

Differenzierte Lernwege im computerbasierten Experiment - mathematische und experimentelle Betrachtung der Ablenkung von Elektronen -

Stefan Richtberg, Raimund Girwidz

Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstr. 37, 80333 München
Stefan.Richtberg@physik.uni-muenchen.de, girwidz@lmu.de

Kurzfassung

Experimente stehen häufig im Zentrum des Physikunterrichtes. Jedoch wird ihr konkreter Einsatz und ihre spezifische Verwendung von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, beispielsweise von den expliziten Lern- und Lehrzielen. Beschränkt wird die Nutzung als Schülerexperiment hierbei häufig durch die Verfügbarkeit von Geräten und die Sicherheitsbestimmungen. Computerbasierte Experimente haben diese Einschränkung in der Regel nicht, können aber ebenso auf bestimmte Lernziele abgestimmt werden. Des Weiteren können solche Experimente eine große Zahl an Nutzern erreichen, wenn sie über das Internet frei zugänglich gemacht werden.

In einer browserbasierten [Lernumgebung](#) wurden zwei typische Herangehensweisen an ein Experiment zur Ablenkung von Elektronen im E-Feld eines Plattenkondensators umgesetzt. Zum einen ein mathematisch-theoretischer Weg, zum anderen ein induktiv-experimenteller Weg. In einer Vergleichsstudie mit 80 Schülerinnen und Schülern wurden die beiden Lernwege gegenübergestellt. Dabei wurden u.a. der Erfolg beim Hypothesenprüfen, die Interaktionen mit dem Experiment und der Erfolg beim Generieren der mathematischen Beschreibung aufgezeichnet. Erste Zwischenergebnisse liegen vor: Es zeigte sich, dass die Experimentiermöglichkeiten intensiv genutzt wurden. Weiter wurde im Post-Test deutlich, dass der mathematisch-theoretische Weg zu vertieftem Wissen über die wirkenden Kräfte führt und den Nutzern die Methode des Eliminierens der Zeitabhängigkeit näher bringt. Beim Memorieren der Bahngleichung führten beide Wege zu einem ähnlich guten Ergebnis.

1. Einleitung

Das Experiment ist integraler Bestandteil des heutigen Physikunterrichts. Knapp zwei Drittel der Unterrichtszeit weisen einen Bezug zu diesem auf [1]. Die Funktionen, die die Experimente dabei erfüllen können, sind vielfältig und reichen von der Visualisierung von Phänomenen über die Motivieren und das Interesse wecken bis hin zum quantitativen Prüfen von Gesetzen [2]. Ebenso breit gefächert sind die Ziele, die Lehrende mit dem Einsatz von Experimenten verfolgen. Welzel et al. [3] unterscheiden dabei fünf Hauptkategorien: Verbindung von Theorie und Praxis, Erwerb experimenteller Fähigkeiten, Kennenlernen von Methoden wissenschaftlichen Denkens, Motivation der Lernenden und Überprüfung von Wissen. Diese Zielsetzungen können nicht nur auf klassische Demonstrations- oder Schülerexperimente angewendet werden, sondern lassen sich auch auf computergestützte Experimente übertragen.

Welches Ziel bei einem digitalen Experiment im Vordergrund steht, liegt allerdings nicht mehr allein in der Hand der Lehrerin oder des Lehrers, sondern kann auch vom Entwickler des Experimentes mitbestimmt werden. Ein Beispiel für ein solches Experiment, bei dem der Erwerb experimenteller Fähigkeiten und das Kennenlernen von wissenschaftlichem Denken im Zentrum stehen, bietet das virtuelle Labor zur [Messung des spezifischen Widerstandes](#) der

Uni Bayreuth. Die Simulationen des PhET-Projektes, wie beispielsweise der [Energieskatpark](#), stellen hingegen meist die Verbindung von Theorie und Praxis bzw. die Motivation der Lernenden in den Vordergrund, auch wenn sie durch ihre offene Gestaltungsart auch für andere Ziele angepasst und in den Unterricht eingebunden werden können. Auf dem Weg zu dem intendierten Wissens- und Fähigkeitenzuwachs bieten computergestützte Experimente verschiedene Unterstützungs- und Hilfsmöglichkeiten (siehe Kapitel 2). Zusätzlich können durch die Lehrkräfte natürlich auch Hilfen wie bei der Arbeit mit klassischen Experimenten angeboten werden.

