

Integrativer Einsatz realer und interaktiver digitaler Repräsentationen in der Physik

Daniel Laumann

Institut für Didaktik der Physik
Westfälische Wilhelms-Universität
Wilhelm-Klemm-Str. 10
48149 Münster

daniel.laumann@uni-muenster.de

Kurzfassung

Die Wissensvermittlung in der Physik befindet sich im Spannungsfeld zwischen der Berücksichtigung realer Experimente und Phänomene sowie dem nutzbringenden Einsatz digitaler Medien. Das Projekt *Real:Digital – die Integration zweier Welten* (nf. *Real:Digital*) untersucht das Potential der integrativen Nutzung dieser zunächst isoliert erscheinenden Repräsentationsformen. Der Beitrag beschreibt die theoretische Grundlage des Projektes und verdeutlicht das Potential anhand eines Best Practice-Beispiels. Eine grundlegende Theorie zur Nutzung multipler Repräsentationsformen stellt die *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (nf. *CTML*) dar. Diese Theorie beschreibt kognitive Lehr-Lernprozesse im Kontext multipler Repräsentationen. Aufgrund der ausschließlichen Berücksichtigung von Sprache und Visualisierungen innerhalb der aus den Bildungswissenschaften stammenden *CTML*, lässt sich jedoch kein unmittelbarer Bezug zu realen Repräsentationen als naturwissenschaftsspezifischer Medienform herstellen. Der Beitrag beschreibt diesbezüglich die Entwicklung einer Erweiterung der *CTML*. Die Anwendung der erweiterten Theorie wird dann in Form des Best Practice-Beispiels Magnetismuswaage zur Demonstration dia- und paramagnetischer sowie elektrischer Stoffeigenschaften dargestellt.

1. Einleitung

Zur Charakterisierung aktueller Lernender wird häufig der Begriff der *Digital Natives* genutzt. Die Gruppe der *Digital Natives* umfasst Personen jener Generationen, deren Alltag und Umwelt durch digitale Technologien bestimmt wird und die entsprechende digitale Elemente in multiplen Kontexten und unter Berücksichtigung verschiedenster Zielsetzungen nutzen.

Obwohl Definitionen zur spezifischen Charakterisierung von *Digital Natives* teilweise leicht unterschiedlich erscheinen, kann davon ausgegangen werden, dass aktuelle Lernende sowohl in den Schulen als auch an den Hochschulen im Sinne der meisten gängigen Definitionen als *Digital Natives* angesehen werden können [1].

Strebt man ausgehend von dieser Prämisse die Ableitung von Implikationen für die Vermittlungspraxis an, ergibt sich unmittelbar die Frage, ob *Digital Natives* digitale Technologien auch in natürlicher Weise zur Aneignung von Wissen und zum zielgerichteten Einsatz im Sinne des Lehrens und Lernens nutzen. Aktuelle Studien deuten diesbezüglich jedoch an, dass die Generation der *Digital Natives* gegenüber älteren Generationen kein andersartiges Nutzungsverhalten offenbart [2] und beispielsweise das Internet primär zur Kommunikation und Unterhaltung und nur sehr nachrangig zum Zweck der Informationssuche genutzt wird [3].

Ausgehend von diesen Befunden und unter Berücksichtigung eigener Lehrerfahrungen, erscheint es sinnvoll die Generation der *Digital Natives* nicht automatisch als *Digital Learners* zu behandeln. Vielmehr ist es notwendig aufgrund der zunehmenden Bedeutung digitaler Medien für die Lehre an Schulen und Hochschulen fachliches und methodisches Lernen in der digitalen Welt zu ermöglichen und zu organisieren, d.h. einerseits müssen Lehr-Lernmedien so gestaltet werden, dass die Aneignung und Vermittlung von Wissen gelingen kann und andererseits müssen sowohl Lernende als auch Lehrende auf Herausforderungen digitaler Technologien vorbereitet und zur planvollen Nutzung befähigt werden [4, 5].

