

Virtual-Reality-Experimente: Neueste Entwicklungen – Radioaktivität und Elektromagnetismus

William Lindlahr^{*,†}, Johannes Lhotzky[†], Florian Bennert[†], Klaus Wendt[†]

^{*}Fachhochschule Südwestfalen, Medienpädagogik/Medien- und Informationstechnik,

[†]AG Larissa, Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz

lindlahr.william@fh-swf.de

Kurzfassung

Virtual-Reality-Experimente sind anspruchsvolle Simulationen von typischen Schulexperimenten in einer dreidimensionalen Umgebung, mit weitreichenden didaktischen sowie Interaktionsmöglichkeiten. Sie können auf diversen Unterrichtsmedien überall dort eingesetzt werden, wo reale Schulexperimente nicht (mehr) verfügbar sind oder sich durch die Simulation weitere Vorteile ergeben. Der Beitrag stellt die konzeptionellen Grundlagen und die Entwicklung des Konzepts Virtual-Reality-Experimente als Design-Based-Research-Projekt vor, das an zwei Praxisproblemen des Physikunterrichts ansetzt. Weiterhin wird das Portfolio der verfügbaren Versuche vorgestellt, mit einem Fokus auf die neuesten Entwicklungen zu zwei zentralen Themengebieten des Physikunterrichts, nämlich Radioaktivität und Elektromagnetismus. Dabei werden Virtual-Reality-Experimente zum Cäsium-Barium-Isotopengenerator, zum Abstandsgesetz radioaktiver Strahlung und zum Hall-Effekt präsentiert.

1. Konzeptionelle Grundlagen

1.1. Rolle des Experimentierens im Unterricht

Das Experiment bildet eine der zentralen Erkenntnisquellen der naturwissenschaftlichen Forschung und nimmt ebenso seit jeher eine zentrale Rolle im Fachunterricht ein. Es bietet eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten und ist geeignet, vielfältige didaktische Funktionen im Unterricht zu erfüllen (Girwidz 2020, S. 270). Den beiden wesentlichen Ausprägungen als Demonstrations- sowie als Schülerexperiment werden jeweils unterschiedliche Vorteile zugeschrieben, wie z. B. die Motivation oder die Vermittlung bzw. Bestätigung von Fachinhalten.

1.2. Virtual-Reality-Experimente als Design-Based-Research-Projekt

Das Konzept der Virtual-Reality-Experimente wurde im Rahmen eines Design-Based-Research-Projekts entwickelt. Grundlage hierfür waren zwei im Physikunterricht identifizierte Praxisprobleme (Lindlahr 2022).

Im vergangenen Jahrzehnt, beginnend bereits etwa mit dem Jahre 2009, wurde eine neue Generation von Unterrichtsmedien zunehmend in Schulen verfügbar: Medien mit einer berührungsempfindlichen Oberfläche, kurz Touch-Medien. Darunter fielen zunächst interaktive Tafeln, auch interaktive Whiteboards (IWB) genannt, die seit 2009 für immer mehr Klassenzimmer und Fachräume angeschafft wurden. Wenig später folgten zunehmend Pilotprojekte zum Einsatz von Tablets im Unterricht, die mit der insgesamt stark zunehmenden Verbreitung dieser Geräte möglich wurden.

Für die Akzeptanz der neuen Mediengeneration durch Lehrerinnen und Lehrer war die Entwicklung neuer didaktischer Konzepte angezeigt, die die Vorteile der neuen Medien als einen Mehrwert nutzen.

In einer Umfrage unter 68 Physiklehrerinnen und -lehrern im Jahre 2010 wurde dieses Praxisproblem neben weiteren Begründungen genannt (Aulenbacher 2011). Das anhand dieser Umfrage identifizierte Problem erfuhr später, im Jahre 2016, auch eine bildungspolitische Verankerung als eines der beiden Ziele der Strategie der Kultusministerkonferenz zur Bildung in der digitalen Welt:

Bei der Gestaltung von Lehr- und Lernprozessen werden digitale Lernumgebungen entsprechend curricularer Vorgaben dem Primat des Pädagogischen folgend systematisch eingesetzt. Durch eine an die neu zur Verfügung stehenden Möglichkeiten angepasste Unterrichtsgestaltung werden die Individualisierungsmöglichkeit und die Übernahme von Eigenverantwortung bei den Lernprozessen gestärkt. (KMK 2016, S. 11)

Als zweites Praxisproblem für den Ansatz des Design-Based-Research ergab sich die zunehmende Einschränkung des Experimentierens im Schulunterricht. In der Unterrichtspraxis sind in den vergangenen Jahrzehnten einige Experimente dadurch weggefallen, dass sich die Wahrnehmung ihrer Gefahrenpotenziale verstärkt hat und rechtliche Vorgaben verschärft wurden. Als ein Beispiel hierfür seien zunehmende Einschränkungen in der Strahlenschutzverordnung genannt, die dazu führen, dass Experimente mit radioaktiver Strahlung immer mehr an Attraktivität verlieren.

Der Online-Unterricht während der Schulschließungen der Corona-Pandemie 2020 und 2021 führte vorübergehend zu völlig neuen didaktischen Anforderungen an den naturwissenschaftlichen Unterricht, die insbesondere auch das Experimentieren betrafen. Vom einen Tag auf den anderen musste der Unterricht auf Online-Angebote umgestellt werden, die beispielsweise über Videokonferenzsysteme und digitale Lernplattformen verbreitet wurden. Damit kam es ebenfalls zu einer sehr plötzlichen Einschränkung der Möglichkeiten zum Einsatz des Experiments im Unterricht. Der Landesverband Rheinland-Pfalz zur Förderung des MINT-Unterrichts (MNU) formulierte daraufhin im zweiten Corona-Jahr 2021 in einem Standpunkt zum „experimentellen Fernunterricht“ sogar als Warnung die „Gefahr, dass der experimentelle Charakter der naturwissenschaftlichen Fächer verloren geht“ (MNU 2021).

Das Konzept der Virtual-Reality-Experimente wurde ausgehend von den beiden beschriebenen Praxisproblemen – dem Bedarf nach didaktischen Konzepten für Touch-Medien sowie den zunehmenden Einschränkungen des Experimentierens – entwickelt. Die Entwicklung erfolgte entsprechend dem Design-Based-Research-Ansatz (vgl. Wilhelm & Hopf 2014) in Zyklen, die sich durch die Konzeption und Umsetzung von Prototypen für einzelne Experimente ergaben. Diese Teilprozesse leisteten jeweils weitere Beiträge zur Entwicklung des Gesamtkonzepts.

1.3. Didaktisches Konzept

Als Virtual-Reality-Experimente (VRE) werden anspruchsvoll gestaltete Simulationen für den Unterricht bezeichnet, die in einer Virtual-Reality-Umgebung verortet sind. Damit ist jedoch nicht spezielle Hardware gemeint, sondern das Eintauchen in eine virtuelle Welt im Sinne einer Präsenzillusion. Die Zielsetzung des Konzepts besteht darin, eine größtmögliche Realitätsnähe und einen ähnlich breiten Einsatzbereich wie bei Realversuchen zu erreichen (Lindlahr 2014; Lindlahr & Wendt 2016; Lindlahr 2022).

VRE bedienen sich hierzu einer dreidimensionalen, besonders realitätsnahen Darstellung mit realistischen Bewegungs- sowie umfangreichen Interaktionsmöglichkeiten in der virtuellen Welt. „Die simulierten Messwerte sind analog zur Realität fehlerbehaftet und stehen damit inhaltlich dem realen Experiment deutlich näher als der Ideal- bzw. ‚Lehrbuchphysik‘“. Weiterhin ermöglichen es Virtual-Reality-Experimente, bei der Versuchsdurchführung handwerkliche Fehler zu machen, die nur durch entsprechende Messergebnisse sichtbar werden und nicht etwa durch die Software ausgeschlossen werden. Als VRE sollen gezielt solche Versuche simuliert werden, die als Realexperimente wegen ihrer Gefahren oder Kosten nicht durchführbar sind oder die mit Hilfe digitaler Medien neue didaktische Möglichkeiten für den Unterricht eröffnen (ebd.).