Bei Realexperimenten werden die intendierten Lernziele von den Schülerinnen und Schülern nicht immer erreicht [4], [5]. Daher ist dies bei computergestützten Experimenten ebenfalls kritisch zu überprüfen. Es muss also detailliert untersucht werden, welche Fähigkeiten und welches Wissen Schülerinnen und Schüler bei der Nutzung eines solchen Experimentes am Computer erwerben bzw. trainieren.

2. Möglichkeiten bei der Ausgestaltung von computerbasierten Experimenten

Die Einbettung eines Experimentes und das Herstellen von Bezügen zu bekannten Inhalten ist ein wichtiges Merkmal für den lernförderlichen Einsatz von Experimenten [6]. Eine solche Einbettung und Verknüpfung ist bei digitalen Experimenten ebenfalls

notwendig. Allerdings kann diese Aufgabe für die Lehrkräfte dadurch erleichtert werden, dass das computergestützte Experiment selbst seine Ziele klar kenntlich macht, das es Bezüge zu bereits bekannten Inhalten deutlich hervorhebt, das es Rückmeldung über den Lernfortschritt liefert und eine abschließende Zusammenfassung anbietet.

2.1. Scaffolding-Elemente

Aus Sicht der Lernenden können ausführlich ausgestaltete, digitale Lernumgebungen die Bewältigung von Schwierigkeiten im Experimentierprozess durch geeignete Hilfen unterstützen. Dieses Scaffolding ist dabei nicht auf fachlich-inhaltliche Hilfen beschränkt. Es können ebenso Hilfen zum Experimentierprozess selbst bzw. zum naturwissenschaftlichen Arbeiten angeboten werden [7]. Auch Elemente zur Anregung von Reflexionsprozessen und Metakognitionen können die Nutzer unterstützen, das Ziel und den Weg dorthin immer im Auge zu behalten und ihr Vorgehen zu evaluieren [8]. Ebenso können Anregungen zur Verknüpfung der Inhalte mit anderen Themen angeboten und auf diesem Wege die Lernleistungen verbessert werden [9].

Zwar können all diese Hilfestellungen auch in klassischen Experimentiersequenzen durch die Lehrkräfte dargeboten werden, allerdings nur in stark verallgemeinerter Form, d.h. für alle Schülerinnen und Schüler in gleicher Art und Weise. In der computergestützten Lernumgebung ist eine hochgradige Individualisierung der Scaffolding-Elemente möglich, wie es für einen inklusiven Unterricht notwendig ist. Inhaltlichen Hilfen können bspw. automatisiert dem aktuellen Lerngegenstand angepasst werden und experimentelle Unterstützung kann dann angezeigt werden, wenn die Lernumgebung Fehler im naturwissenschaftlichen Arbeitsprozess feststellt.

2.2. Visualisierungen

Weiter können mithilfe des Computers Sachverhalte in der Regel sehr gut und anschaulich visualisiert werden. Dies ist besonders dann von Vorteil, wenn wichtige Elemente im klassischen Experiment nur schwer wahrnehmbar sind. So sind beispielsweise elektrische Felder nicht ohne Weiteres sichtbar und können nur mit großem Zeitaufwand korrekt vermessen werden. Am Computer können sie jedoch relativ einfach visualisiert und modellhaft dargestellt werden. Ebenso ist es möglich verschiedene Darstellungsformen und – typen gleichzeitig nebeneinander oder integriert auf dem Bildschirm anzuzeigen. Solche multiplen Repräsentationen können die kognitive Flexibilität fördern [10]. Es besteht jedoch auch die Gefahr einer kognitiven Überlastung und eines redundanten Informationsangebots [11].

