

## Virtual-Reality-Experimente: Neueste Entwicklungen - Atomphysik

Johannes F. Lhotzky\*, William Lindlahr<sup>†</sup>, Florian Bennert\*, Klaus Wendt\*

\*Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudingerweg 7, 55128 Mainz,

<sup>†</sup>Fachhochschule Südwestfalen, Medienpädagogik/Medientechnik

lhotzky@uni-mainz.de

### Kurzfassung

Virtual-Reality-Experimente (VRE) stellen realistische 3D-Simulationen naturwissenschaftlicher Versuche dar. Innerhalb einer realitätsnah modellierten und damit authentischen digitalen Laborumgebung kann mit den Experimenten und den zur Verfügung stehenden Geräten frei und selbstgesteuert experimentiert werden. Dabei werden diejenigen Versuche umgesetzt, deren Beschaffung für die Schule nicht realisierbar ist oder von denen zu hohe Gefahrenpotentiale bei Schülerexperimenten ausgehen. VRE ermöglichen durch ihre digitale Verfügbarkeit neue Partizipationsmöglichkeiten auf Seiten der Schüler:innen, die sonst nicht oder nur sehr erschwert realisierbar sind. Vorge stellt werden die neu entwickelten Experimente der Braunschen Röhre zur Untersuchung bewegter Ladungen in elektrischen Feldern sowie das VRE zum Franck-Hertz-Experiment zur Untersuchung der Energiequantelung als entscheidendem Aspekt der Quantenmechanik. Die Experimente stellen wesentliche Bausteine der Atom- und Quantenphysik dar und bieten essenzielle Lerngelegenheiten in diesem Themengebiet. Als Ausblick wird der Lernbegleiter „Atomi“ konzeptionell eingeführt und vorgestellt.

### 1. Einführung

Der Physikunterricht ist geprägt durch einen forschend-entwickelnden Zugang mit vielen Experimenten und die intensive Beschäftigung mit physikalischen Phänomenen und Forschungsgegenständen. Dennoch gibt es Versuche, die aus verschiedenen Gründen nur schwer oder gar nicht in den Unterricht integriert werden können. Besondere Gefährdungspotentiale, die z.B. von radioaktiven Stoffen, Lasern oder Hochspannung ausgehen, aber auch Kosten oder Experimentieraufwand sind oft die Ursache für das Ausbleiben von Praxiselementen und eigenständigen Experimenten im Unterricht. Eine Lösung, um dennoch auch in solchen Bereichen praktische Erfahrungen im Unterricht sammeln zu können, sind die an der Johannes Gutenberg-Universität entwickelten Virtual-Reality-Experimente (VRE). Diese simulieren reale Physik in einer digitalen, aber authentisch gestalteten Laborumgebung. Mit den VRE können Schulversuche mit den dazugehörigen Geräten und Apparaturen durchgeführt und gesteuert werden. Die Funktionalität der Software umfasst unter anderem das Einstellen von Spannungen und Strömen, das Variieren von Messbereichen an Multimetern, die Verkabelung von Schaltkreisen oder das Bedienen von Timern und Zählern sowie das Interagieren mit teils radioaktiven Präparaten. Ganz wie im realen Experiment ist dazu das Navigieren im Raum und das Fehlermachen beim Experimentieren wichtiger Bestandteil der Aktivität. Durch die plattformunabhängige Kompatibilität der Software können die virtuellen Experimente neben Smartphones, Tablets und Com-

putern auch auf interaktiven Displays oder Whiteboards durchgeführt werden. Im Folgenden werden konkrete die neu Entwickelten Umsetzungen der Braunschen Röhre und des Franck-Hertz-Experiment präsentiert und neue Entwicklungen im Bereich geführten Experimentierens durch den digitalen Assistenten „Atomi“ vorgestellt (Lindlahr 2014; Lindlahr & Wendt 2016; Lindlahr 2022; Lhotzky 2022).

