

20 Jahre Interaktive Bildschirmexperimente – Von den Anfängen bis zu ELIXIER

Jürgen Kirstein, Sebastian Haase, Tobias Mühlenbruch und Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik, Arnimallee 14, 14195 Berlin

juergen.kirstein@fu-berlin.de, sebastian.haase@fu-berlin.de,
tobias.muehlenbruch@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

Auf der Suche nach einem Medium, mit dem sich reale Experimente multimedial repräsentieren und damit didaktisch flexibler als mit dem zeitbasierten Film einsetzen ließen, wurden 1996 erstmals Beispiele Interaktiver Bildschirmexperimente (IBE) entwickelt. Erste Erprobungen fanden an der TU Berlin in der Vorlesung "Einführung in die Physik für Ingenieure" statt, wo reale Demonstrationsexperimente aus praktischen Gründen nicht möglich waren. Die vielversprechenden Ergebnisse führten in der Folge zu zahlreichen Projekten didaktischer Anwendungen in Schule und Hochschule. Zentrale Probleme dabei waren der hohe Aufwand für die Entwicklung, die Einbettung von IBE in multimediales Lernmaterial sowie deren Verbreitung. Ausgehend davon entwickelte die AG Didaktik an der FU Berlin die Web-Applikation "tet.folio", die unter anderem eine Plattform zur effizienten Herstellung und Einbettung von IBE bietet. Im aktuellen Projekt "ELIXIER" sind IBE und das tet.folio eine der Säulen für die Entwicklung einer personalisierten Mixed-Reality-Experimentierumgebung, die eine nahtlose und mobil verfügbare Fortsetzung individueller Experimentierprozesse in virtuellen Umgebungen ermöglichen wird.

1. Einleitung

Erste Ergebnisse zum didaktischen Einsatz von IBE wurden ab 1998 in Anwendungsstudien in Schule und Hochschule kontinuierlich weitergeführt [1]. Für ihre Herstellung wurde bald ein eigenes, mit digitaler Foto- und Videotechnik ausgestattetes, Labor eingerichtet und standardisierte Herstellungsverfahren entwickelt. Zentrale Probleme dabei waren der hohe Aufwand zur Entwicklung der IBE, wie auch ihre Einbettung in digitale Lernangebote und deren Verbreitung.

Ausgehend von den Ergebnissen des IBE-Projektes konnten wir ab 2010 das Konzept des „Technology Enhanced Textbook (TET)“ für Validierungsstudien demonstrieren, aus dem dann seit 2013 die Web-Applikation „tet.folio“ als neuartige Autoren- und Lernumgebung hervorging. Das Erstellen, Bearbeiten und Teilen interaktiver Inhalte ist damit durch Lehrende und Lernende selbst möglich. Integrierte Werkzeuge ermöglichen nun auch die programmierferne Herstellung, Einbettung und Verbreitung einfacher IBE als didaktisch-methodisch flexibel einsetzbare Inhalte-Bausteine auf Basis quelloffener Standards wie HTML 5, JavaScript und CSS 3. Damit wird die (mobile) Nutzung von IBE unabhängig vom Endgerät möglich. Das tet.folio wird somit zu einer Plattform für personalisierbare Lerninhalte, die den aktiven Wissenserwerb nachhaltig über den gesamten Bildungsweg – institutionsunabhängig – unterstützt.

Im Projekt „Erfahrungsbasiertes Lernen durch interaktives Experimentieren in virtuell erweiterten Realumgebungen (ELIXIER)“ sind die IBE-Technologie und das tet.folio die zentralen Säulen einer personalisierten Mixed-Reality-Lernumgebung für die Experimentierpraktika der Hochschule und für berufliche Trainingssysteme, die eine nahtlose und mobil verfügbare Fortsetzung individueller Experimentierprozesse in virtuellen Umgebungen ermöglichen soll.