2.3. Feedback und implizite Instrumente

Feedback ist eine weitere zentrale Möglichkeit Einfluss auf den Lernprozess und Lernerfolg zu nehmen [12]. Dabei bietet der Einsatz des Computers wiederum die Möglichkeit einer individualisierten Rückmeldung. Diese ist dann besonders wirksam und

lernfördernd, wenn Nutzer sie direkt im Lernprozess und nicht verzögert erhalten [13].

Neben diesen eher expliziten Instrumenten bieten sich dem Entwickler bei der Gestaltung digitaler Experimente noch eine Reihe mehr impliziter Einflussmöglichkeiten. So bestimmt er zunächst die Lernziele, die die Nutzer mithilfe seines Programms erreichen sollen. Darauf basierend kann dann beispielsweise der Ablauf der einzelnen Teilschritte festgelegt und für jeden Schritt entschieden werden, welche Variablen die Nutzer verändern oder beeinflussen können und welche vorgegeben oder festgehalten werden (vgl. [14]). Ebenso wirken sich gestellte Aufgaben und vorgegebene Strukturierungshilfen, wie bspw. Tabellen, auf den Ablauf des Lernens mit dem Experiment aus, ohne dass diese bei der eigentlichen Nutzung des Programms explizit thematisiert werden.

3. Umsetzung konkreter Lernwege am Beispiel der Lernumgebung

Die Bewegung und Ablenkung von Elektronen im elektrischen Feld ist ein Standardthema in der gymnasialen Oberstufe und bietet darüber hinaus eine besonders enge Verknüpfung von mathematischer Theorie und experimenteller Beobachtung. Auch ist im Unterricht zu diesem Thema aufgrund der notwendigen Gerätschaften die Durchführung von Schülerexperimenten kaum möglich. Daher haben wir u.a. zu diesem Thema eine interaktive Lernumgebung für den Browser entwickelt. Diese soll es den Schülerinnen und Schülern ermöglichen, sich dieses Thema weitgehend selbstständig zu erarbeiten und am Computer eigenständig Experimente zur Ablenkung der Elektronen im Querfeld durchzuführen. Mithilfe dieser Experimente kann auch die mathematische Beschreibung der Elektronenbahn entwickelt und überprüft werden. Um den unterschiedlichen Herangehensweisen und Zielsetzungen, die bei der Behandlung dieses Themas denkbar sind, Rechnung zu tragen, wurden nun zunächst zwei Lernwege exemplarisch ausgearbeitet. Dabei unterschieden sich die intendierten Lernziele deutlich voneinander. Im Folgenden wird zunächst kurz der vorwissensreaktivierende Einstieg beschrieben, der für beide Lernwege in der in Abschnitt 4 beschriebenen Studie identisch durchgeführt wurde. Anschließend werden die beiden Lernwege in ihrer Unterschiedlichkeit dargelegt.

3.1. An Vorwissen anknüpfender Einstieg

Um in der Elektrostatik erlerntes Wissen zu reaktivieren, wurde als Einstieg das Demonstrationsexperiment des geladenen Graphitballs im Plattenkondensator gewählt. An diesem Beispiel wurden die wirkenden Kräfte des elektrischen Feldes wiederholt und die Formel für die Geschwindigkeit von Elektronen beim Auftreffen auf eine Kondensatorplatte abgeleitet. Alle folgenden Tätigkeiten wurden in Einzelarbeit am Computer durchgeführt. Hierbei

wurden zunächst der Aufbau und die Funktion einer Elektronenkanone thematisiert (vgl. Abb.1).