1.4. Hardware-Konzept

Das Konzept der VRE orientiert sich an der in Schulen bereits verfügbaren Hardware und nutzt deren Möglichkeiten, indem die Eingabe entweder über Touch-Gesten oder über Tastatur und Maus erfolgen kann. Weiterhin sind auch die Hardware-Anforderungen an schulische Geräte angepasst, sodass die Performanz auch bei weniger leistungsfähiger Hardware erreicht wird; bei Bedarf über entsprechende Leistungseinstellungen innerhalb der Software. Angepasst an schulische Hardware, wird die App für alle gängigen Plattformen zur Verfügung gestellt, nämlich für Microsoft Windows ebenso wie für Android und Apple-Plattformen.

1.5. Einsatzszenarien im Unterricht

Da die Virtual-Reality-Experimente einen Realversuch mit allen relevanten fachlichen und fachdidaktischen Aspekten nachbilden, umfasst das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten dieselben wie beim Realexperiment und geht noch darüber hinaus. Die Vielfalt der didaktischen „Einsatzorte“ im Unterricht wird nicht zuletzt dadurch aufrechterhalten, dass keine detaillierten Versuchsanleitungen in die Software eingebaut werden. Dies ermöglicht z. B. explorative Vorgehensweisen (Lindlahr 2014; Lindlahr 2022).

VRE sind mit entsprechenden digitalen Endgeräten sowohl als Demonstrations-, wie als Schülerexperiment einsetzbar. Über die breite Verfügbarkeit digitaler Medien kann eine beliebige Anzahl der verfügbaren virtuellen Experimente bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist die Durchführung von Experimenten zu Hause möglich, die sich als Ergänzung zum Präsenzunterricht, oder aber im bereits erwähnten Online-Unterricht anbietet.

2. Portfolio der Virtual-Reality-Experimente

2.1. Experimentieren während der Corona-Pandemie

Kurz nach Beginn der Schulschließungen in der Corona-Pandemie im März 2020 wurde den Schulen eine App mit zwei fertigen Virtual-Reality-Experimenten nach dem beschriebenen Konzept zur kostenlosen Nutzung bereitgestellt. Die Software beinhaltete den Cäsium-Barium-Isotopengenerator als zentralen Versuch aus dem Themengebiet Radioaktivität (siehe unten, 3.1) sowie den Rutherford'schen Streuversuch. Beide Experimente waren Ergebnisse von Entwicklungsprozessen, die bereits weit davor begonnen wurden.

2.2. Virtual-Reality-Experimente, Version 2.0

Im Frühjahr 2022 wurde die Version 2.0 der Software veröffentlicht. Diese beinhaltete neben den beiden bereits genannten Versuchen noch zwei Experimente aus dem Themengebiet Röntgenstrahlung, nämlich einen Versuch zur Röntgenbeugung sowie zur Röntgenspektroskopie (Lhotzky et al. 2022, vgl. auch Abb. 1). Die Simulation eines Röntgengerätes erweist

sich nach dem Konzept der Virtual-Reality-Experimente als ideal, da Experimente mit Röntgeneräten speziell von verschärften Sicherheitsanforderungen für die Benutzung im Unterricht betroffen sind. Während diese Demonstrationsgeräte früher ein fester Bestandteil nahezu jeder schulischen Physiksammlung waren, mussten sie durch höhere Sicherheitsanforderungen in den letzten Jahren flächendeckend außer Betrieb genommen werden.

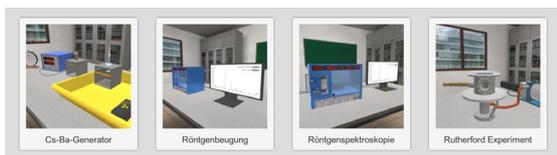


Abb.1: Portfolio der Versuche in der VRE-App, Version 2.0.

3. Virtual-Reality-Experimente zum Themengebiet Radioaktivität

Experimente zum Themengebiet Radioaktivität sind von Einschränkungen des Experimentierens im Schulunterricht schon seit Längerem besonders betroffen. Dies ist einerseits begründet durch die tatsächlichen Gefahren dieses Naturphänomens, aber noch stärker durch dessen Wahrnehmung in der Öffentlichkeit sowie durch die Änderung rechtlicher Bestimmungen. Schulversuche aus diesem Themenbereich sind daher bereits seit Langem im Fokus der Konzeption von Virtual-Reality-Experimenten (Lindlahr & Wendt 2016).