2. Repräsentation physikalischer Experimente in Medien

(Interaktive) Bewegtbild-Medien werden oft in ihrer Vermittlungsfunktion betrachtet. So stellt der Lehrfilm ein Demonstrationsexperiment dar, erläutert seine Durchführung, gibt Beobachtungen wieder und präsentiert fertige Ergebnisse. Der Lernende rezipiert die durch das Medium vorgegebene Information. Betrachtet man Lernen als einen aktiven Konstruktionsvorgang von Wissen, steht die Eigenaktivität der Lernenden und die weitgehende Selbststeuerung des Lernprozesses im Mittelpunkt des Medieneinsatzes. So ist die Videoanalyse [2] ein wesentlicher Schritt hin zu einer aktiven Verarbeitung. Sie realisiert die computergestützte Orts- und Zeiterfassung bewegter Objekte und ist damit auf die Bewegungsanalyse beschränkt. Diese Grenze versucht das Konzept des „Interactive Video“ zu überwinden. Der Lernende wählt über numerische Ein-

gaben von Parameterwerten das dem jeweiligen Experimentzustand zugehörige Video aus, das dann ohne weitere Steuerungsmöglichkeiten abläuft. Dieses Konzept wurde zur interaktiven Repräsentationen von Experimenten erprobt, konnte sich aber nicht durchsetzen [3]. Beim „Non linear video“ [4] navigiert der Rezipient per Mausklick auf Objekte durch vernetzte Inhalte, nutzt multimedial aufbereitete Zusatzinformationsangebote (Bild, Text, Animation, Video) neben dem Videobild, ruft Websites auf, öffnet Kommunikationskanäle (Telefon, Chat, E-Mail) oder bezieht soziale Netzwerke ein.

Simulationen und Remotely Controlled Labs

Virtuelle Labore ermöglichen es den Lernenden, Experimente in der Simulation durchzuführen und sind daher ubiquitär verfügbar im Sinne mobilen Lernens. Simulationsexperimente besitzen aber eine eher geringe Effektivität für den Wissenserwerb im Kontext realer Sachverhalte, eine höhere bei der Veranschaulichung abstrakter Modelle [5]. Das IBE bietet weit weniger Freiheitsgrade, was aber für den Lernerfolg durchaus Vorteile bieten kann [6] und die mediendidaktische Funktion der Anschauung (d. i. den Bezug zur Realität) erfüllt. Empirische Studien zur Lernwirksamkeit Virtueller Realität (VR) zeigen, dass VR-Anwendungen mit einer erhöhten Nutzungsmotivation verbunden sind [7], aber nicht direkt zu einem signifikanten Lernzuwachs führen. Lerner profitieren jedoch stärker vom nachfolgenden Unterricht [8]. Lerneffekte für VR-Explorations- und Konstruktionswelten ließen sich nicht eindeutig nachweisen. Gründe dafür könnten unter anderem darin liegen, dass es sich bei bekannten VR-Applikationen für didaktische Anwendungen aufgrund des hohen Produktionsaufwands um relativ informationsarme Darstellungen handelt. Konzepte und technologische Realisierung didaktischer VR-Anwendungen sollten daher pädagogisch-psychologisch begleitet werden [5]. Die Lerneffektivität von virtuellen Trainingswelten zur Vermittlung von prozeduralen und handlungsbezogenen Fertigkeiten und deren Transferierbarkeit in die Realwelt wurde hingegen empirisch belegt [9]. Der Ansatz des „Remotely Controlled Laboratory“ [10] bietet ein über das Internet und ein grafisches Interface fernsteuerbares Realexperiment. Das erzeugt einen gewissen „Live-Effekt“, hat aber den zentralen Nachteil, dass jeweils nur ein Nutzer zur Zeit das Experiment durchführen kann. Ähnlich wie beim IBE sind auch hier die Freiheitsgrade im Vergleich zur Simulation deutlich reduziert.