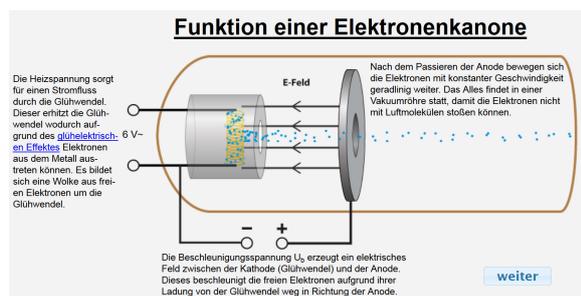


Abb.1: Visualisierung und Beschreibung der Vorgänge in einer Elektronenkanone

Anschließend wurde mithilfe von Realbildern, Schemazeichnungen und einer Animation der Versuchsaufbau der Elektronenstrahlableitkröhre erläutert. Auf Basis dieses Wissens sollten die Nutzer nun Hypothesen über den Einfluss der Beschleunigungs- und der Kondensatorspannung auf die Ablenkung der Elektronen im Querfeld aus je drei vorgegebenen Vorschlägen auswählen. Im nächsten Schritt mussten diese mithilfe des Experimentes überprüft und beurteilt werden (vgl. Abb.2).

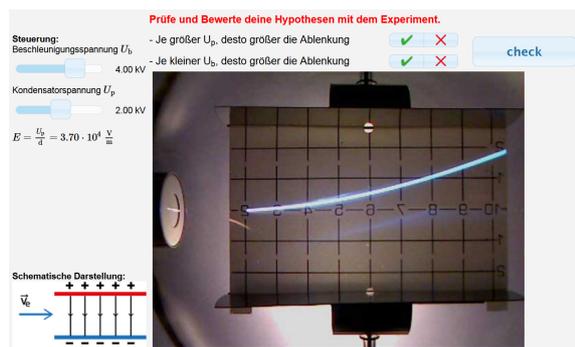


Abb.2: Das Experiment zur Prüfung der ausgewählten Hypothesen in der Lernumgebung

Ziel dieses Einstiegs in das Thema war es, ein grundlegendes Verständnis für die Vorgänge in einer Elektronenablenkröhre zu schaffen und ein erstes qualitatives Verständnis für den Einfluss der beiden zentralen Parameter auf die Flugbahn zu schaffen. Auf diesem aufbauend sollte in den folgenden Abschnitten eine quantitative Beschreibung der Elektronenbahn gewonnen werden.

3.2. Der mathematisch-theoretische Weg

Dabei standen im Zentrum des ersten Lernweges die physikalischen Kräfte, die auf die Elektronen bei ihrer Bewegung durch den Plattenkondensator wirken. So musste zunächst beantwortet werden, welche Kräfte in x- bzw. in y-Richtung auf die Elektronen beim Durchfliegen des Plattenkondensators wirken. Aus den sich hieraus ergebenden Bewegungsgleichungen sollte nun die mathematische Beschreibung der Elektronenbahn schrittweise hergeleitet werden. Dabei war das Einsetzungsverfahren mehrfach anzuwenden. Die Ergebnisse der Teilschritte mussten immer wieder in die Lernumgebung

eingetragen und mit ihrer Hilfe auf Korrektheit überprüft werden. Als Feedback für den Erfolg diente hier der Plot der eingegebenen Funktion über dem Bild des Realexperimentes (vgl. Abb.3).

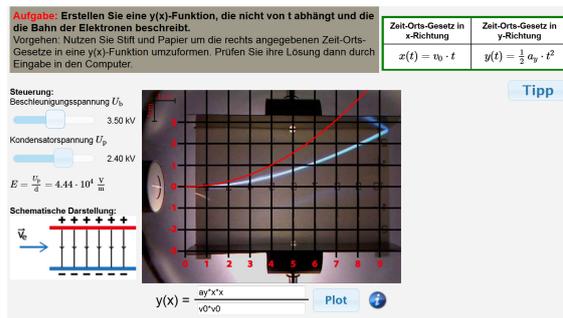


Abb.3: Oberfläche zur Überprüfung der Formel für die Elektronenbahn aus den Bewegungsgleichungen

In dieser mathematisch-theoretischen Herangehensweise wurde das Experiment vornehmlich dazu genutzt, aufgestellte mathematische Theorien zu überprüfen und zu bestätigen. Die Schülerinnen und Schüler sollten anschließend insbesondere die auf die Elektronen wirkenden Kräfte nennen und das Einsetzungsverfahren bei der Formelentwicklung anwenden können.

