

Visualisierung von Elektronen in Stromkreisen mithilfe der App PUMA : Spannungslabor

Lisa Nebel, Christoph Stolzenberger, Florian Frank, Thomas Trefzger

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik
Christoph.stolzenberger@uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Elektronen werden meistens als Kugeln visualisiert. Inwiefern dieses Bild bei Schüler*innen fehlerhafte Vorstellungen hervorruft bzw. der Natur dieser Elementarteilchen gerecht wird, bleibt dabei unklar. Da es keine wissenschaftliche Empfehlung zur Verwendung bestimmter Elektronendarstellungen gibt, findet man in gängigen Schulbüchern recht uneinheitlich verschiedene Visualisierungen. Diese beschränken sich in niedrigeren Klassen v.a. auf Teilchendarstellungen, welche zur Sekundarstufe II hin langsam in Richtung einer Wellen- oder Wahrscheinlichkeitsvorstellung erweitert werden. Die Applikation „PUMA : Spannungslabor“ erlaubt die Darstellung von Analogie-Modellvorstellungen zu elektrischen Stromkreisen und visualisiert dabei auch die sich im Stromkreis bewegenden Elektronen. Mithilfe einer systematischen Literaturrecherche wurden die gängigsten Elektronendarstellungen identifiziert (z.B. Kugel, Minuszeichen, Wolke, Wellenpaket) und in die App implementiert. Im Rahmen einer Akzeptanzbefragung erhielten Physik-Lehrpersonen die Möglichkeit, die verschiedenen Darstellungen hinsichtlich des Einsatzes im Physikunterricht zu bewerten. In diesem Beitrag werden die Literaturrecherche, die Umsetzung in der Applikation sowie die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung vorgestellt.

1. Einleitung

Visualisierungen im Physikunterricht bieten eine Möglichkeit, fachlich abstrakte Sachverhalte zu vereinfachen und Schüler*innen gegebenenfalls eine Orientierung zu bieten. Daher sind sie vor allem in der E-Lehre, in welcher experimentelle Effekte meist nur indirekt durch Messgeräte gezeigt werden können, besonders wichtig. Die Visualisierung des elektrischen Potentials kommt dabei ohne eine explizite Darstellung der Elektronen aus. Sie verwendet je nach gewählter Analogie z.B. eine Einfärbung oder eine Höhenverschiebung der Leiterstücke, um das entsprechende elektrische Potential anzugeben (vgl. [1]). Im Gegensatz dazu fordert die Visualisierung der Stromstärke eine explizite Darstellung sich bewegender Teilchen. Welche Teilchen dies sind, ist dabei jedoch zunächst nicht vorgegeben und wird gegebenenfalls durch die Wahl der Analogie bestimmt. In einer Wasserkreis-Analogie sind die sich bewegenden Teilchen Wassermoleküle, verwendet man die Fahrradketten-Analogie, bewegen sich entsprechend Kettenglieder. Da jeder elektrische Stromfluss sich bewegend elektrisch geladene Teilchen beinhaltet, ist es natürlich auch möglich auf eine analoge Darstellung zu verzichten und diese direkt zu visualisieren. In den meisten Fällen sind die elektrisch negativ geladenen Elektronen die Ursache des Stromflusses. Möchte man diese Elektronen auch zur Visualisierung des elektrischen Stroms verwenden, stellt sich zwangsläufig die Frage nach deren expliziter Darstellung. In Fachbüchern wird diese jedoch meist nicht extra the-

matisiert, da vermutlich weniger das Objekt als vielmehr seine Eigenschaften (Träger einer negativen Ladung, Welle-Teilchen-Dualismus, Lepton, etc.) physikalische Relevanz besitzen (vgl. [2]). Für eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Darstellung von Elektronen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt.

2. Literaturrecherche zur Elektronendarstellung

Die Recherche wurde zum einen als systematische Literaturrecherche (SLR) wissenschaftlicher Veröffentlichungen und zum anderen in aktuellen Schulbüchern durchgeführt. Die SLR besteht aus einer systematischen Datenbanksuche, welche mit grauer Literatur aus Lehrbüchern und Fachzeitschriften erweitert wurde. Ihr Ziel war es, mögliche Empfehlungen der Wissenschaft bezüglich der vielfältigen Darstellungsweise von Elektronen zu identifizieren. Mithilfe der Schulbuchrecherche wurden die tatsächlich im Unterrichtskontext verwendeten Elektronenvisualisierungen ermittelt.