### 2. Braunsche Röhre

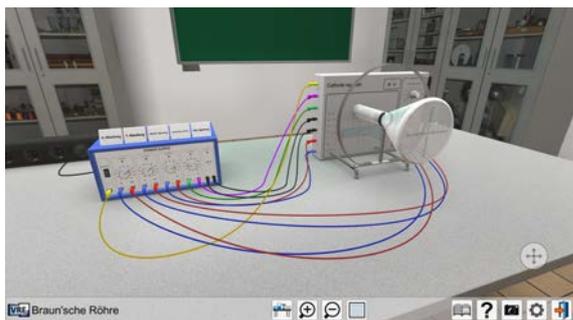
Die Braunsche Röhre, auch Kathodenstrahlröhre genannt, spielte eine zentrale Rolle in der Geschichte der Elektronik und Physik und war eines der ersten elektronischen Anzeigergeräte. Benannt wurde sie nach ihrem Erfinder, dem deutschen Physiker Ferdinand Braun. Mit dem Strahl schneller Elektronen in dieser Röhre können verschiedene physikalische Prinzipien nicht nur untersucht, sondern auch für den unterrichtlichen Kontext veranschaulicht werden.

Der Versuchsaufbau demonstriert die zentralen Eigenschaften von Elektronen: Die negativ geladenen Teilchen werden durch thermische Emission aus einem Kathodenmaterial ausgelöst und können durch ein elektrisches Feld beschleunigt werden. Dabei kann der Einfluss von elektrischen Feldern auf Ladungen, in unserem Fall bewegte Elektronen, gezeigt werden. In einer späteren Ausbaustufe ist auch die Implementation eines magnetischen Feldes vorgesehen, damit die vollständige Breite der Elektrodynamik dargestellt werden kann. Die Bewegung von geladenen Teilchen in elektrischen (und magnetischen) Feldern wird durch die Lorentz-Kraft beschrieben. Diese lässt sich aus dem Experiment oder theoretisch

aus den Maxwell-Gleichungen ableiten. Die Entwicklung der Braunschen Röhre als graphisches Anzeigegerät für Wechselspannungen, z.B. im Bereich der Ton- oder Hochfrequenztechnik, stellt einen zentralen Fortschritt für die Entwicklung der Elektronik als Teilgebiet der Physik dar (Gente 1954). Aus diesem konnte sich der Röhrenfernseher in schwarz weiß und später in Farbe entwickelt, der über Jahrzehnte in allen Wohnzimmern weltweit vertreten war. Erst in den letzten zwei Jahrzehnten erfolgte die Ablösung durch die Halbleitertechnologie in Form von LED-Flachbildschirmen.

Trotz der mittlerweile antiquiert wirkenden Technologie hat die Braunsche Röhre auch heute noch einen hohen didaktischen Wert für den Physikunterricht. Der Versuchsaufbau bietet eine intuitive und visuelle Methode, um das Verhalten von geladenen Teilchen in externen Feldern zu untersuchen, zu veranschaulichen und die einfache mathematische Beschreibung zu verstehen. Die grundlegenden Prinzipien, die sie demonstriert, werden auch heute noch in vielen modernen Geräten, etwa bei Teilchenbeschleunigung, Röntgenröhren und Elektronenmikroskopie, eingesetzt. Darüber hinaus bietet sie einen faszinierenden historischen Zugang zur Entwicklung der Elektronik von der Vakuumröhre zur Halbleitertechnologie. Der historische Aspekt ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern, den technologischen Fortschritt im zeitlichen Querschnitt zu betrachten und den Mehrwert heutiger Technologien zu schätzen. Auch wenn die Braunsche Röhre selbst keine allzu große kommerzielle Verwendung mehr findet, sind.

Durch die Verwendung des VREs zur Braunschen Röhre im Unterricht können Schülerinnen und Schüler grundlegende physikalische Konzepte im Experiment erfahren (s. Abb. 1).



**Abb.1:** Der Aufbau zum VRE Braunsche Röhre bestehend aus Betriebsgerät mit Röhre und dem Netzteil

### 2.1. Probleme der Verwendung des Experiments im Unterricht

Die Verwendung einer realen Braunschen Röhre im Unterricht bringt verschiedene Herausforderungen und Aspekte mit sich, die berücksichtigt werden müssen. An erster Stelle stehen Sicherheitsfragen, da die Röhre unter hohen Spannungen und Temperaturen betrieben wird. Um Gefährdungen oder Verletzungen

zu vermeiden, sind Sicherheitsvorkehrungen und ein sorgfältiger Umgang mit der Ausrüstung erforderlich. Da das Experiment mit Spannungen von deutlich über 100V arbeitet, ist es für Schülerinnen und Schüler zu gefährlich und daher nicht als Schülerversuch geeignet bzw. zugelassen.