Neben digitalen Lehr-Lernmedien bestimmen in besonderem Maße auch reale Repräsentationen in Form von Experimenten, Versuchen und Naturphänomenen die Wissensvermittlung im Fach Physik. Die Berücksichtigung realer Repräsentationen ermöglicht dabei die Auseinandersetzung mit einer fundamentalen Forschungsmethode der Naturwissenschaften [6] und wird häufig zur Vermittlung unterschiedlicher fachbezogener oder handlungsorientierter Kompetenzen genutzt. Hinsichtlich der Lernwirksamkeit weisen Studien jedoch auf die Bedeutung der Einbettung in den jeweiligen Lehr-Lernprozess [7] und damit eine angemessene Vor- und Nachbereitung experimenteller Arbeiten hin [8].

Der nachfolgende Beitrag diskutiert einen Ansatz zur integrativen Nutzung realer und interaktiver digitaler Repräsentationen, der im Projekt *Real:Digital* erarbeitet und untersucht wird. Dabei wird zunächst ausgehend von bestehenden Erkenntnissen zur Nutzung multipler Repräsentationen die theoretische Grundlage des Projektes erläutert. Unter Berücksichtigung aktueller Forschungs- und Entwicklungskonzepte in diesem Bereich sowie einer Beschreibung des Projektes *Real:Digital* soll dann am Beispiel eines spezifischen Experimentes (Magnetismuswaage) ein Beispiel zur integrativen Nutzung realer und interaktiver digitaler Repräsentationen diskutiert werden.

2. Theoretische Grundlage

Aufgrund der Berücksichtigung von sehr unterschiedlichen Repräsentationsformen im Projekt *Real:Digital*, erscheint es notwendig zunächst kurz die bisherigen Erkenntnisse zur Berücksichtigung von multiplen Repräsentationen in der Wissensvermittlung zu erläutern und das Projekt *Real:Digital* innerhalb dieser bestehenden Ansätze einzuordnen.

Weiterhin stellen digitale Lehr-Lernmedien eine bedeutsame Säule des Projektes dar. Hinsichtlich der Entwicklung entsprechender digitaler Inhalte wird in aller Regel die *CTML* sowie die darauf basierenden Gestaltungsprinzipien genutzt [9]. Zur theoretischen Fundierung von *Real:Digital* soll diese Theorie unter Berücksichtigung von realen Repräsentationen als zweiter bedeutsamer Säule des Projektes analysiert und angepasst werden.

2.1. Multiple Repräsentationen

Der Einbezug multipler Repräsentationen in die Wissensvermittlung findet sich als übergeordnetes Konzept fachdidaktischer Forschung. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts unterscheidet Peirce ikonische und symbolische Repräsentationen [10]. Dieser Ansatz wird später in den 1960er Jahren durch das *EIS-Prinzip* aufgegriffen und darin um enaktive Repräsentationen erweitert [11]. Gemäß des insbesondere in der Mathematik weit verbreiteten *EIS-Prinzips* gilt es bei der Vermittlung fachlicher Inhalte sämtliche Repräsentationsebenen zu berücksichtigen, um den Lernenden unterschiedliche und umfassende Zugänge zum Lerngegenstand zu eröffnen.

In Ergänzung zu dieser unmittelbaren Unterscheidung der Repräsentationsform des Lerngegenstandes, ergibt sich auch durch die Berücksichtigung des sensorischen Gedächtnisses ein Hinweis auf die Sinnhaftigkeit des Einbezugs multipler Repräsentationen zur Wissensvermittlung. So weist die *Dual-Coding Theory* dem Prozess der Wissensverarbeitung getrennte Kanäle, d.h. einen verbalen und einen non-verbalen Kanal, zu, innerhalb derer Informationen verarbeitet und Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis konstruiert werden, wobei ein positiver Effekt auf die Lernwirksamkeit nachgewiesen werden kann [12]. Während der verbale Kanal gespro-

chene und geschriebene Informationen umfasst und somit sowohl mit dem Hören als auch mit dem Sehen verknüpft ist, ergibt sich für den mit bildhaften Repräsentationen verbundenen non-verbalen Kanal insbesondere ein Bezug zum Sehen.