Interaktive Bildschirmexperimente (IBE)

Seit der ersten Erprobung im Jahr 1996 hat sich das Grundkonzept der „Interaktiven Bildschirmexperimente“ (IBE) nicht wesentlich verändert: IBE repräsentieren ein reales Experiment durch Fotoserien, die mit dem Verfahren der Stopp-Trick-Animation während der Experimentdurchführung erfasst und durch Video-, Audio- und Messdaten angereichert werden. In der Tiefenstruktur des IBE existiert somit

kein mathematisches Modell als Basis für die Visualisierung. In diesem Sinne stellt das IBE keine Simulation dar. Die Herstellung und Verteilung von IBE war bisher aufwändig. Zur Herstellung kommt eine Kombination digitaler Foto- und Videotechnik zum Einsatz, ebenso wie Audio- und Messwerterfassung. Diese Daten werden manuell verarbeitet und in ein Multimediasystem integriert. Die Herstellung erfordert damit neben den didaktischen auch umfassende medientechnologische wie informatische Kompetenzen (Programmieren der Benutzeroberfläche).

Eine wesentliche Eigenschaft der IBE ist ihre Interaktivität. Die Benutzeroberfläche wird dabei so gestaltet, dass realitätsnahe Handlungen mit den Bildobjekten bei unmittelbarem Feedback möglich werden [11]. Sie folgt dem Prinzip der „direkten Manipulation“:

- „ständige Darstellung der im Kontext interessierenden Objekte,
- schnelle, inkrementelle und reversible Operationen mit sofort sichtbarem Effekt an den interessierenden Objekten,
- Ersetzung komplexer Kommandos durch direkte physische Manipulation der interessierenden Objekte.“ [12]



Abb. 1: Das IBE-Labor der AG Didaktik der Physik an der Freien Universität Berlin. Links oben ist die digitale Aufnahmekamera zu erkennen, die für das Stopp-Trick-Animationsverfahren auf einem schweren Säulenstativ fixiert ist. Der Experimentator variiert systematisch die Parameterwerte im Experiment und fotografiert den zugehörigen Zustand. Die computergesteuerte Kamera wird dabei fernausgelöst.

Diese Form der Interaktivität erzeugt beim Lernen die Illusion des unmittelbaren Umgangs mit dem abgebildeten realen Objekten im Experiment. Zwar geben IBE eine experimentelle Anordnung vor und schränken mögliche Interaktionen auf die im Realexperiment erfassten Zustände und Abläufe ein, aber diese im Vergleich zum Virtuellen Labor als Simulationsexperiment bestehende Einschränkungen sind didaktisch nutzbar, um Lernaktivitäten gezielt zu gestalten. Beispiele sind Experimente, die in der

Realität aus praktischen Gründen in der Breite kaum durchführbar sind [13], interaktive Skripte zur Vorbereitung von Praktikumsversuchen [14, 15] oder Lernumgebungen mit IBE [16, 17].

Internationale Verbreitung haben IBE unter der Bezeichnung "Interactive Screen Experiment (ISE)" gefunden [18]. Aktuelle Entwicklungen zielen beispielsweise auf immersive 3D-Darstellungen [19], die zwar fotorealistische Darstellungen bieten, sich aber vom IBE-Ansatz der fotografischen Dokumentation realer Experimente deutlich entfernen.

3. Lehren und Lernen mit IBE

Erste Erprobungen in der Lehre

Erste Untersuchungen zum Einsatz von IBE fanden bereits 1997 an der Technischen Universität Berlin im Rahmen der Vorlesung "Einführung in die Physik für Ingenieure" statt (vgl. Abb. 2).

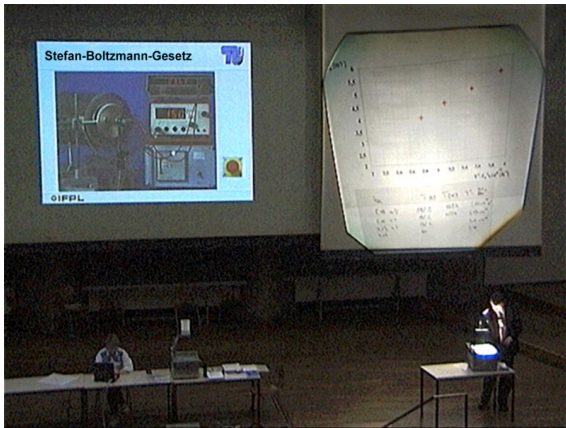


Abb. 2: Erste Anwendung von IBE als Ersatz für Demonstrationsexperimente (1997, Audimax der TU Berlin). IBE ermöglichten dagegen die Steuerung des Experimentablaufs durch den Lehrenden selbst. Im Bild werden Messwertepaare aus dem IBE grafisch ausgewertet.