Die Vorbereitung kann auch für die Lehrperson aufwändig sein, z.B. wenn elektrische oder magnetische Streufelder vorliegen. Um die gewünschten Zusammenhänge der Ablenkspannungen quantitativ zu zeigen, müssen die herrschenden Felder fein abgestimmt werden, damit etwa die Nullposition vom Elektronenstrahl sauber getroffen wird.

Die Sichtbarkeit des Elektronenstrahls kann ein weiteres Problem darstellen, etwa wenn die vorhandene Beleuchtung im Raum nicht gut angepasst ist. Schließlich müssen auch die Kosten berücksichtigt werden. Die Lebensdauer einer Braunschen Röhre ist wie bei allen Vakuumröhren begrenzt. Sie muss ggf. ausgetauscht werden. Was zusätzliche Kosten verursacht. Die Anschaffung und Vorhaltung der notwendigen Ausrüstung an Netzgeräten kann teuer sein. Dies kann dazu führen, dass Schulen, die nur über begrenzte finanzielle Mittel verfügen, eine Anschaffung des Versuchs nicht in Erwägung ziehen und somit keine experimentelle Verankerung der Thematik vornehmen können.

Diesen Nachteilen des Realexperiments kann durch die Umsetzung des VRE im virtuellen Raum begegnet werden und zudem Aspekte der erhöhten Partizipationsfähigkeit und Teilhabe adressiert werden, wodurch ein echter Mehrwert für den Unterricht entstehen kann, auch neben dem Realexperiment.

### 3. Franck-Hertz-Experiment

Das Franck-Hertz-Experiment ist ein grundlegendes Experiment der Atomphysik, das die diskreten Energieniveaus der Elektronen in einem Atom eindrucksvoll als Messgraph oder Leuchterscheinung veranschaulicht. Der Versuch feierte 2014 sein hundertjähriges Jubiläum und wurde erstmals von James Franck und Gustav Hertz durchgeführt, die dafür 1925 den Nobelpreis für Physik erhielten (Robson et al. 2014).

Das bahnbrechende Experiment behandelt mehrere physikalische Aspekte. Es zeigt visuell die Quantelung der Energieniveaus in Atomen auf als grundlegendes Element der Quantenphysik (Niedderer 1992). Das Experiment nutzt dazu aus, dass neben elastischen Stößen, bei denen keine Energie von den Elektronen an die Atome übertragen wird, auch inelastische Stöße auftreten, bei denen die Elektronen Energie an die Atome abgeben. Dies führt zu einem diskreten Abfall der kinetischen Energie der Elektronen. Ferner liefert das Franck-Hertz-Experiment eine experimentelle Bestätigung der Existenz und der energetischen Lage der diskreten Energieniveaus eines Atoms, wie es von dem Bohrschen Atommodell vorhergesagt wird. Damit hat das Experiment einen Bezug zur optischen Atomspektroskopie, da die

Übergänge zwischen den Energieniveaus charakteristischen Spektrallinien entsprechen. Diese werden im Experiment sichtbar.

Der didaktische Nutzen des Franck-Hertz-Experiments ist immens, insbesondere durch seine Fähigkeit, das eher abstrakte Konzept der Quantenphysik in einem experimentellen Kontext zu veranschaulichen. Es ermöglicht den Lernenden, einen zentralen Aspekt der Quantenphysik, nämlich das Bohrsche Atommodell und das Konzept diskreter Energieniveaus, im experimentellen Kontext zu erfahren. Es ist ein Grundstein, auf dem die Lehrperson die Quantenmechanik als viel umfassendere Theorie mit ihren weiteren Zusammenhängen und Phänomenen aufbauen kann. Gleichzeitig vermittelt das Experiment einen Einblick in historische Methoden der experimentellen Physik an Elektronenröhren, einschließlich der Interpretation unerwarteter Daten. Das VRE (s. Abb. 2) bietet hierzu eine interaktive Umgebung, in der die Schülerinnen und Schüler anspruchsvoll, authentisch und sicher experimentieren können.