3.1. Cäsium-Barium-Isotopengenerator

Der Cäsium-Barium-Isotopengenerator nach Pinajian 1967 ist ein typisches Schulexperiment, das unter einer veränderten Rechtslage zu leiden hat. Der Versuch ermöglicht eine Bestimmung der Halbwertszeit unter optimalen Bedingungen für den Schulunterricht. Die Messung benötigt nur etwa eine halbe Stunde und das überschüssige Material kann nach kurzer Zeit über die Kanalisation entsorgt werden. Das Mutternuklid Cäsium 137 liegt in gebundener Form in einem abgeschlossenen Behälter vor. In diesem Behälter zerfällt es stetig u. a. in das metastabile Tochternuklid Barium 137m, wie im Zerfallsschema in Abb. 2 dargestellt.

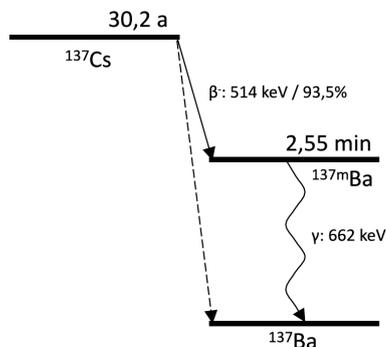


Abb. 2: Zerfallsschema, das dem Cäsium-Barium-Generator zu Grunde liegt.

Mit einer speziellen Elutionsflüssigkeit kann das Tochternuklid aus dem Behälter herausgespült werden und wird in einer Petrischale aufgefangen (vgl. Abb. 3, rechte Bildhälfte). Die Zerfälle des Tochternuklids zum stabilen Barium 137 mit einer Halbwertszeit von nur 2,55 min. können mit einem Geiger-Müller-Zählrohr gemessen und damit das radioaktive Zerfallsgesetz nachgewiesen werden.

Der Versuchsaufbau wird von Lehrmittelherstellern vertrieben, aber seine Bauartzulassung ist bereits im Jahre 2010 ausgelaufen. Dadurch ist in Deutschland der Umgang mit bis zum oben genannten Jahr beschafften Geräten genehmigungsfrei, während bei Neuanschaffungen eine Umgangsgenehmigung bei der Strahlenschutzbehörde beantragt werden muss, die mit Auflagen für die Handhabung verbunden werden kann. Unter dieser Änderung, die mit weiteren Aspekten zusammentrifft, hat die Attraktivität des Experiments für Schulen gelitten (ebd.). Daher wurde dieser Versuch in einer Kooperation mit dem deutschschweizerischen Fachverband für Strahlenschutz e. V. in das Portfolio der Virtual-Reality-Experimente aufgenommen (vgl. Abb. 3). Das VRE fordert die Einhaltung der Regeln des Strahlenschutzes ein, indem am Ende des Versuchs eine entsprechende Auswertung erfolgt.

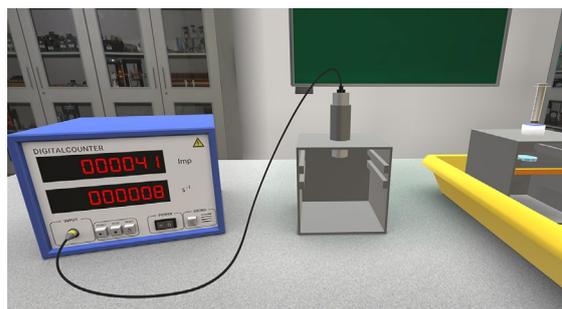


Abb. 3: Cäsium-Barium-Generator als Virtual-Reality-Experiment.