Eine Analyse bestehender Ansätze und Untersuchungen im Kontext multipler Repräsentationen in der Fachdidaktik Physik deutet an, dass hier die zuvor im Rahmen der *Dual-Coding Theory* ausgeführte Unterscheidung verbaler und non-verbaler, d.h. im Sinne der Theorie bildhafter, Repräsentationen, Berücksichtigung findet [13, 14].

2.2. Erweiterung der *Cognitive Theory of Multimedia Learning*

Die zuvor genannte Einschränkung multipler Repräsentationen findet sich auch in der *CTML* [9], die häufig als Grundlage zur Legitimation und Entwicklung digitaler Medien genutzt wird. Die *CTML* ist konsistent mit der *Dual-Coding Theory* und berücksichtigt überdies Erkenntnisse der *Cognitive Load Theory* [15]. Folgt man der *CTML*, gelten Sprache und Visualisierungen als multiple Repräsentationen, deren Informationen durch das Hören und das Sehen im sensorischen Gedächtnis aufgenommen und im Arbeitsgedächtnis durch die Ausbildung von verbalen und visuellen Repräsentationen organisiert werden, sodass durch die Integration von Vorwissen neue Konzepte ins Langzeitgedächtnis übergehen können (siehe Abb. 1).

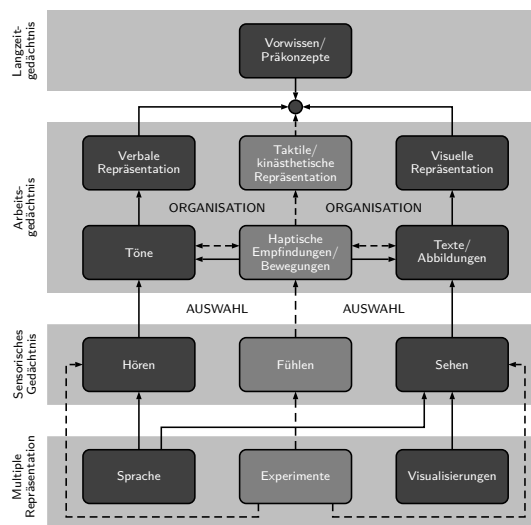


Abb.1: Darstellung der *CTML* nach Mayer [16] (dunkelgrau, außen) und naturwissenschaftsspezifische Erweiterung durch die Berücksichtigung realer Repräsentationen (grau, mittig).

Analysiert man die *CTML* jedoch unter Berücksichtigung spezifischer Merkmale der Wissensvermittlung in den Naturwissenschaften, ergeben sich zwei notwendige Erweiterungen. Einerseits werden durch die *CTML* reale Repräsentationen in Form von Experimenten, Versuchen oder Phänomenen nicht berücksichtigt. Andererseits und überdies in Zusammenhang zum erstgenannten Punkt erscheint der

Einbezug des Fühlens als weiterer Zugang zu Informationen im sensorischen Gedächtnis notwendig für eine angemessene Beschreibung von Lehr-Lernprozessen in den Naturwissenschaften. Eine Erweiterung der *CTML* unter Berücksichtigung naturwissenschaftsspezifischer Repräsentationen wird erstmals in Abb. 1 dargestellt und repräsentiert eine wichtige theoretische Grundlage des Projektes *Real:Digital*.

Die *CTML* beeinflusst die Erstellung digitaler Lehr-Lernmedien vor allem durch die aus der Theorie abgeleiteten Gestaltungsprinzipien [16]. Eines dieser Prinzipien, das Modalitätsprinzip, weist u.a. auf die Sinnhaftigkeit der simultanen Nutzung von Visualisierungen und gesprochenem Text hin. Berücksichtigt man gemäß der Erweiterung der *CTML* ein erweitertes Spektrum multipler Repräsentationen, erscheint auch die integrative Nutzung realer und digitaler Repräsentationen plausibel.

3. Forschungs- und Entwicklungskonzepte

Ausgehend von den theoretischen Hintergründen und im Anschluss an die grundsätzliche Legitimation, gilt es zunächst bestehende Forschungs- und Entwicklungskonzepte zu realen und digitalen Repräsentationen darzustellen, um im Anschluss die besonderen Merkmale des Projektes *Real:Digital* zu beschreiben.