Die für Vorlesungen in der Experimentalphysik charakteristischen Demonstrationsexperimente waren hier aus praktischen Gründen nicht durchführbar. Ersatz boten 16-mm-Filme. Das IBE erlaubte hingegen die Kontrolle der Parameter und verband diese Interaktivität durch eine realitätsnahe Gestaltung der Benutzeroberfläche. Es ersetzte damit die didaktische Funktion des Demonstrationsexperiments und erweiterte gegenüber dem Film den didaktisch-methodischen Gestaltungsraum für den Dozenten erheblich. Auch ließen sich nun die Experimente aus der Vorlesung in anderen Lehrveranstaltungen einsetzen, etwa im Rahmen von Übungsgruppen, bei der individuellen Wiederholung oder für Prüfungszwecke. IBE wurden inzwischen in verschiedenen E-Learning-Settings in Vorlesungen, Laborpraktika, und im Schulunterricht erfolgreich erprobt. Empirische Studien belegen dabei, dass mit dem IBE in vielen Situationen genauso gut, oft sogar schneller als mit dem Realexperiment gelernt wird [16, 20]. Das gilt insbesondere dann, wenn Fachwissen und weniger der Erwerb von Fertigkeiten im Mittelpunkt

des Experimentierens stehen. IBE helfen, den Bruch zwischen theoretischer Vorbereitung und praktischer Anforderung, der beispielsweise in den Laborpraktika häufig beklagt wird, zu überwinden [20].

IBE für eine familienfreundliche Universität

Im Falle einer Schwangerschaft sind Studentinnen oft gezwungen, Praktika bis zum Ende der Stillzeit zu unterbrechen. Experimente in Laborfächern, bei denen häufig auch mit toxischen Präparaten hantiert wird, stellen dann ein grundsätzliches Tabu dar. IBE ermöglichen es, ohne toxische Belastungen und zeitlich flexibel, reale Experimente vom Heimarbeitsplatz aus virtuell nachvollziehbar zu machen. In Kooperation mit Lehrenden aus den Fachgebieten Chemie, Biologie, Veterinärmedizin und Physik wurden IBE problematischer Experimente erstellt, die über das Learning Management System der Freien Universität Berlin zu folgenden Themen jederzeit und überall verfügbar sind. Ein erster Schritt zur Flexibilisierung der Praktika [22].



Abb. 3: Dieses IBE ermöglicht ohne jede Gefahr die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Druck und Temperatur einer toxischen Flüssigkeit. Die Geräte des Aufbaus lassen sich über realitätsbezogene Gesten bedienen, alle relevanten Vorgänge multimodal wahrnehmen und Messwerte in Echtzeit ablesen.

Experimentieren im und mit dem Lehrbuch

Ausgehend von den didaktisch-technologischen Ergebnissen des IBE-Projektes entwickelte die AG Didaktik der Physik an der Freien Universität Berlin ab 2010 das Konzept des "Technology Enhanced Textbook" (TET), aus dem die Web-Applikation "tet.folio" als Autoren- und Lernumgebung zur Herstellung und Nutzung digitaler Lernmaterialien (Buch, Script, E-Portfolio) weiterentwickelt wurde [23]. Für die technische Realisierung wurden ausschließlich quelloffene Standards wie HTML 5, JavaScript und CSS 3 eingesetzt. Das erlaubt nun auch die (mobile) Nutzung von IBE unabhängig vom Endgerät. Das Erstellen, Bearbeiten und Teilen interaktiver Inhalte wird auch durch die Lernenden mit den integrierten Werkzeugen ("tet.tools") selbst möglich. Damit wird das tet.folio zu einer Plattform zur Gestaltung personalisierter Lerninhalte, die aktives Lernen nachhaltig unterstützt. So bietet das tet.folio unter anderem Tools zur programmierfernen

Herstellung, Einbettung und Verbreitung von IBE als flexibel einsetzbare Inhaltsbausteine.