2.1. Systematische Literaturrecherche

Für die systematische Literaturrecherche (vgl. [3]) wurden vier umfangreiche Datenbanken durchsucht: Scopus, Web of Science, BASE und Google Scholar. In diesen wurde nach den folgenden Schlagwörtern und ihren Synonymen und englischen Übersetzungen gesucht:

- Elektronendarstellung*
- Elektronenvisualisierung*
- Elektronenrepräsentation*

- Quantenobjektdarstellung*
- Quantenobjektvisualisierung*
- Quantenobjektrepräsentation*

Da Elektronen häufig mit kugelartigen Strukturen gleichgesetzt werden, wurde auch gezielt nach Darstellungen von Quantenobjekten gesucht. Das Ziel war es, Suchergebnisse zu generieren, welche nicht primär auf einer Teilchendarstellung basieren, sondern welche z.B. auch die quantenmechanische Natur der Elektronen berücksichtigen (z.B. Wellenpaket).

Durch die Wahl der Suchmaschinen und Schlagwörter wurde versucht, eine möglichst breite Abdeckung der bestehenden Forschungsliteratur zu gewährleisten. Insgesamt wurden in diesem ersten Schritt 1.613 Veröffentlichungen identifiziert. Durch den Zusatz „AND Student“ wurden diejenigen Veröffentlichungen aussortiert, welche sich nicht mit Schüler*innen befassen, was den Schluss nahe legt, dass es sich bei diesen um rein fachwissenschaftliche Arbeiten gehandelt hat. Diese Einschränkung reduzierte die Ergebnisse auf 959 Treffer, welche anschließend einem dreistufigen Verfahren unterzogen wurden: Zuerst wurden die Titel (Screening 1) und anschließend die Abstracts der Veröffentlichungen (Screening 2) analysiert und auf ihre Relevanz für die SLR hin beurteilt. Abschließend wurden die Volltexte auf ihre Eignung hinsichtlich der Fragestellung geprüft (siehe Abb. 1). Es stellte sich heraus, dass keine der 1.613 Veröffentlichungen sich mit dem Thema der Elektronenvisualisierung in einem didaktischen Kontext befasst.

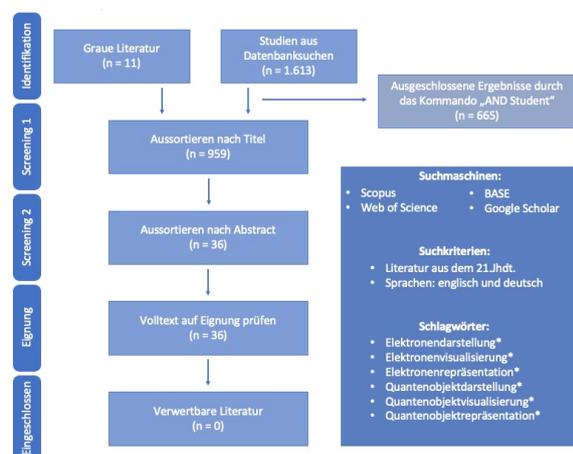


Abb. 1: Ablauf der systematischen Literaturrecherche

Für eine Einschätzung, inwieweit Darstellungsweisen von Elektronen im physikdidaktischen Diskurs vertreten sind, wurden zusätzlich elf Ressourcen aus der grauen Literatur, darunter sowohl bekannte Grundlagenbücher der Physikdidaktik (z.B. [4][5]) als auch einschlägige Fachzeitschriften (darunter z.B. die Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften), nach möglichen Visualisierungsempfehlungen durchsucht. Wie zuvor in der Datenbankrecherche wurde in keiner dieser Quellen das Thema Elektronendarstellung thematisiert.

2.2. Schulbuchrecherche

Für die Schulbuchrecherche wurden 25 bayerische Physik-Schulbücher der Jahrgangsstufen 7 bis 12 betrachtet, welche speziell für den neuen G9-Lehrplan verfasst wurden und somit die darin verwendeten Standards nicht älter als fünf Jahre sind. In diesen Schulbüchern wurden die darin benutzten Visualisierungen elektrischer Ladungen ermittelt.

