muss der Kollimator verwendet werden, da sonst Elektronen mit zu unterschiedlichen Winkeln in das Magnetfeld eintreten und der Detektor unterschiedlich abgelenkte Strahlung misst. Bei $B = 0$ mT (leere Quadrate) liegt das Maximum der Strahlung aufgrund nicht idealer Versuchsgeometrie bei ca. 5° und der Kollimator begrenzt die Strahlung auf ca. $\pm 20^\circ$. Ein Magnetfeld mit $B = +20$ mT (schwarze Quadrate) bzw. $B = -20$ mT (graue Quadrate) verschiebt das Maximum um ca. $+20^\circ$ bzw. -20° . Aus der Magnetfeld- und der Geschwindigkeitsrichtung kann auf negative Ladungsträger geschlossen werden. Unter der Annahme eines homogenen Magnetfelds ergibt sich nach der relativistischen Beziehung $E_{\text{kin}} = m_0 c^2 \left[\sqrt{\left(\frac{eBr}{m_0 c} \right)^2 + 1} - 1 \right]$ [7, S. 30] mit dem Kreisradius $r = a/\sin\alpha$ eine abgeschätzte kinetische Energie der Elektronen von 657 keV. Ein Vergleich mit einem gesicherten Energiewert ist nicht möglich, da die Y-90-Strahlung in der Präparatabdeckung (die Sr-90-Strahlung wird vollständig von der Präparatabdeckung absorbiert) einen unbekanntem Betrag an Energie verliert [4a].
- Statistik des radioaktiven Zerfalls (Abb. 3e): Die Anzahl N der Impulse ohne Strahler (Nullrate) wurde 200 mal für jeweils 30 s gemessen und die relative Häufigkeit h von N über N aufgetragen (schwarze Quadrate). Die empirische Verteilung um den Mittelwert $\bar{N} = 11,7$ wird gut durch die Poisson-Verteilung $P(N) = \frac{\lambda^N}{N!} e^{-\lambda}$ ($N = 0, 1, \dots$) mit dem Erwartungswert $\lambda \approx \bar{N}$ beschrieben (leere Quadrate).

4 Fazit - Mehrwert des RCLs und Unterrichtseinsatz

Eine Realisierung von Versuchen zur Radioaktivität als RCL bietet versuchstechnisch folgende Vorteile:

- Die Versuche decken mehrheitlich das Sachgebiet Radioaktivität ab.
- Lehrende wie Lernende können selbst bei langen Messreihen ohne Strahlenbelastung experimentieren.
- Die Versuche ergänzen vorhandene Versuche oder ersetzen fehlende - weil zu teure - Versuche zur Radioaktivität.
- Die teilautomatisierte Durchführung der Versuche erlaubt sowohl die schnelle Bestätigung von Gesetzmäßigkeiten anhand von 4 - 5 Messwertpaaren, wie auch die effiziente Aufnahme zeitaufwendiger Messreihen.
- Das RCL kann je nach Lernniveau von Klasse 9/10 bis zur Klasse 13 und selbst in Anfängerpraktika an der Hochschule eingesetzt werden.

- Meßergebnisse sind bewußt nur als unaufbereitete Rohdaten verfügbar, um eine möglichst nah am klassischen Realexperiment liegende Versuchsdurchführung und eine intensive Auseinandersetzung mit der physikalischen Deutung der Rohdaten zu initiieren.

Fachmethodisch ist die orts- und weitgehend zeitunabhängige Versuchsdurchführung des RCLs für ein eigenständigeres Lernen von Bedeutung:

- Gegenüber traditionellen Lehrerdemonstrations- und Schülerexperimenten können Lernende aufgrund des flexiblen und variantenreichen Versuchsaufbaus eigenständig physikalischen Fragestellungen nachgehen, entsprechende Messreihen planen, durchführen und auswerten. Ausgangspunkt für Fragestellungen kann sowohl formell erworbenes theoretisches Wissen (Bestätigung von bekannten Gesetzmäßigkeiten) als auch der spielerisch-forschende Umgang mit dem RCL sein (Wird radioaktive Strahlung nach einer einheitlichen Gesetzmäßigkeit absorbiert?)
- Der Nachteil langer Messzeiten aufgrund der Statistik des radioaktiven Zerfalls kann methodisch genutzt werden: Schülergruppen können Messergebnisse in großer Anzahl unter Nutzung moderner elektronischer Kommunikationsmittel sammeln und interpretieren, um diese dann im Unterricht zu präsentieren und zu diskutieren.
- Die Lernumgebung (siehe Menüpunkte Abb. 2) leitet mit experimentellen Aufgabestellungen (Aufgaben) und exemplarischen Lösungen (Auswertung) zum eigenständigen Experimentieren an und fordert durch weiterführende Fragestellungen (Diskussion) zum eigenständigen Vertiefen und Erarbeiten von Inhalten heraus.