3.3. Der induktiv-experimentelle Weg

Der zweite Lernweg fokussierte auf das Experiment selbst und auf die Möglichkeit hieraus Erkenntnisse zu gewinnen. So musste zunächst mithilfe des Experimentes und ausgehend von der qualitativen jedesto Beziehung aus dem Einstieg die Proportionalität zwischen Spannung am Plattenkondensator und Ablenkung der Elektronen quantitativ nachgewiesen werden. Um diesen Prozess zu unterstützen, gab die Lernumgebung eine ausfüllbare Messwerttabelle vor (vgl. Abb.4).

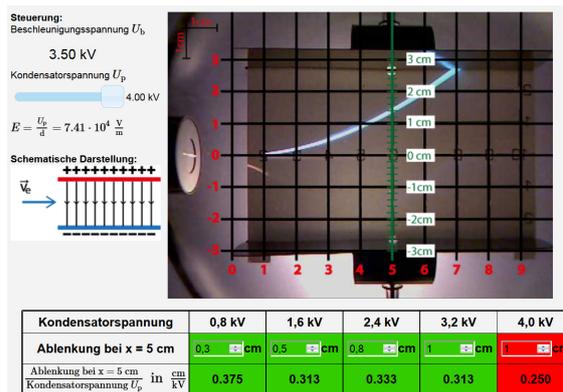


Abb.4 Ausfüllbare Tabelle zum Nachweis des proportionalen Zusammenhangs mit farbigem Feedback

Nach einer Kurzinformation über den Einfluss des Plattenabstandes auf die Ablenkung musste analog die Antiproportionalität zwischen Beschleunigungsspannung und Ablenkung nachgewiesen werden. Mithilfe dieses Wissens und angeleitet durch auswählbare Formelbausteine mussten die Nutzer nun eine korrekte mathematische Beschreibung der

Elektronenbahn entwickeln. Auch hier diente ein Computerplot der zusammengesetzten Funktion über dem Bild des Realexperimentes als grafisches Feedback.

Im induktiv-experimentellen Lernweg wurde das Experiment maßgeblich als Informationsquelle genutzt. Das Messen und Nachweisen von Proportionalität stand im Fokus. So sollten die Nutzer anschließend besonders gut Aussagen über den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Flugbahn treffen und Verhältnisse mithilfe von Messwerten nachweisen können.

4. Studiendesign

Um die Auswirkungen der beiden Lernwege auf den Wissenserwerb der Nutzer zu prüfen, wurde eine Einzelstudie unter Laborbedingungen durchgeführt. Teilgenommen haben hieran 80 Schülerinnen und Schüler von vier bayerischen Gymnasien aus München und Rosenheim. Jeweils die Hälfte einer Klasse wurde dabei zufällig dem induktiv-experimentellem bzw. dem mathematisch-theoretischen Weg zugewiesen. Beide Gruppen bekamen zur Vorwissensaktivierung zunächst das Demonstrationsexperiment der Graphitkugel im Plattenkondensator präsentiert. Anschließend wurde jedem Probanden ein Laptop zugewiesen. Hier mussten in definierten Zeitfenstern zunächst acht Fragen aus dem FCI [15] zu überlagerten Bewegungen und anschließend vier Fragen über die Konfiguration des E-Feldes im Plattenkondensator beantwortet werden (Multiple-Choice). Es folgten 25 Minuten Arbeit mit der Lernumgebung, wobei jeweils zunächst Hypothesen ausgewählt und geprüft werden mussten und anschließend der jeweilige Weg zur Formel der Elektronenbahn besprochen werden musste. Alle Interaktionen der Schülerinnen und Schüler wurden in einer Datenbank aufgezeichnet und können so genau nachvollzogen werden. Abschließend fand ein 25-minütiger Paper-and-Pencil Test statt, in dem verschiedene Wissensbereiche geprüft wurden. So mussten die Probanden bspw. zeichnerisch und sprachlich angeben, wie sich die Halbierung der Beschleunigungsspannung auf die Bahn der Elektronen auswirkt. Ebenso enthielt der Test Items zum Nachweis von Proportionalitäten, zum Einsetzungsverfahren, zu den wirkenden Kräften und zur allgemeinen Memorierung von Versuchsaufbau und Formel. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit SPSS 22.