Das Grundlagenwissen für Stromkreise und somit auch bildliche Darstellungen von sich bewegenden Elektronen wird vertieft in der 8. Klasse behandelt, in den darauf folgenden Jahrgangsstufen werden Stromkreise häufiger in Form von Schaltkreisen dargestellt. Deshalb wurde der Fokus der Untersuchung auf die Schulbücher der 8. Klasse gelegt und in den anderen Jahrgangsstufen auch generelle Darstellungen von Ladungen (z. B. in der Elektrostatik) mit einbezogen. In Abbildung 2 werden die Ergebnisse der ermittelten Visualisierungen graphisch wiedergegeben. Es stellte sich heraus, dass Elektronen am häufigsten als Kugeln oder Kreise dargestellt und speziell bei elektrischen Stromkreisen vorrangig mehrere Kugeln verwendet werden. Weniger formgebende Symbole, welche das Aussehen von Elektronen nicht vorprägen würden, wie „e-“ oder „-“, werden seltener bis kaum abgebildet. Ebenfalls selten und wenn, dann nicht in Stromkreisen, werden Darstellungsweisen, welche die quantenmechanische Natur des Elektrons verdeutlichen würden, dargestellt. Diese wurden durch ein „Wellenpaket“, eine „3D-Wolke“ oder einen „Wellenzug“ visualisiert.

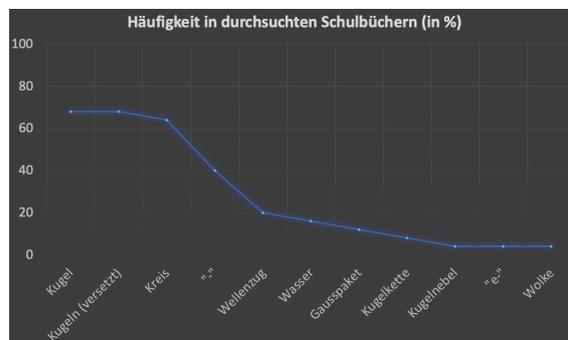


Abb. 2: Ergebnisse der Schulbuchrecherche

2.3. Zusammenfassendes Ergebnis der Literaturrecherche

Im Rahmen der systematischen Literaturrecherche wurden keine Veröffentlichungen gefunden, welche sich mit der Visualisierung von Elektronen in einem schulbezogenen Kontext auseinandersetzen, wodurch sich keine Empfehlung ableiten lässt. Trotzdem oder auch aufgrund mangelnder Vorschläge seitens wissenschaftlicher Quellen werden viele Visualisierungsmöglichkeiten in Schulbüchern genutzt. Hauptsächlich werden hierbei formgebende Darstellungsformen gewählt, wie zum Beispiel Kugeln oder Kreise, welche besonders die Teilchenvorstellung fördern. Unklar ist dabei, welchen Einfluss diese vorgeprägte Vorstellung des Elektrons als Teilchen für

die Oberstufe hat, da in dieser quantenmechanische Grundlagen vermittelt werden sollen.

3. Implementierung verschiedener Elektronen-Darstellungen in der App „PUMA : Spannungslabor“

Die Augmented Reality-Applikation „PUMA : Spannungslabor“ [6] visualisiert am Realexperiment für beliebig gesteckte Stromkreise das elektrische Potential im Rahmen des Elektronengasmodells [7] bzw. einer Höhenanalogie [1]. Die Stromstärke wird durch sich bewegende Elektronen dargestellt, der elektrische Widerstand verschiedener Bauteile kann mithilfe einer Stoßanalogie verstanden werden. Durch Nutzung einer Bluetooth Low Energy – Messbox [8] können zusätzlich am realen Stromkreis gemessene Daten angezeigt werden.

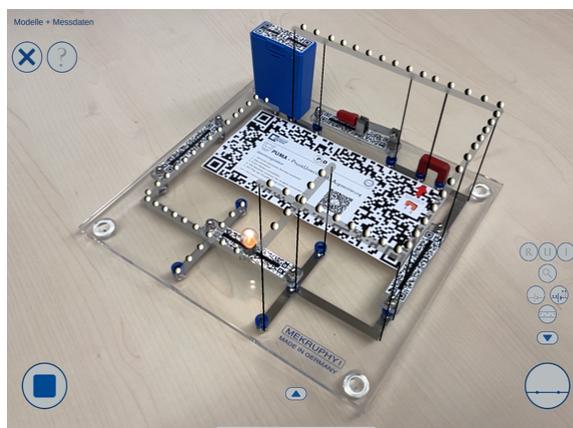


Abb. 3: Visualisierung des elektrischen Potentials gemäß einer Höhenanalogie mit sich bewegenden Kugeln als Elektronenvisualisierung

Ziel der Applikation ist die Visualisierung der grundlegenden elektrischen Konzepte, indem diese virtuell über einen experimentellen Aufbau gelegt werden. Die App ermöglicht dadurch Beobachtungen am Realexperiment, welche über Veränderungen in der Helligkeit von Glühlampen oder von Zahlen auf Messgeräten hinausgehen. Dies ermöglicht den Lernenden eine räumlich und zeitlich direkte Verknüpfung des Realexperiments mit entsprechenden theoretischen Modellvorstellungen (vgl. Abb. 3). Die explizite Darstellung der sich bei Stromfluss bewegenden Elektronen ist ein elementarer Baustein der Visualisierung. Auf Grundlage der bereits beschriebenen Literaturrecherche wurden verschiedene Elektronen-Darstellungen in die Applikation implementiert. Die App beinhaltet daher verschiedene Kugel-, Symbol- und Textdarstellungen (vgl. Abb.4).