Wir sehen folgende mögliche Szenarien des Unterrichtseinsatzes:

- Traditioneller Physikunterricht: Die Lehrkraft bereitet im Rahmen eines klassischen Lehrgangs zur Radioaktivität die Theorie im Unterricht vor und zeigt Demonstrationsexperimente oder führt in Versuche mit dem RCL ein. In experimentellen Hausaufgaben mit dem RCL bestätigen die Schüler Gesetzmäßigkeiten, wiederholen oder ergänzen die Messungen aus den Demonstrationsexperimenten oder führen begonnene Messungen mit dem RCL fort.
- Projektorientierter Physikunterricht: Insbesondere in Grundkursen ist es wegen des Alltagsbezugs und zur Motivation günstig, ausgehend von Anwendungen die Physik zur Radioaktivität zu erlernen. Nach Themen organisierte Schülergruppen führen dazu möglichst eigenständig Messungen mit dem RCL durch.
- Fachübergreifender Unterricht von Physik und Mathematik: Wird das Thema Radioaktivität gegen Ende der gymnasialen Oberstufe behandelt, kann die Theorie zur Poisson-Verteilung aus dem Mathematikunterricht und Messungen zur Statistik des radioaktiven Zerfalls im Physikunterricht aufeinander abgestimmt werden (Definition und Eigenschaften der Poisson-Verteilung, Zusammenhang zwischen empirischer Verteilung und Poisson-Verteilung).
- Selbststudium: Lern- und wissbegierige Schüler können neben dem Unterricht das Grundwissen zur Radioaktivität anhand der Lernumgebung des RCLs in unmittelbarem Bezug zur Durchführung und Auswertung von Versuchen erwerben. Interessierten Laien bietet das RCL die Möglichkeit überhaupt Versuche zur Radioaktivität durchzuführen. Emotionalisierte oder politisierte Informationen der Medien können durch physikalisches Grundwissen auf eine stärker rationale Basis gestellt werden.

Das RCL ist seit Sommer 2006 ohne Probleme im Einsatz. Im Zeitraum vom 01.12.06 - 31.05.07 wurde das RCL von 416 Personen aufgerufen, davon haben 289 Personen mehrere Parameter variiert und im Mittel etwa 7 Minuten experimentiert.

Wir danken Herrn Mattes, dem Bürgermeister der Verbandsgemeinde Kaisersesch und seinen Mitarbeitern am Technologie- und Gründerzentrums (Standort des RCLs) für die gute Zusammenarbeit.

Wir danken Herrn C. Klinck für das große Engagement bei der Realisierung des RCLs während seiner Staatsexamensarbeit für das Lehramt an Gymnasien.

Den Sponsoren von der BMW-Eberhard von Kuenheim-Stiftung (Frau Grammes), vom Arbeitgeberverband Gesamtmetall (Herr Gollub) und von Intel (Herr Ensle) danken wir sehr herzlich für die ideelle und materielle Unterstützung des RCL-Gesamtprojekts.

Literatur

- [1] Gröber, S.; Vetter, M.; Eckert, B. & Jodl, H. J.: Remotely Controlled Laboratories - Aims, examples and experience, Am. J. Phys. 76 (2008), 374 - 378 - special theme issue.
- [2] Gröber, S.; Vetter, M.; Eckert, B. & Jodl, H. J.: Experimenting from a Distance - Remotely Controlled Laboratory (RCL), Eur. J. of Phys. 28 (2007), S127 - S141 - special issue.
- [3] Vetter, M.; Gröber, S.; Eckert, B. & Jodl, H. J.: Neues vom Remote Controlled Lab Projekt, in: Nordmeier, V. & Oberländer, A. (Hrsg.): DPG Frühjahrstagung - Didaktik der Physik, Kassel 2006, Lehmanns Media.
- [4] Altherr, S.; Eckert, B.; Vetter, M. & Jodl, H. J.: Experimentieren aus der Ferne - Ferngesteuertes Labor im Internet (Remotely Controlled Laboratory – RCL), PdN-PhiS 6/54 (2005), 40 - 46.
- [5] Leybold Didactic GmbH: a) Gebrauchsanweisung „Satz radioaktive Präparate“ (Nr. 55983), b) Gebrauchsanweisung „Fensterzählrohr für α -, β -, γ - und Röntgenstrahlen“ (Nr. 55901), c) Gebrauchsanweisung „Zählgerät S“ (Nr. 57541).
- [6] <http://rcl.physik.uni-kl.de> unter Labs/Radioaktivität/Aufbau.
- [7] <http://rcl.physik.uni-kl.de>.
- [8] <http://rcl.physik.uni-kl.de> unter Labs/Radioaktivität/Labor.
- [9] Kuhn, W. (Hrsg.): Handbuch der experimentellen Physik - Sekundarstufe II, Band 9: Kerne und Teilchen I, Aulis (2000).

Anschrift der Verfasser

Stellvertretend für die Arbeitsgruppe: Sebastian Gröber, Fachbereich Physik, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str., 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: groeber@physik.uni-kl.de

Kurzfassung

Das Thema Radioaktivität hat physikalische (phänomenologische Grundlage der Kernphysik) und gesellschaftliche Bedeutung (z. B. Entsorgung radioaktiver Abfälle und Energieumwandlung in Kernkraftwerken) und ist Grundlage von Anwendungen

in Medizin und Technik (z. B. Tracer-Methode und Materialuntersuchungen). Die Mehrzahl der von Lehrmittelfirmen angebotenen Experimente zu diesem Thema sind aus Sicherheitsgründen Lehrerdemonstrationsexperimente mit schwach radioaktiven Präparaten und entsprechend zeitaufwendiger Versuchsdurchführung in der Sek. II. Aus diesen Gründen haben wir ein Remotely Controlled Laboratory (RCL) zum Themenkomplex Radioaktivität realisiert. Schüler und Lehrkräfte können zentrale Versuche am Computer zu Hause oder in der Schule ohne Strahlenbelastung, ohne Zeitzwang und nach eigenem Messprogramm durchführen. Darüber hinaus unterstützt das Experimentieren mit dem RCL schülerorientierte Lehr- und Lernformen.