5. Ergebnisse

Hinsichtlich der Punkteverteilung im vorgeschalteten Pre-Test zeigte sich wie erwartet kein signifikanter Unterschied zwischen den Nutzern des mathematisch-theoretischen und des induktiv-experimentellen Weges. Dies gilt sowohl bezüglich der Fragen zu überlagerten Bewegungen, als auch zu den Fragen über die Konfiguration des E-Feld im Plattenkondensator. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Verteilung auf die beiden Treatments relativ

leistungshomogen erfolgte. Ebenfalls zeigten sich keine Unterschiede beim Erfolg im Hypothesenprüfen. Bezüglich des Einflusses der Kondensatorspannung auf die Ablenkung lag die Erfolgsquote bei 95 %, bezüglich des Einfluss der Beschleunigungsspannung hingegen nur bei 80 %.

Bei der Nutzung des Experimentes in der Lernumgebung verhielten sich beide Gruppen ebenfalls sehr ähnlich. Die Anzahl der Experimentiertätigkeiten, also der Parametervariationen unterschied sich nicht signifikant. Allerdings waren hier starke interpersonelle Unterschiede zu finden. Bis zum Abschluss der Hypothesenwertung wurden zwischen 1 und 109 Parametervariationen vorgenommen. Der Mittelwert lag bei 23,4 Variationen.

Die weitere Analyse der aufgenommenen Interaktionsdaten mit der Lernumgebung zeigte, dass Schülerinnen und Schüler im mathematisch-theoretischen Weg relativ viele Hilfen beim Anwenden des Einsetzungsverfahrens benötigten. Ebenso waren oft mehrere Formeleingaben nötig, bis die richtige Lösung erreicht wurde. Nutzer des induktiv-experimentellen Weges hatten nur wenig Probleme beim Nachweis der Proportionalitäten. Allerdings benötigten sie bei der Auswahl geeigneter Formelbausteine ebenfalls mehrere Versuche.

Im Post-Test zeigten Nutzer des mathematisch-theoretischen Weges bezüglich Fragen über die auf die Elektronen wirkenden Kräfte signifikant bessere Leistungen wie Schülerinnen und Schüler des experimentell-induktiven Weges. Ebenso erzielten sie bei Items zum Einsetzungsverfahren signifikant höhere Punktzahlen. Keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen zeigten sich hinsichtlich Items zur Auswirkung von Parameteränderungen auf die Elektronenbahn. Dies gilt sowohl für Items, die sprachlich-deskriptiv also auf für Items, die graphisch gelöst werden mussten. Bei den Items zum Nachweis von Proportionalitäten mithilfe vorgegebener Wertetabellen ließen sich ebenfalls keine signifikanten Intergruppenunterschiede feststellen.