3.2. Abstandsgesetz radioaktiver Strahlung

Der Versuch zum Abstandsgesetz radioaktiver Strahlung ist in jedem Physik-Curriculum fest verankert. Die Abhängigkeit der Strahlung vom Abstand von ihrer radioaktiven Quelle ist eine zentrale Erkenntnis in diesem Themengebiet. Praxisorientiert lässt sich dieser Inhalt nicht zuletzt über die zentralen Regeln des Strahlenschutzes, die „Fünf A“ – Abstand, Abschirmung, Aufenthaltsdauer, Aktivität sowie Aufnahme vermeiden – motivieren.

Ein möglicher Realversuch zum Abstandsgesetz ist in Abb. 4 zu sehen. Auf einer optischen Bank befindet sich ein Präparatehalter (Bildmitte), dem in einer entsprechenden Halterung ein Geiger-Müller-Zählrohr direkt gegenüber steht. Das Zählrohr ist an das Zählgerät, ganz rechts im Bild, angeschlossen. Hinter der Schiene ist ein radioaktives Präparat in dessen abschirmendem Aufbewahrungsbehälter (rot) zu sehen.



Abb. 4: Realversuch zum Abstandsgesetz radioaktiver Strahlung.

Im Virtual-Reality-Experiment (vgl. Abb. 5) ist der reale Aufbau nachgeahmt. Die optische Bank befindet sich in der Mitte des Experimentiertisches. Auf dieser ist wiederum ein Präparatehalter (links) sowie eine Halterung mit Zählrohr (rechts) montiert. Es stehen zwei Zählrohre zur Auswahl, die sich in ihrer „Parkposition“ rechts hinter den gelben Abschirmungsböcken befinden. Beide Zählrohre sind an das Zählgerät (ganz rechts im Bild) angeschlossen. Es stehen verschiedene radioaktive Präparate zur Verfügung, die im Aufbewahrungsbehälter am linken Tischende gelagert werden.

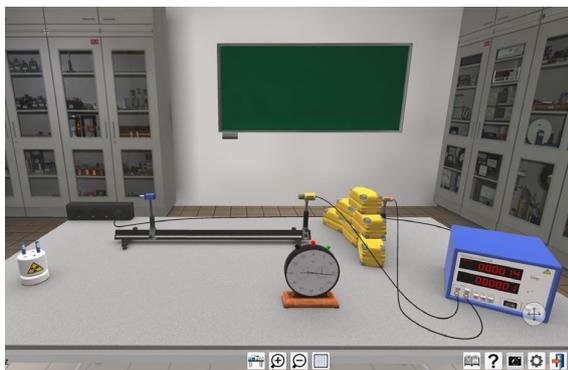


Abb. 5: Virtual-Reality-Experiment zum Abstandsgesetz.

Mit dem Virtual-Reality-Experiment zum Abstandsgesetz kann die Ausbreitung der radioaktiven Strahlung verschiedener Präparate in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Präparat und Zählrohr quantitativ ermittelt werden. Hierzu stehen zwei unterschiedliche Typen von Zählern, nämlich ein Geiger-Müller-Zählrohr und ein Proportionalzählrohr, zur Verfügung. Es können die Zählraten für drei verschiedene, durchaus schultypische, Präparate gemessen und damit auf die Eigenschaften unterschiedlicher Strahlungsarten geschlossen werden:

- Americium 241 (Alphastrahler),
- Strontium 90 (Betastrahler) sowie
- Cobalt 60 (Gamma-Strahler).

Die hier genannten Strahlungsarten betreffen die für die Unterrichtspraxis relevanten, messbaren Charakteristika, die sich durch die Bauart der Präparate (u. a. Abschirmung) ergeben. Diese müssen nicht unbedingt den Angaben zu den Isotopen in der Nuklidkarte entsprechen. Zusätzlich zur Messung der Aktivität der Präparate ist es möglich, die Nullrate zu ermitteln, indem keines der Präparate in die Halterung eingesetzt wird.