3.1. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungskonzepte

Die Verknüpfung realer und digitaler Repräsentationen findet sich bereits aktuell in unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungskonzepten.

Als ein in Deutschland umfassend bekanntes Projekt gelten die interaktiven Bildschirmexperimente [17]. Bei dieser Medienform ergibt sich durch eine große Anzahl einzelner Fotografien oder Videoaufnahmen eines realen Experimentes eine interaktive Simulation, deren Erscheinung und Darstellung dem realen Experiment bzw. Versuchsaufbau entspricht. Weiterführende modellierende Elemente zur Auswertung oder Interpretation der interaktiven Bildschirmexperimente finden sich jedoch nur in wenigen Beispielen.

International an Hochschulen, aber auch an Schulen weit verbreitet sind zudem die PhET-Simulationen [18]. Bei diesen interaktiven Medienelementen existiert im Gegensatz zu den interaktiven Bildschirmexperimenten jeweils ein äußerst starker Modellbezug. Insbesondere modellhafte makroskopische Visualisierungen mikroskopischer Prozesse kennzeichnen viele PhET-Simulationen. Unmittelbare Bezüge zu realen und in Analogie zum digitalen Medium nutzbaren Experimenten oder Versuchen existieren jedoch nur in wenigen Fällen.

3.2. Das Projekt *Real:Digital*

Das Projekt *Real:Digital* strebt die integrative Nutzung realer und digitaler Repräsentationen an. Dabei sollen die Stärken der jeweiligen Medienformen

durch den gegenseitigen Bezug genutzt werden, um den Lernenden das „Beste aus beiden Welten“ zu offerieren.

Digitalen Medien besitzen ein scheinbar unbegrenztes Potential zur transparenten Darstellung von fachlichen Inhalten und ermöglichen die Nutzung physikalischer Modelle zur Beschreibung, Idealisierung und Vermittlung fachlicher Inhalte. Lernende nutzen reale Experimente hingegen zur unmittelbaren Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand, sodass diese Repräsentationsform sich durch die direkte Erfahrbarkeit auszeichnet und aus Sicht der Lernenden ein hohes Maß an Glaubwürdigkeit besitzt.

Insbesondere durch die gemeinsame Nutzung der beiden Medienformen können zahlreiche Aspekte fachlicher Inhalte, die erst in ihrer Gesamtheit umfassendes Wissen ergeben, zugänglich gemacht werden. So erscheint beispielsweise die Existenz von Messunsicherheiten und Abweichungen von physikalischen Modellen im Realexperiment ebenso bedeutsam für die Vermittlung von Kompetenzen im Fach Physik, wie die Ableitung von verallgemeinernden und idealisierenden Modellen im digitalen Medium.

Auf welche Art und Weise reale und digitale Repräsentationen im Sinne des Projektes *Real:Digital* genutzt werden können, soll anhand eines Best Practice-Beispiels erläutert werden.

4. *Real:Digital* – Magnetismuswaage

Das nachfolgende Beispiel aus dem Inhaltsgebiet Magnetismus ist in der beschriebenen Form als Element der Ausbildung von Physiklehrkräften an Hochschulen anzusehen und umfasst ein Realexperiment sowie eine interaktive Simulation. Die Entwicklung erfolgte im Rahmen des Projektes *Magnetismus hoch 4* [19, 20, 21]. Beide Repräsentationen dienen der Analyse magnetischer Stoffeigenschaften.

Als Fachinhalt der Magnetismuswaage ist die qualitative Demonstration und quantitative Bestimmung dia- und paramagnetischer in Ergänzung zu ferromagnetischen Stoffeigenschaften anzusehen [20, 21]. Trotz der Präsenz von ferromagnetischen Phänomenen im Alltag, offenbaren einfache Experimente, wie die Magnetismuswaage, ein vielfältigeres Spektrum magnetischer Erscheinungen. Neben der starken Anziehung von ferromagnetischen Stoffen durch Magneten, ergibt sich für paramagnetische Substanzen, wie Aluminium, eine schwache Anziehung und für diamagnetische Stoffe, wie Wasser oder Graphit, eine schwache Abstoßung.