Die Lernwirksamkeit eines IBE hängt vom didaktischen Kontext ab. Im Projekt „Technology Supported Labs (TSL)“ werden dazu verschiedene multimediale Elemente eingesetzt. Das erfordert eine Lösung, die es ermöglicht, Medienelemente flexibel einzusetzen und gemeinsam darzustellen. Eine Oberflächenstruktur dafür sollte gleichzeitig Informations- und Interaktionsfunktionen besitzen und idealerweise Multicodierung, Multimodalität und Interaktivität zulassen [24]. Um dies zu gewährleisten, greift das Projekt TSL auf die tet.folio-Technologie zurück. Damit wird es möglich, verschiedenste Medienelemente wie Bilder, Texte, Videos, Simulationen oder IBE in die Oberfläche zu integrieren. So lässt sich das IBE nicht nur als ein Bild im Lernmaterial betrachten, sondern ermöglicht genau dort auch die Interaktion mit dem Bildinhalt. Das Besondere am tet.folio ist dabei, dass zur Gestaltung der digitalen Lernangebote keinerlei Programmierung erforderlich ist. So wird die Maßnahme über die Projektlaufzeit von TSL hinaus dadurch nachhaltig nutzbar, dass die Lehrpersonen eigene Module zu ihren Versuchen gestalten können. Als zusätzliche Funktion hierzu bietet das tet.folio die Möglichkeit, die gestaltete Seite als komprimierte HTML-Seite zu exportieren und so auch offline mit allen Funktionen anzubieten.

4. Nahtloses Lernen im virtuell erweiterten Praktikum

Laborpraktika sind ein fester Bestandteil jeder praxisnahen Hochschulausbildung, da sie Hypothesen oder Verfahren überprüfbar und erfahrbar machen. Sie trainieren grundlegende praktische Fertigkeiten, die in allen naturwissenschaftlichen und technischen Fachdisziplinen essentiell sind. Wie eine Erhebung im physikalischen Praktikum für Naturwissenschaftler [14] zeigt, existieren jedoch eine Reihe von Defiziten bei Vorbereitung und Durchführung von Praktika in der heutigen Form. Im aktuellen Projekt „Erfahrungsbasiertes Lernen durch interaktives Experimentieren in erweiterten Realumgebungen (ELIXIER)“ wollen wir diesen Defiziten u. a. durch die konsequente Umsetzung moderat-konstruktivistischer Prinzipien begegnen: Das (individuell angeleitete) Experiment bleibt für die Studierenden nicht (wie heute noch) nur eine einmalige Erfahrung im Praktikum, sondern lässt sich künftig über die Präsenzphase hinaus vielfältig mit vorhandenem Wissen oder praxisnahen Kontexten vernetzen und kann so zum Erwerb von Selbstlernkompetenz beitragen. Die im individuellen Experimentierprozess erfassten Handlungs- und Messdaten werden die Gestaltung formativer Assessment-Prozesse auf Basis von teilautomatisch generierten IBE erlauben, die ein aktives Lernen mit dem Experiment fördern. So lassen sich komplexe Situationen in einen Handlungszyklus einbauen, die dem Lernenden Prob-

lem-lösungskompetenzen abverlangen und so unmittelbares Feedback über die individuelle Zielerreichung geben.

Zentrale Elemente eines durch ELIXIER virtuell erweiterten Praktikums sind:

- Handlungen des Lernenden werden während des Versuchsablaufs in der Realität direkt rückgekoppelt. Ein multimodales AR-Display lenkt die Aufmerksamkeit und blendet Anleitungen und Hilfen unmittelbar am Ort des Geschehens ein. Im digitalen Lernmaterial visualisiert das Zeigen auf einen Begriff oder ein grafisches Symbol das korrespondierende Realobjekt – und umgekehrt. Ergänzende Inhalte (Erläuterungen, Handlungsanleitungen) wie auch personalisierte E-Assessments lassen sich als Ergebnis der in das System integrierten Lernanalyse-Komponente dynamisch bereitstellen und erhalten so eine unmittelbare Relevanz im Experimentierprozess.
- Die technische Umsetzung erfolgt über eine Infrastruktur auf Basis der tet.folio-Technologie, die neben der augmentierten Präsenzumgebung auch eine vom Endgerät (PC, Laptop, Tablet, interaktives Whiteboard) unabhängige Nutzbarkeit ermöglicht. ELIXIER überwindet durch die universelle Nutzbarkeit und die in die Versuchsumgebung eingebettete Technologie typische Nutzungsbrüche der Lehrform des Laborpraktikums: zwischen verschiedenen Lernzeiten und Lernorten, realem Experiment und digitalem Lernmaterial, Versuchsgeräten und Anleitungen sowie zwischen verschiedenen Lernaufgaben und -aktivitäten.
- Während der Durchführung des Experiments erfasst das System laufend Zustandsdaten des Experiments, die Anordnung der Gerätekomponenten sowie alle Benutzerhandlungen. Das System hält von allen verfügbaren Experimentkomponenten modulare IBE-Repräsentationen bereit, aus denen sich dann erstmals individuelle IBE generieren lassen. Damit wird das Realexperiment entweder zeitbasiert oder interaktiv reproduzierbar und ermöglicht so die nahtlose Fortsetzung des Experimentierens.

5. Fazit

Das IBE lässt sich als ein Baustein in problemorientierten Lernumgebungen flexibel einsetzen. IBE erweitern damit auch den Gestaltungsraum für Lernumgebungen und übernehmen hierbei spezifische Funktionen: Sie ermöglichen es den Lernenden, Handlungen und Beobachtungen nachzuvollziehen, die praktisch bzw. im Realexperiment so nicht möglich sind, sie veranschaulichen die Funktion komplexer Experimente, Geräte und Anordnungen und sie erweitern den didaktisch-methodischen Gestaltungsspielraum. Im Gegensatz zu realen Experimenten lassen sich mit IBE Lernumgebungen gestalten, in denen es möglich ist, an vielfältigen experimentellen Anordnungen je nach individuellem Bedarf (und nicht nach praktischer Verfügbarkeit) instantan

zu lernen. Das IBE erweitert damit die Vielfalt des Lernens mit Experimenten, die nur aus praktischen Gründen und nicht etwa aus didaktisch-methodischen Erwägungen heraus nicht real verfügbar sind.

Noch stehen wir am Anfang einer langen Entwicklung. In nicht allzu ferner Zukunft werden wir vielleicht flexible Bildschirme wie Papierseiten abheften, sie vielleicht auch zu Büchern binden, die dann endlose Speicher und blitzschnelle Rechenleistung in den Buchrücken integriert haben werden. Spätestens dann, wenn wir diese Seiten umblättern, selbstverständlich mit ihren Inhalten interagieren und sie kommunizieren, wird der technologische Hintergrund vergessen sein. Daher sollten wir heute schon an Konzepten für die Inhalte dieser Seiten arbeiten und die didaktische Entwicklung für das Schulbuch der Zukunft schrittweise dem jeweils verfügbaren technologischen Stand anpassen und nicht umgekehrt nach sinnvollen didaktischen Anwendungen für die jeweils aktuelle Computertechnik suchen. Das didaktisch-technologische Konzept des TET ist ein erster Schritt in diese Richtung.