Abb. 4: Kugel- und Textdarstellungen der Elektronen in der Applikation

Dies ermöglicht es, für jedes Anwendungsgebiet eine passende Darstellung der Elektronen zu wählen. Möchte man z.B. explizit den geschlossenen Stromkreis thematisieren, bietet sich die Darstellung „Kugelkette“ an. Möchte man in den Vordergrund stellen, dass das Elektron elektrisch geladen ist, wählt man z.B. die Darstellung „e-“ aus. Die Möglichkeit in der Applikation die „Erscheinungsform“ der Elektronen zu ändern, erlaubt – unabhängig von der konkret gewählten Form – auch eine Diskussion über den Modellcharakter der verschiedenen Visualisierungen.

4. Akzeptanzbefragung zu den Darstellungen der Elektronen

Um herauszufinden, wie Physiklehrkräfte die verschiedenen Elektronendarstellungen bewerten, wurde eine Akzeptanzbefragung durchgeführt. Teilgenommen haben 17 bayerische Lehrpersonen weiterführender Schulen mit Unterrichtsfach Physik. Die Lehrpersonen wurden hierfür um die Einschätzung gebeten, ob sie die Grundidee der verschiedenen Visualisierung sinnvoll finden. Zusätzlich sollte auch die jeweilige Umsetzung in der App bewertet werden. Hintergrund der zweiten Frage ist die Überlegung, dass eine in der App schlecht umgesetzte Visualisierung durchaus physikalisch bzw. didaktisch sinnvoll sein kann. Die Bewertung erfolgte auf einer 6-stufigen Likert-Skala, welche den Grad der Zustimmung ausdrückt (0 = gar nicht, 5 = sehr). Zusätzlich war es möglich in einer freien Antwort Probleme oder Vorteile der Visualisierung zu thematisieren.

Es fällt auf, dass die Verwendung von Kugeldarstellungen (Kugel, Kugeln (versetzt), Kugelkette) generell recht positiv eingeschätzt wurde (vgl. Abb. 5). Dabei wurde die Darstellung einer nicht-singulären Kugel als realistischer, eine zu große Zahl an Kugeln jedoch als unübersichtlich eingeschätzt.

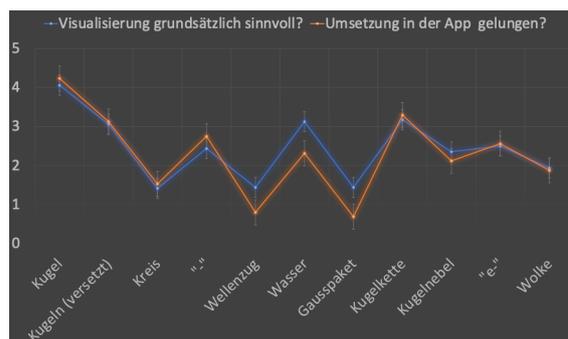


Abb. 5: Einschätzung der Lehrpersonen zur grundlegenden Sinnhaftigkeit (blau) und Umsetzung (orange) der Visualisierungen

Textdarstellungen („-“, „e-“) landen im Mittelfeld der Bewertung. Ihr Vorteil ist, dass sie kein „Aussehen“ der Elektronen suggerieren und zusätzlich noch das Vorhandensein einer elektrischen Ladung darstellen. Die Darstellung von fließendem Wasser erhält eine recht gute Bewertung, da diese gemäß der befragten Lehrpersonen gut an die Erfahrungswelt der Schü-

ler*innen anknüpft. Darstellungen, welche den Wellencharakter oder die Nicht-Lokalität der Elektronen betonen, erhalten eher schlechte Bewertungen. Dies liegt daran, dass viele Lehrpersonen diese Thematik erst später in der Schule sehen und bei der Elektrizitätslehre eher auf gängige Darstellungen der Elektronen setzen. Noch am besten bewertet wird die Darstellung als „Wolke“, da diese ebenso einfach verständlich wie eine Kugel ist, jedoch als physikalisch korrekter angesehen werden kann.