4.1. Realexperiment

Das reale Experiment, siehe Abbildung 2, ermöglicht die Untersuchung magnetischer Stoffeigenschaften durch eine elektronische Waage und einen starken Neodymmagneten [20, 21]. Zur Durchführung der Untersuchung wird die zu analysierende Probe zunächst auf der Waage positioniert. Durch

die Annäherung eines Neodymmagneten, erzeugt dieser in der Probe eine Magnetisierung, die bei paramagnetischen Stoffen parallel und bei diamagnetischen antiparallel zur Magnetisierung des Neodymmagneten ausgerichtet ist, siehe Abbildung 2.

Für paramagnetische Stoffe ist somit eine Anziehung der Probe durch den Magneten zu beobachten, die sich als Entlastung der Waage und somit als negative Massendifferenz offenbart. Für diamagnetische Stoffe ist eine Abstoßung der Probe durch den Magneten und somit eine Belastung der Waage bzw. eine positive Massendifferenz zu beobachten.

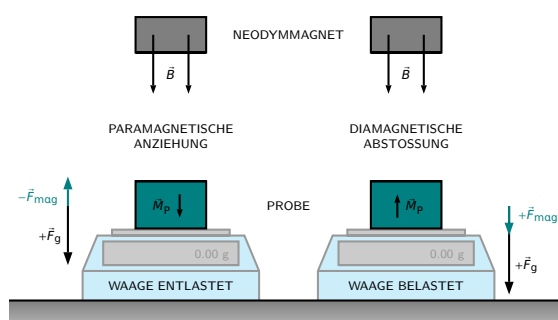


Abb.2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des Realexperimentes Magnetismuswaage [20, 21].

Die Magnetismuswaage erlaubt die Untersuchung der magnetischen Stoffeigenschaften von vielen im Alltag typischerweise als „unmagnetisch“ gekennzeichneten Stoffen, wie Aluminium, Graphit, Wasser, Salz oder auch Glas.

Bei der Durchführung des Experimentes durch Lernende offenbart sich die Wechselwirkung zwischen Magnet und Probe zunächst ausschließlich als Massendifferenz bei Annäherung des Magneten. Zur Ableitung von allgemeinen Aussagen über dia- und paramagnetische Substanzen, ist die Einführung einer Modellgröße, hier der Magnetisierung, notwendig. Die Magnetisierung beschreibt die Richtung und Größe der magnetischen Wirkung bei Existenz eines Magnetfeldes am Ort der Probe und stellt somit eine notwendige, aber für Lernende komplexe Herausforderung zur Erkenntnisgewinnung im Kontext dia- und paramagnetischer Phänomene dar.

Ein kritisches und für die Lernenden komplexes Merkmal des Experimentes ergibt sich zudem durch die temporäre Induktion elektrischer Wirbelströme bei elektrisch leitfähigen Proben. Bei diesen ergibt sich durch die Annäherung des Magneten und somit aufgrund der Magnetfeldänderung am Ort der Probe eine dynamische Magnetisierung, die nach einigen Sekunden abklingt. Für Lernende erschweren diese zusätzlichen dynamischen Massendifferenzen jedoch die Analyse und Interpretation. Sowohl die Einführung der Magnetisierung als Modellgröße als auch die Berücksichtigung makroskopischer Wirbelströme sollte aus diesem Grund in der Vor- und Nachbereitung des Experimentes Berücksichtigung finden.

4.2. Interaktive Simulation

Die interaktive Simulation, deren Benutzeroberfläche in Abbildung 3 dargestellt ist, weist zunächst dieselben Elemente, wie das Realexperiment, auf. Darüber hinaus beinhaltet die Simulation jedoch Funktionen, die über diejenigen des Realexperimentes hinausgehen und die zuvor beschriebenen Schwierigkeiten der realen Repräsentation für Lernende aufgreifen.

Die interaktive Simulation umfasst analog zum Realexperiment die Auswahl unterschiedlicher Probenmaterialien, siehe Abbildung 3(a), sowie eine zunächst rein deskriptive Analyse der Veränderung der Massendifferenz, siehe Abbildung 3(b). Die Interaktivität der Simulation ermöglicht zudem die Überprüfung von Hypothesen durch die Lernenden.