6. Literatur

- [1] Kirstein, J. (1999): Interaktive Bildschirmexperimente - Technik und Didaktik eines neuartigen Verfahrens zur multimedialen Abbildung physikalischer Experimente. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- [2] Nordmeier, V.; Schummel, N. & Schwarzthans, D. (2016): Viana – eine App zur Videoanalyse im Physikunterricht. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hg.): Didaktik der Physik - Hannover 2016. Berlin.
- [3] Zollman, D. A.; Fuller, R.G. (1994): Teaching and Learning Physics with Interactive Video. In: *Physics Today* 47 (4), 41-47.
- [4] Fraunhofer FOKUS (2010): www.fokus.fraunhofer.de/de/fokus/_pdfs/fokus_non-linear-video_de.pdf (letzter Zugriff: 7/2010)
- [5] Schwan, S., Buder, J. (2006): Virtuelle Realität und E-Learning. In: <https://www.e-teaching.org/didaktik/gestaltung/vr/vr.pdf> (letzter Zugriff 12/2016)
- [6] Roth, D. (2001): FiPS - Früheinstieg ins Physikstudium – Entwicklung, Einsatz und Organisation multimedialer Elemente im Physik-Fernstudium. Dissertation, TU Kaiserslautern.
- [7] Winn, W. & Jackson, R. (1999). Fourteen propositions about educational uses of virtual reality. *Educational Technology*, (4), 5-14.
- [8] Bowman, D., Wineman, J. & Hodges, L. (1999): The educational value of an information-rich virtual environment. *Presence*, 8 (3), 317-331.
- [9] Rose, P., Attree, E., Brooks, B., Parslow, D., Penn, P. & Ambihapahan, N. (2000). Training in virtual environments: Transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics*, 43 (4), pp. 494-511.
- [10] Gröber, S., Vetter, M., Eckert, B., Jodl, H.-J.: Remotely Controlled Laboratory (RCL). In: *Eur. J. Phys.* 28 (2007), Special issue, S127-S141
- [11] Kirstein, J., & Nordmeier, V. (2007): Multimedia representation of experiments in physics. In: *IOP, Eur. J. Phys.* 28 (2007), 115-126.
- [12] Strzebkowski, R. (1995): Realisierung von Interaktivität und multimedialen Präsentationstechniken. In: Issing, L.J.; Klimsa, P. (Hg.): *Information und Lernen mit Multimedia*. Weinheim.
- [13] Bronner, P.; Strunz, A.; Silberhorn, C.; Meyn, J.-P. (2009): Interactive Screen Experiments with Single Photons. In: *European Journal of Physics*, v30 n2 p345-353
- [14] Mühlenbruch, T.; Nordmeier, V. (2015): Optimierung naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika. In: S. Bernholt (Hrsg.): *Heterogenität und Diversität – Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Kiel: IPN, S. 414-416.
- [15] Rehfeldt, D., Gutzler, T. & Nordmeier, V. (2014): TSL: Bedarfsanalyse in Praktika - (Arbeitstitel). In: IZBF (Hrsg.): *Berlin-Brandenburgische Beiträge zur Bildungsforschung*. Berlin.
- [16] Theyßen, H. (2000). Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Logos Verlag Berlin.
- [17] Theyßen, H. (2006): Students' Attitudes Towards the Hypermedia Learning Environment "Physics for Medical Students". Verfügbar unter: http://www.eurodl.org/materials/contrib/2006/Heike_Theyssen.pdf (letzter Zugriff: 25.01.2016)
- [18] Hatherly, P. A.; Jordan, S. E. & Cayless, A. (2009). Interactive screen experiments—innovative virtual laboratories for distance learners. In: *Eur. J. Phys.*, Bd. 30, Nr. 4, S. 751– 762.
- [19] Tomandl, M.; Mieling, T.; Losert-Valiente Kroon, C.M.; Hopf, M.; Arndt, M. (2015): Simulated Interactive Research Experiments as Educational Tools for Advanced Science. Verfügbar unter: <http://www.nature.com/articles/srep14108> (letzter Zugriff: 25.01.2016)
- [20] Brell, C. (2008). Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE. Berlin: Logos.
- [21] Zastrow, M. (2001): Interaktive Experimentieranleitungen – Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Expe-

- rimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum. In: H. Niedderer, H. Fischler & E. Sumfleth (Hrsg.), Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 18, Berlin: Logos.
- [22] Neuhaus, W.; Kirstein, J.; Nordmeier, V. (2009): Interaktive Praktikumsexperimente für eine familien-freundliche Hochschule. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hg.): Didaktik der Physik - Bochum 2009. Berlin: Lehmanns Media.
- [23] Kirstein, J., Nordmeier, V. (2014): tet.folio: Physik lehren und lernen mit einem digitalen Portfolio. In: Praxis der Naturwissenschaften PHYSIK in der Schule 63 (3 / 63), S. 19–27.
- [24] Girwidz, R. (2004): Lerntheoretische Konzepte für Multimediaanwendungen zur Physik. In: PhyDid (1/3), S. 9–19. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/21/21> (letzter Zugriff: 12/2016)