6. Reichweite der Lernumgebung

Neben dem Einsatz von entsprechend angepassten Versionen der Lernumgebung in Lehr-Lern-Studien, steht eine [ausführliche Variante](#), die auch die Ablenkung im magnetischen Feld und diverse Übungen umfasst, frei zur Verfügung. Die Nutzung der Lernumgebung wird dabei mithilfe der Tools Piwik und Google-Analytics erfasst. Ziel dieses Logging ist es, nachvollziehen zu können, wie groß die Reichweite eines solchen digitalen Experimentes sein kann und wie die Nutzer genau mit den Webseiten interagieren. Konkret soll so etwa identifiziert werden, welche Teile der Umgebung vornehmlich im Unterricht eingesetzt werden und welche Teile Schülerinnen und Schüler von zu Hause aus aufrufen. Ebenso liefern die Werkzeuge Daten über die verwendeten Endgeräte zum Seitenabruf. Auf dieser Basis können

Entscheidungen für die Entwicklung zukünftiger digitaler Experimente getroffen werden.

In den sechs Monaten zwischen Oktober 2014 und Februar 2015 wurden so bei 8200 Sitzungen knapp 65.000 Seitenaufrufe gezählt (Bots, Referrer-Spam usw. mithilfe diverser Filter ausgeschlossen). Wie Abb.5 zeigt, sind dabei an Spitzentagen unter der Woche mehr als 100 Sitzungen zu verzeichnen. Die geringsten Abrufzahlen zeigten sich an Samstagen und während den Weihnachtsferien.

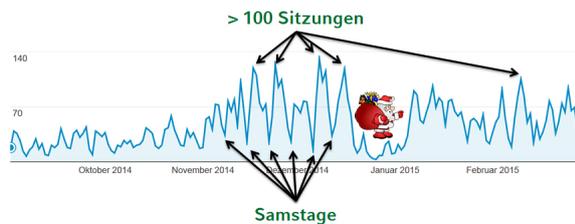


Abb.5 Übersicht der täglichen Sitzungszahlen vom 1. September 2014 bis zum 28. Februar 2015

Die Absprungrate, also der Anteil der Nutzer, die die Lernumgebung nach nur einem Seitenaufruf wieder verlassen hat, lag bei 38,9%. Die durchschnittliche Sitzungsdauer der restlichen Nutzer betrug etwa 8min 30s, wobei im Schnitt knapp acht Seiten aufgerufen wurden. Etwas über 90% der Zugriffe erfolgte dabei aus Deutschland. Drei Viertel der Besuche wurden von einem klassischen PC oder Laptop aus durchgeführt, ein Viertel von mobilen Endgeräten oder Tablets.

7. Diskussion

Die in Abschnitt 5 vorgestellten Ergebnisse der Vergleichsstudie der verschiedenen Lernwege zeigen, dass, auch wenn die Interaktionshäufigkeit zwischen einzelnen Nutzern stark schwankt, das computerunterstützte Experiment von den Schülerinnen und Schülern angenommen und genutzt wird. Dies wird unterstützt von den nicht unerheblichen Zugriffszahlen auf die freie Version der Lernumgebung. Ebenso bestätigt die mit 8min 30s relativ lange durchschnittliche Sitzungsdauer die Annahme, dass Schülerinnen und Schüler das Experiment selbstständig und ohne zusätzliche Einführung nutzen können.

Die Erfolgsrate beim Prüfen von selbst ausgewählten Hypothesen ist nur hinsichtlich des Einflusses der Ablenkspannung zufriedenstellend. Der Einfluss der Beschleunigungsspannung scheint für die Lerner weniger verständlich zu sein. Ein Grund hierfür ist möglicherweise die räumliche Trennung von Elektronenkanone und Querfeld und die isolierte Betrachtung der Vorgänge: die Elektronenkanone beschleunigt in x-Richtung, der Plattenkondensator lenkt in y-Richtung ab. Das die Geschwindigkeit in x-Richtung eine wichtige Anfangsbedingung für die Ablenkung ist, wird dabei ausgeblendet oder vernachlässigt. Dies führt zu fehlerhaften Aussagen.