Eine über das Realexperiment hinausgehende Funktion stellt u.a. der Magnetisierungsmodus, siehe Abbildung 3(c) dar. Mit aktiviertem Magnetisierungsmodus erscheint simultan zur Durchführung des Experimentes eine Visualisierung der Magnetisierung separiert nach den jeweiligen Ursachen in Form von Pfeilen im Hintergrund des Experimentes. Die interaktive Simulation ermöglicht somit die Einführung Magnetisierung als Modellgröße für die weiterführende und verallgemeinernde Auseinandersetzung.

Eine weitere Funktion ergibt sich durch den Induktionsmodus, siehe Abbildung 3(d). In diesem werden die im Rahmen des Realexperimentes beschriebenen temporären Wirbelströme sowie die resultierenden dynamischen Magnetisierungen explizit thematisiert. Lernende äußern diesbezüglich im Kontext des Realexperimentes häufig, dass die temporäre Veränderung der Massendifferenz auf Schwankungen der Waage zurückzuführen und somit als Messartefakt zu interpretieren ist. Durch die explizite Darstellung der Ursachen der makroskopischen Wirbelströme im Magnetisierungs- und Induktionsmodus soll den Lernenden die tatsächliche Ursache nähergebracht werden.

Insgesamt fungiert die interaktive Simulation in diesem Sinne zum einen als Moderator zwischen dem realen Experiment und der weiterführenden Auseinandersetzung (Modellgröße Magnetisierung) und zum anderen als gezielte Hilfe für die Durchführung und Interpretation des realen Experimentes (dynamische Wirbelströme). Die interaktive Simulation ist unter www.magnetismushoch4.de verfügbar.

5. Ausblick und Fazit

Das Projekt *Real:Digital* strebt analog zur Struktur dieses Artikels einerseits Weiterentwicklung von Erkenntnissen zum Lernen und Lehren (Erweiterung CTML) und andererseits die Erstellung konkreter Lehr-Lernmaterialien (Magnetismuswaage) durch die Verknüpfung realer und digitaler Repräsentationen an.

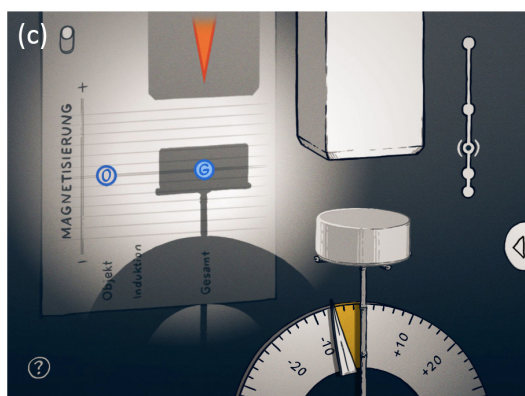
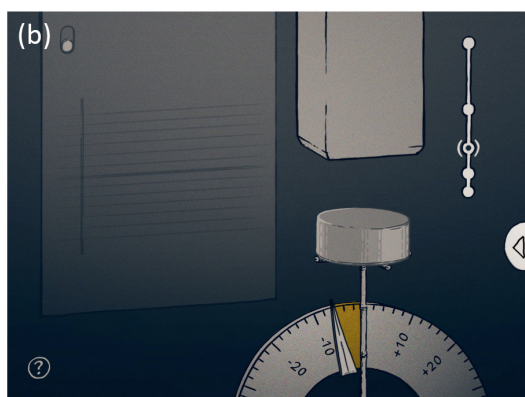
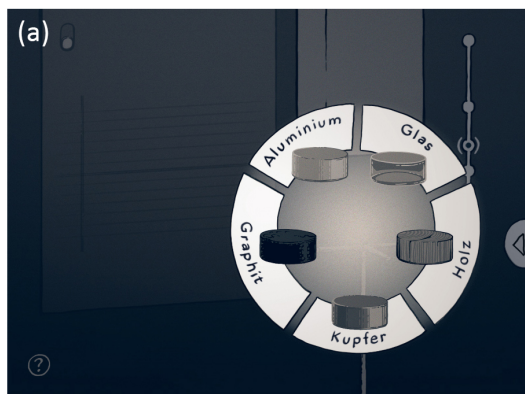


Abb.3: Darstellung der Benutzeroberfläche der interaktiven Simulation Magnetismuswaage in unterschiedlichen Betriebsmodi. Die interaktive Simulation ist unter www.magnetismushoch4.de verfügbar.