4. Virtual-Reality-Experimente zum Themengebiet Elektromagnetismus

Das Themengebiet Elektrizitätslehre bzw. Elektromagnetismus nimmt im schulischen Physikunterricht traditionell einen hohen Stellenwert ein, der sich u. a. in der Breite der Themengebiete in den Curricula zeigt. Viele Versuche aus diesem Gebiet sind einfach und unproblematisch als Realexperimente durchführbar und finden mitunter sogar Umsetzungen mit Materialien aus dem Baumarkt. Das Themengebiet bietet aber gleichermaßen eine Reihe von Experimenten, die mit Gefahren verbunden sind, allen voran durch hohe Spannungen und Ströme. Diese und weitere charakteristische Probleme im experimentellen Prozess motivieren die Umsetzung von Versuchen nach dem Konzept der Virtual-Reality-Experimente. Im Folgenden wird der Versuch zum Hall-Effekt als typisches Experiment aus der Elektrizitätslehre mit seinen spezifischen Problemen dargestellt und auf die Braunsche Röhre als weiteren Versuch auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre verwiesen.

4.1. Experiment zum Hall-Effekt

Der Hall-Effekt ist einer der zentralen Versuche in der Elektrizitätslehre und findet eine Reihe von Anwendungen in moderner Technik, wie z. B. beim Magnetfeldsensor in Smartphones. Er beschreibt die Entstehung einer elektrischen Spannung bei einem elektrischen Strom in einem Magnetfeld. Die Richtung der Spannung steht senkrecht sowohl zur Richtung des Stroms als auch zu den magnetischen Feldlinien.

Die Durchführung des Realexperiments zum Hall-Effekt ist von guten Messbedingungen abhängig und birgt außerdem die Gefahr, in der Praxis das zentrale Bauteil, die Hall-Probe, durch einen zu hohen Strom oder durch mechanische Einwirkung zu beschädigen. Kommt es zu einer solchen Beschädigung, sind damit direkt hohe Kosten verbunden, die in Schulen schnell Probleme bereiten. Diese Gefahren liefern eine gute Begründung für die Umsetzung des Versuchs als Virtual-Reality-Experiment. Das VRE ist für Schülerinnen und Schüler unproblematisch auf digitalen Endgeräten verfügbar und vermeidet die Gefahr der Beschädigung der empfindlichen Komponenten. Aufgrund der besonderen Empfindlichkeit der Gerätschaft ist das VRE zum Hall-Effekt darüber hinaus prädestiniert für eine Kombination aus realem Versuch und Simulation. Das Virtual-Reality-Experiment kann als Vorbereitung für den Realversuch benutzt werden und von beliebig vielen Schülerinnen und Schülern gleichzeitig als Übung durchgeführt werden. Im Anschluss daran kann entweder die Lehrkraft oder eine praktisch versierte Schülerin bzw. Schüler den Realversuch übernehmen.

Den Aufbau des VRE zum Hall-Effekt zeigt die Abb. 6. In der Mitte des Experimentiertisches ist der Elektromagnet zu sehen, bestehend aus zwei Spulen und einem geblätternen Weicheisenkern. Im Zentrum des Spaltes des Eisenkerns befindet sich die Hall-Probe,

eingebaut in eine entsprechende Halterung. Die Halterung beinhaltet weiterhin Buchsen, über die die Anschlüsse der Hall-Probe erreichbar gemacht werden. Dies ist jeweils ein Buchsenpaar für den Strom, für die Heizung des Hall-Plättchens, sowie für die Messung der Hall-Spannung.

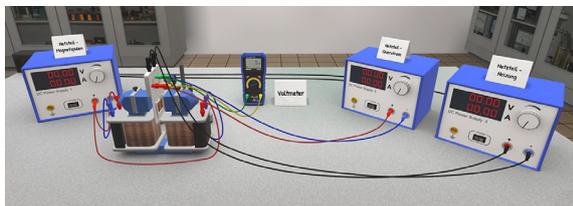


Abb. 6: Virtual-Reality-Experiment zum Hall-Effekt.

Der Hall-Effekt bietet weitere experimentelle Herausforderungen, denen auch im Virtual-Reality-Experiment Rechnung getragen wird. Zum Aufbau gehören mehrere Spannungs- bzw. Stromquellen (vgl. Abb. 6), die nicht verwechselt werden dürfen und deren Werte während der gesamten Durchführung im Blick behalten werden müssen. Hierzu bietet das Virtual-Reality-Experiment Beschriftungsmöglichkeiten, die in Form von „Aufstellern“ auf den jeweiligen Geräten realisiert sind. An jedem dieser Aufsteller kann eine von mehreren Beschriftungen ausgewählt werden, die das Gerät eindeutig im Rahmen des Experiments bezeichnet – Stromquelle Magnetspulen, Stromquelle Querstrom sowie Stromquelle Heizung.