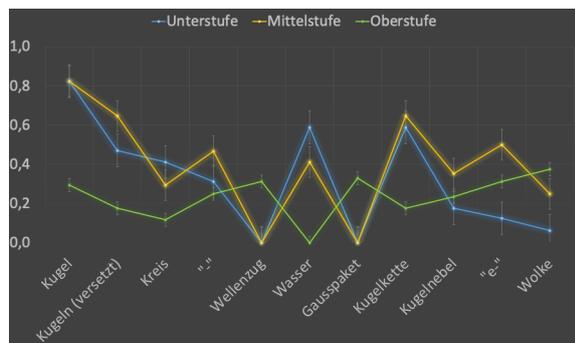


Abb. 6: Einschätzung der Lehrpersonen zum Einsatzgebiet der Visualisierungen

Eine weitere Frage (vgl. Abb. 6) zielte darauf ab, in welcher Jahrgangsstufe (Unter-, Mittel- oder Oberstufe) die jeweiligen Visualisierungen aus Sicht der Lehrperson eingesetzt werden sollten (dichotome Items, 0 = nein, 1 = ja). Für den Einsatz in Unter- und Mittelstufe ergibt sich dabei ein ähnliches Bild, welches v.a. durch den Einsatz von Kugel- und Textdarstellungen geprägt ist. Für die Oberstufe erhalten schließlich auch Visualisierungen positive Werte, welche stärker nicht-klassische Konzepte thematisieren. Die abschließende offene Frage, ob die Lehrpersonen grundsätzlich den Einsatz verschiedener Visualisierungen als positiv erachten, wird weitestgehend bejaht. Mehrere Darstellungen sind nach Meinung der Befragten sinnvoll, wenn man bei einer „Haupt-Visualisierung“ bleibt (v.a. für schwache Schüler*innen) und nicht zu viele Darstellungen anbietet. Positiv hervorgehoben wird auch die Möglichkeit (bei Anwesenheit mehrerer Darstellungen) überhaupt über das Thema Visualisierungen reden zu können und deren jeweiligen Modellcharakter zu verdeutlichen.

5. Ausblick

Visualisierungen sind ein wichtiger und unverzichtbarer Bestandteil des Physikunterrichts, in der E-Lehre sogar eine Notwendigkeit, um den Schüler*innen ein Verständnis für den Sachverhalt zu vermitteln. Von wissenschaftlicher Seite aus wurde sich daher viel mit passenden Modellen für die E-Lehre zur Verdeutlichung von Stromstärke und der für Schüler*innen schwer verständlichen elektrischen Spannung beschäftigt. Aus der systematischen Literaturrecherche erhalten wir jedoch keine Empfehlung wie Elektronen in Leitern ohne weitere Modellvorstellung aussehen sollten. Aufgrund dessen wurden die

aus der Schulbuchrecherche ermittelten Darstellungsformen in die Applikation „PUMA : Spannungslabor“ implementiert. Auf diese Weise können Lehrpersonen selbst entscheiden, welche Darstellungsform sie als am geeignetsten empfinden. Zusätzlich erhalten sie damit überhaupt erst die Gelegenheit mit den Schüler*innen darüber zu sprechen, dass jeder Visualisierung ein Modell zugrunde liegt, welches eben nur ein Modell und nicht die Realität selbst ist.

6. Literatur

- [1] Wilhelm, T., Schecker, H., & Hopf, M. (Hrsg.). (2021). Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. S. 261 – 268. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2015). Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure (J. Wagner, Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg.
- [3] Wetterich, C., & Plänitz, E. (2021). Systematische Literaturanalysen in den Sozialwissenschaften: Eine praxisorientierte Einführung. S. 49. Verlag Barbara Budrich.
- [4] Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). Physikdidaktik: Theorie und Praxis. Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Kircher, E., Girwidz, R., & Fischer, H. E. (Hrsg.). (2020). Physikdidaktik | Methoden und Inhalte. Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Stolzenberger, C., Frank, F., & Trefzger, T. (2022). Experiments for students with built-in theory: ‘PUMA: Spannungslabor’ – an augmented reality app for studying electricity. *Physics Education*, 57(4), 045024.
- [7] Burde, J.-P. (2018). Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells. Logos Verlag Berlin.
- [8] Kirwald, D., Dorsel, D., Staacks, S., Noritzsch, J., Stampfer, C., & Heinke, H. (2022). phyphox: Neue und verbesserte Experimente mit Hilfe externer Sensoren. Poster, GDCCP-Jahrestagung 2022, Aachen.