Das Projekt *Real:Digital* soll damit eine Grundlage für die Entwicklung neuartiger Medienkonzepte (adaptive Widgets, Augmented Reality Simulationen, etc.) in der naturwissenschaftlichen Lehre darstellen. Im Kontext des Projektes sollen in der Folge insbesondere auch Forschungsfragen mit Bezug zur graphischen Realisierung digitaler Medien untersucht werden. Dabei erscheint u.a. die Frage relevant, auf welche Art und Weise die Qualität der graphischen Gestaltung digitaler Medien in Ergänzung zu gestaltungstheoretischen Merkmalen die Lernwirksamkeit, Akzeptanz des Mediums oder Motivation zur Auseinandersetzung mit einem spezifischen Fachinhalt beeinflusst.

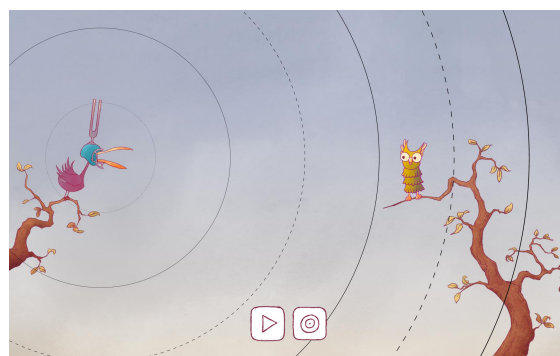


Abb.4: Darstellung der Benutzeroberfläche der interaktiven Simulation zum Doppler-Effekt.

Weiterhin wurde im Rahmen des Projektes ein exemplarisches Lehrkonzept zur Ausbildung von Physiklehrkräften entwickelt, das die integrative Nutzung realer und digitaler Repräsentationen berücksichtigt. In den zugehörigen Lehrveranstaltungen sollen die Studierenden zunächst zum planvollen Einsatz digitaler Medien in Ergänzung zu realen Experimenten befähigt werden. Dabei erscheint es von großer Bedeutung die angehenden Physiklehrkräfte hinsichtlich der gezielten Auswahl angemessener Inhalte aus bestehenden Materialien zu schulen. Darüber hinaus beinhalten die Lehrveranstaltungen auch Elemente, in denen die Lehramtsstudierenden den Umgang mit einfachen Techniken zur Erstellung digitaler Medieninhalte (Stop Motion, etc.) selbst erlernen.

Im Rahmen einer solchen Lehrveranstaltung im Wintersemester 2016/17 sowie im Sommersemester 2017 wird mit Lehramtsstudierenden der Universität Münster ein Konzept für eine interaktive Simulation zum Doppler-Effekt entwickelt, siehe Abbildung 4. Die konzeptuelle Entwicklungsarbeit erfolgt dabei ausgehend von einer Analyse bestehender digitaler Medien aus diesem Inhaltsbereich sowie einer fachlichen Auseinandersetzung. Durch die eigenständige Konzeption sollen die Studierenden zur vertieften Auseinandersetzung mit Kriterien zur Beurteilung von digitalen Medien in Ergänzung zu realen Experimenten angeregt werden. Die interaktive Simulation zum Doppler-Effekt und eine experimentelle Analyse des realen Phänomens stellen damit ein

weiteres Best Practice-Beispiel für die gemeinsame Nutzung realer und digitaler Repräsentationen dar.

6. Anmerkungen

Die Untersuchung von Forschungsfragen zum Einfluss der Qualität graphischer Gestaltung auf die Lernwirksamkeit, Akzeptanz eines Lehr-Lernmediums und die Motivation zur Auseinandersetzung mit einem spezifischen Fachinhalt erfolgt in Kooperation mit der *Deutsche Telekom Stiftung*.