Beim Aufbau des Versuchs müssen zunächst mit Kabeln die Stromquellen mit den entsprechenden Buchsen an der Halterung der Hall-Probe verbunden werden. Zu diesem Zeitpunkt empfiehlt sich auch die Auswahl der Beschriftungen. Auch das Voltmeter muss zunächst entsprechend verkabelt werden.

4.2. Braunsche Röhre

Auf dem Gebiet des Elektromagnetismus ist weiterhin aktuell ein Virtual-Reality-Experiment zur Braunschen Röhre in Entwicklung. Dessen Konzeption wird in Lhotzky et al. 2023 vorgestellt.

5. Verfügbarkeit

Die App mit Virtual-Reality-Experimenten ist für alle in der Schule verbreiteten Plattformen verfügbar. Hierbei werden Microsoft Windows, Apple MacOS sowie die mobilen Plattformen iOS bzw. iPadOS und Android unterstützt. Ebenso kann für Android-Geräte eine APK-Datei von der Homepage heruntergeladen werden (<https://www.vre.uni-mainz.de>).

6. Literatur

Aulenbacher, M. (2011): Interaktive Whiteboards und ihre Anwendung im Physikunterricht. Staatsexamensarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, unveröffentlicht. Zitiert nach Lindlahr (2022), S. 13.

Sekretariat der Kultusministerkonferenz (KMK 2016): Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz. Berlin.

Girwidz, R. (2020): Experimente im Physikunterricht. In: Kircher, E., Girwidz, R., Fischer, H. (Hrsg.): Physikdidaktik, Grundlagen. 2020, S. 263-291.

Lhotzky, J. F., Lindlahr, W., & Wendt, K. (2022): VRE Physik im digitalen Labor. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Lhotzky, J. F., Lindlahr, W., Bennert, F. & Wendt, K. (2023): Virtual-Reality-Experimente: Neueste Entwicklungen - Atomphysik. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Lindlahr, W. (2014): Virtual-Reality-Experimente für Interaktive Tafeln und Tablets. In: Maxton-Küchenmeister, J., Meßinger-Koppelt, J. (Hrsg.): Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Hamburg.

Lindlahr, W. & Wendt, K. (2016): Virtual-Reality-Experimente. Experimentieren mit realitätsnahen Simulationen. In: Naturwissenschaften im Unterricht, Physik 27(2016)151, S. 26-28.

Lindlahr, W. (2022): Virtual-Reality-Experimente. Entwicklung und Evaluation eines Konzepts für den forschend-entwickelnden Physikunterricht mit digitalen Medien. Berlin, Logos Verlag, Bd. 349.

MNU Landesverband Rheinland-Pfalz (2021, Hrsg.): Standpunkt des MNU Rheinland-Pfalz zum experimentellen Fernunterricht. Verfügbar unter: https://www.mnu.de/images/landesverbaende/rheinland_pfalz/Positionspapiere/210315_Statement-Naturwissenschaftlicher_Unterricht_digital-Ver%C3%B6ffentlichung.pdf (Zugriff 27.05.2023)

Pinajian, J. J.: A Cesium-137 – Barium-137m Isotope Generator. In: Journal of Chemical Education (1967), S. 212-213.

Wilhelm, T. & Hopf, M. (2014): Design-Forschung. In: D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.): Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin, S. 31-42.

Förderungen

Das Projekt wird gefördert durch den Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. im Rahmen der Ausschreibung „Wirkung hoch 100“.

Die Entwicklung der Versuche zum Abstandsgesetz radioaktiver Strahlung sowie zur Braunschen Röhre werden gefördert durch das Ministerium für Bildung Rheinland-Pfalz.

Die Entwicklung des Versuchs zum Hall-Effekt zusammen mit dem Rastertunnelmikroskop wird gefördert über den SFB/TRR 173 SPIN+X.