Die Ergebnisse des Post-Test zeigen wie erwartet, dass Nutzer des mathematisch-theoretischen Weges ein vermehrtes Wissen über die wirkenden Kräfte besitzen und den Arbeitsprozess des Einsatzverfahrens besser beherrschen. Hier scheinen also die angestrebten Lernziele erreicht zu werden. Gleichzeitig konnten die Nutzer dieses Weges die Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Bahn der Elektronen ebenso gut vorhersagen wie Nutzer des experimentell-induktiven Weges, obwohl diese beim Nachweis der Proportionalität explizit Messwerte aufnehmen und die Auswirkungen von Änderungen dokumentieren mussten. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Nutzer diese Inhalte bereits beim Hypothesenprüfen erlernen. Eine andere besteht darin, dass die Schülerinnen und Schüler die richtigen Lösungen für diese Aufgaben aus der erlernten Gleichung für die Elektronenbahn ableiten können. Dies kann nur mit weiteren Untersuchungen aufgeklärt werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mithilfe des Computers umgesetzte Experimente eine hohe Reichweite besitzen und sowohl in der Schule als auch beim selbstständigen Lernen problemlos und ohne zeitaufwendige Einweisungen eingesetzt werden können. Jedoch muss auch hier immer kritisch im Auge behalten werden, ob die angestrebten Lernziele tatsächlich erreicht werden. Auf dem Weg dorthin bietet der Einsatz von in Lernumgebungen eingebetteten Experimenten aber in jedem Fall mit adaptiven Hilfen oder direktem Feedback vielfältige Möglichkeiten, um die Nutzer individuell zu unterstützen und zu fördern. Auch der Einsatz in Klausuren und Tests ist möglich, um ausgewählte experimentelle Kompetenzen schnell und individuell prüfen zu können.

8. Literatur

- [1] Tesch, M. (2005). Das Experiment im Physikunterricht: Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie. Studien zum Physik- und Chemielernen: Bd. 42. Berlin: Logos-Verl.
- [2] Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2015). Physikdidaktik: Theorie und Praxis (3. Aufl). Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum.
- [3] Welzel, M., Haller, K., Bandiera, M., Hammelev, D., Koumaras, P., Niedderer, H., . . . Aufschnaiter, S. von. (1998). Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden– Ergebnisse einer europäischen Umfrage. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 4(1), 29–44.
- [4] Aufschnaiter, C. von, & Riemeier, T. (2005). Experimente im naturwissenschaftlichen Unterricht. Lernchance, (47), 6–10.
- [5] Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations

- for the twenty-first century. *Science Education*, 88(1), 28–54. doi:10.1002/sce.10106
- [6] Barth, J. M. (2014). Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe -- Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien --. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 164*. Berlin: Logos Berlin.
- [7] Zhang, M., & Quintana, C. (2012). Scaffolding strategies for supporting middle school students' online inquiry processes. *Computers & Education*, 58(1), 181–196. doi:10.1016/j.compedu.2011.07.016
- [8] Zhang, J., Chen, Q., Sun, Y., & Reid, D. J. (2004). Triple scheme of learning support design for scientific discovery learning based on computer simulation: experimental research. *Journal of Computer Assisted Learning*, 20(4), 269–282.
- [9] Fund, Z. (2007). The effects of scaffolded computerized science problem-solving on achievement outcomes: a comparative study of support programs. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(5), 410–424. doi:10.1111/j.1365-2729.2007.00226.x
- [10] Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2–3), 131–152. doi:10.1016/S0360-1315(99)00029-9
- [11] Sweller, J. (2009). The Redundancy Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (pp. 159–167). Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- [12] Hattie, J., & Gan, M. (2011). Instruction based on feedback. *Handbook of research on learning and instruction*, 249–271.
- [13] Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W., & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*. doi:10.3102/0034654314564881
- [14] Podolefsky, N. S., Moore, E. B., & Perkins, K. K. (2013). Implicit scaffolding in interactive simulations: Design strategies to support multiple educational goals. Retrieved from <http://arxiv.org/pdf/1306.6544>
- [15] Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141. doi:10.1119/1.2343497