Die Entwicklung des Lehrkonzepts und Durchführung der Lehrveranstaltungen sowie die Realisierung der interaktiven Simulation zum Doppler-Effekt erfolgt im Rahmen des *Kollegs Didaktik:digital* der *Joachim Herz Stiftung*.

Die Realisierung der interaktiven Simulationen Magnetismuswaage und Doppler-Effekt erfolgt durch Matthias Ries (graphisches Konzept, Animation, Illustration) sowie Stefan Denecke (Programmierung).

7. Literatur

- [1] Palfrey, J. & Gasser, U. (2008): *Born Digital: Understanding the First Generation of Digital Natives*. New York, NY: Basis Books.
- [2] Bullen, M., Morgan, T. & Qayyum, A. (2011): *Digital Learners in Higher Education: Generation is Not the Issue*. In: Canadian Journal of Learning and Technology 37, 1, 1-24.
- [3] Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest (2015): *JIM-Studie 2015*. Stuttgart: mpfs.
- [4] Hanekamp, G. (2014): *Zahlen und Fakten: Allensbach-Studie 2013 der Deutsche Telekom Stiftung*. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.): *Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht* (S. 21-28). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
- [5] Pfisterer, S. (2014): *Eine digitale Agenda für die Schule*. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.): *Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht* (S. 15-20). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
- [6] Heinicke, S. & Peters, S. (2014): *Was ist Experimentieren? – Populäre Sichtweisen unter der Lupe*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik: Experimentieren gestalten* 25, 144, 10-14.
- [7] Börlin, J. (2012): *Das Experiment als Lerngelegenheit. Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*. In H. Niederrerr, H. Fischler & E. Sumfleth (Hrsg.): *Studien zum Physik- und Chemielernen* (Bd. 132). Berlin: Logos.
- [8] Fischer, H. E., Labudde, P., Neumann, K. & Viiri, J. (2014): *Quality of Instruction in Physics – Comparing Finland, Germany and Switzerland*. Münster: Waxmann.
- [9] Mayer, R. E. (1997): *Multimedia Learning: Are We Asking the Right Questions?* In: *Educational Psychologist* 32, 1, 1-19.
- [10] Peirce, C. S. (1906): *Prolegomena to an Apology for Pragmatism*. In: *The Monist* 16, 4, 492-546.
- [11] Bruner, J. S. (1966): *Towards a Theory of Instruction*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [12] Paivio, A. (1986): *Mental Representations – A Dual Coding Approach*. New York, NY: Oxford University Press.
- [13] Meltzer, D. E. (2005): *Relation between Students' Problem-Solving Performance and Representational Format*. In: *American Journal of Physics* 73, 5, 463-478.
- [14] Kohl, P. B. & Finkelstein, N. D. (2005): *Student Representational Competence and Self-Assessment when Solving Physics Problems*. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 1, 1, 010104.
- [15] Sweller, J., Ayres, A. & Kalyuga, P. (2011): *Cognitive Load Theory*. New York, NY: Springer.
- [16] Mayer, R. E. (2001): *Multimedia Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [17] Kirstein, J., Fröhlich, A., Hoedt, S. & Nordmeier, V. (2010): *Lernen mit interaktiven Bildschirmexperimenten in virtuellen Räumen*. In: *PhyDid B – Beiträge zur Frühjahrstagung*, Hannover.
- [18] Wieman, C. E., Adams, W. K. & Perkins, K. K. (2008): *PhET: Simulations That Enhance Learning*. In: *Science* 322, 5902, 682-683.
- [19] Laumann, D. & Heusler, S. (2016): *Welche Stoffe sind „nicht“ magnetisch?* In: C. Maurer (Hrsg.): *Authentizität und Lernen – das Fach in der Fachdidaktik*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Berlin 2015 (S. 367-369). Universität Regensburg.
- [20] Laumann, D. (2017): *Is an Apple Magnetic: Magnetic Response of Everyday Materials Supporting Views About the Nature of Science*. In: *The Physics Teacher* 55, 3, 142-145.
- [21] Laumann, D. & Heusler, S. (2017): *Determining Magnetic Susceptibilities of Everyday Materials Using an Electronic Balance*. In: *American Journal of Physics* 85, 5, 327-332.