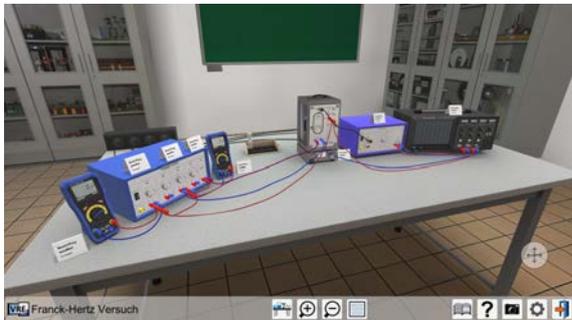


Abb.2: Der Aufbau zum VRE Franck-Hertz

### 3.1. Probleme der Verwendung des Experiments im Unterricht

Die Verwendung einer realen Franck-Hertz-Röhre als Schülerexperiment scheidet aufgrund der Gefährdung im Umgang mit der Vakuumröhre und der notwendigen Hochspannung aus, es kann i.d.R. ausschließlich als Demonstrationsexperiment eingesetzt werden. Zudem stellt die ordnungsgemäße Verkabelung eine Herausforderung dar und kann im Realexperiment leicht zur Zerstörung von Netzgeräten oder der Röhre selbst führen. Diese Aspekte führen für Schulen oder Bildungseinrichtungen mit begrenztem Budget meist zu einer Entscheidung gegen eine Beschaffung. Die Umsetzung des VRE im virtuellen Raum kann hier nutzbringend eingesetzt werden, wobei wiederum die Aspekte der Teilhabe und Partizipationsfähigkeit als Schülerexperiment im Vordergrund steht.

### 4. Bedienungshilfen

In das VRE zum Franck-Hertz-Experiment und zur Braunschen Röhre wurden aus didaktischen Gesichtspunkten einige Neuerungen eingearbeitet: So kann zum optimalen Verständnis und zur Strukturierung Vorbereitungs- und Planungsschritte direkt im VRE vorgenommen werden. Dazu, ist für die individuellen Stromkreise und Kanäle der Netzgeräte eine

Beschriftung vorgesehen, die von den Experimentator:innen selbstständig vorgenommen werden muss, bevor das VRE in Betrieb genommen werden kann. Dies macht den Gesamtaufbau und die Verkabelung deutlich übersichtlicher und verständlicher (s. Abb. 3).

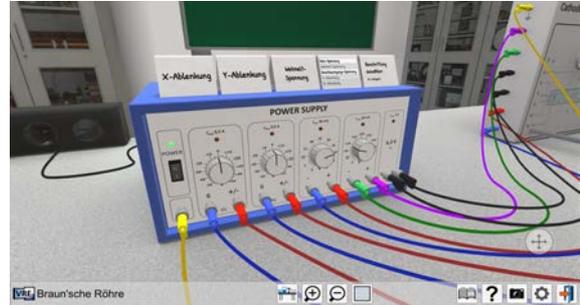


Abb.3: Kärtchen zur Strukturierung in der VRE Anwendung am Beispiel der Braunschen Röhre

Dabei gibt es keine vorgegebene Lösung der Beschriftung, sondern es können wie in der Realität unterschiedliche Benennungen zum Ziel führen, ebenso sind Fehler möglich, die zu Funktionslosigkeit oder Ausfall von Sicherungen führen. Beispielsweise kann die gewünschte Spannung nicht erreicht werden, wenn die Beschleunigungsspannung an einem der ersten Ausgänge angeschlossen wird, wodurch kein Elektronenstrahl entstehen kann.

### 5. Bedeutung von Schülerexperimenten

Die Umsetzung des Experiments zur Braunschen Röhre und das Franck-Hertz-Experiment als digitale Schülerexperimente haben einige unterrichtspraktische Vorteile, die folgend dargelegt werden.

Dank der digitalen Umsetzung der Experimente ist die Sicherheit der Lernenden jederzeit gewährleistet. Ein eigenständiges und selbstorganisiertes Lernen kann demnach ohne Sicherheitsbedenken auch ohne Aufsicht durchgeführt werden. Die Experimente können auf jedem digitalen Endgerät, Computer oder interaktiven Whiteboard ausgeführt werden und benötigen keine besonderen Ressourcen, speziell da die VRE plattformübergreifend entwickelt wurden. Dadurch ermöglichen sie hohe Zugänglichkeit und Flexibilität im Einsatz, z.B. im Lernkontext, Wissensüberprüfung oder als Hausaufgabe. Dabei geben sie den Schülerinnen und Schülern die Freiheit, in ihrem eigenen Tempo selbstständig und ortsunabhängig zu lernen. Die Möglichkeit der Sicherung der einzelnen Versuchsschritte oder der Arbeitskontrolle über Screenshots oder -recording stellt weitere praktische Aspekte für die Experimentier- und Auswertungspraxis zur Verfügung.

Trotz dieser deutlichen Vorzüge sollen VRE immer nur als Erweiterung und nicht als Ersatz von realen Experimenten dienen, da sie dem mentalen und haptischen Erleben einer „echten“ Experimentierumgebung natürlich nicht gleichzusetzen sind. Wenn auch durch den intensiven Einsatz digitaler Experimente neue Lerngelegenheiten und Lernziele entstehen, so

verlieren diese aber gleichermaßen auch schnell an Charme, Authentizität und Durchführungspraxis und verspielen damit den Faktor der Motivation.

#### 6. Atomi als digitale Unterstützung

Aufgrund der inzwischen breiten Verfügbarkeit von Virtual-Reality-Experimenten, die teilweise über den lehrergesteuerten Einsatz hinausgeht oder ohne diesen auskommen soll, wurde angeregt, die Nutzerinnen und Nutzer in der Anwendung anzuleiten und Hilfestellungen zu geben. Zu diesem Zweck wird zukünftig der Ansprechpartner „Atomi“ zur Verfügung stehen, um optional durch die Anwendung zu führen und individuelle Hilfestellungen zu geben (s. Abb. 4). Er agiert anfangs in einem Einführungstutorial, das die grundlegenden Interaktionsmöglichkeiten innerhalb der VRE-Anwendung aufgreift und diese dem Nutzer bzw. der Nutzerin spielerisch näherbringt. In

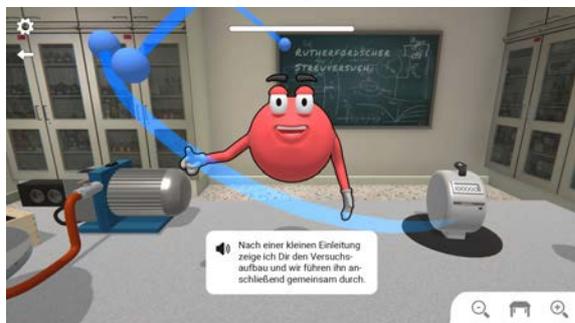


Abb.4: Digitaler Assistent Atomi in Aktion

diesem geschützten Rahmen der Einführung können die Benutzbarkeit und die Stärken der Software erkundet werden und es kann so ein effizientes, frustrationsfreies Experimentieren in den eigentlichen Experimenten vorbereitet werden.

#### 7. Verfügbarkeit

Neben den hier dargestellten Neuentwicklungen findet sich in Lindlahr et al. 2023 ein Überblick über weitere Experimente. Die VRE App ist bereits heute über alle gängigen Plattformen verfügbar. Hierbei werden Microsoft Windows, Apple MacOS sowie die mobilen Plattformen iOS bzw. iPadOS und Android unterstützt. Ebenso kann eine APK-Datei von der Homepage <https://www.vre.uni-mainz.de> heruntergeladen werden.

#### 8. 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, Franck–Hertz-Versuch und Braunsche 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.

#### 9. Literatur

- Gente, H. (1954). *Die Braunsche Röhre*. Vieweg.
- Lhotzky, J. F., Lindlahr, W., & Wendt, K. (2022). VRE Physik im digitalen Labor. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Lindlahr, W. (2014). Virtual-Reality-Experimente für Interaktive Tafeln und Tablets. In Joachim-Herz-Stiftung (Hrsg.). *Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Hamburg.
- Lindlahr, W. & Wendt, K. (2016). Virtual-Reality-Experimente. Experimentieren mit realitätsnahen Simulationen. In *NiU 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. Logos Verlag, Bd. 349
- Lindlahr, W., Lhotzky, J., Bennert, F. & Wendt, K. (2023). Virtual-Reality-Experimente: Neueste Entwicklungen, Radioaktivität und Elektromagnetismus. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Niederer, H. (1992). Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell. *Quantenphysik in der Schule*, S. 88-113.
- Robson, R. E., White, R. D., & Hildebrandt, M. (2014). One hundred years of the Franck-Hertz experiment. *The European Physical Journal D*, 68, 1-20.