

## Entwicklung von AR-Applikationen für die Elektrizitätslehre der Sekundarstufe I

Hagen Schwanke, Thomas Trefzger

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Universität Würzburg  
Hagen.schwanke@physik.uni-wuerzburg.de

### Kurzfassung

Experimente stehen im naturwissenschaftlichen Unterricht nach wie vor im Zentrum des Unterrichtsgeschehens. Durch die Weiterentwicklungen im informationstechnischen Bereich ergänzen inzwischen kostengünstige digitale Medien und Werkzeuge das Experiment im Unterricht. Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von Augmented-Reality(AR)-Applikationen. Mit deren Hilfe kann die reale Lernumgebung bzw. das Realexperiment gezielt mit computergenerierten Informationen überblendet werden. Die Sekundarstufe I bietet in der 9. Jahrgangsstufe in Bayern zum Thema der Elektrizitätslehre viele Experimente zur Anwendung einer augmentierten Lernumgebung. Dabei sollen die in diesem Projekt entwickelten Applikationen hauptsächlich die Modelle der magnetischen Felder sichtbar machen. Sie können jedoch auch zur Darstellung des „Unsichtbaren“, wie z.B. Atome, Elektronen oder Raumladungen, genutzt werden. In diesem Beitrag wird die Entwicklung unterschiedlicher Applikationen und deren Integration in Experimentierstationen vorgestellt. Mit diesen Stationen soll in einer weiteren Studie ein möglicher andersartiger Verlauf des Lernens der Thematik Magnetismus aufgedeckt werden. Bevor die Applikationen für die Pilotierung genutzt werden, werden diese mittels einer Mixed-Methods-Studie bezüglich ihrer Nutzerzufriedenheit evaluiert. Dabei kommt der quantitative System Usability Score (SUS) nach Brooke und ein qualitatives Leitfadenterview zum Einsatz.

### 1. Einleitung

Aus der aktuellen Bitkom Studie geht hervor, dass 59% der SchülerInnen als die dringlichste Problematik an ihrer Schule den fehlenden Einsatz digitaler Medien sehen. Ebenso sagen 58% der SchülerInnen, dass ihr Lehrer eher positiv digitalen Medien gegenübersteht. Sogar 93% der SchülerInnen finden, dass digitale Medien den Unterricht interessanter machen [1]. Somit gibt es auf jeden Fall Interessierte für Applikationen im schulischen Alltag. Wie wird aber eine „gute App“ entwickelt, welche praxisorientiert und gebrauchstauglich ist? Dieser Frage wird in diesem Artikel nachgegangen.

Zu Beginn steht die Auswahl der passenden Experimente: Dabei ist es von Vorteil, die technische Umsetzung bereits mit ein zu beziehen, da nicht jeder Versuch dafür geeignet ist. Ein wichtiger Punkt bei der Auswahl ist z.B. die Geschwindigkeit des Versuchsablaufs, da statische Vorgänge zum aktuellen Zeitpunkt der Technik im Allgemeinen besser erkannt werden können.

Dann folgen die Programmierung und Erstellung der Applikation. Damit diese Applikation für den Nutzer attraktiv und ansprechend wirkt, spielt die Usability hierfür eine große Rolle. Diese Benutzerfreundlichkeit wird in verschiedene Kategorien unterteilt, wie z.B. Nutzen, Intuitivität, Einprägsamkeit, Erlernbarkeit und die persönliche Einstellung [2]. Alle diese Eigenschaften, sollten im Sinne des Nutzers sein, sodass dieser die Applikation akzeptiert und nutzen wird.

Um die Usability erheben zu können, gibt es z.B. das Qualitative Usability Konzept [2]. Mit diesem standardisiertem qualitativen Leitfadenterview werden die Probanden befragt. Durch die vielen verschiedenen Kategorien und der Antworten der Probanden kann eine anschließende Anpassung der

Applikation vorgenommen werden. Wenn eine Anpassung der Applikation nicht umsetzbar ist, muss ein anderer Versuch gefunden und ausgewählt werden. Die Entwicklung einer AR-Applikation kann somit als Kreis gesehen werden.

In diesem Artikel wird ein Überblick über den kompletten Kreisprozess gegeben. Momentan befindet sich das Projekt in der Datenerhebung. Erste Ergebnisse eigens entwickelter Applikationen zeigen einen deutlichen Nutzen dieser Vorgehensweise.

### 2. Theoretische Vorüberlegung

Zur theoretischen Vorüberlegung gehört zum einem die richtige Auswahl der zur Verfügung stehenden Technik und zum anderen auch die Überlegung wie dieses digitale Medium adressatengerecht entwickelt werden kann und wie dies zu überprüfen ist.

#### 2.1. Motivation Augmented Reality

Das Experiment ist die zentrale Erkenntnisquelle der naturwissenschaftlichen Forschung und nimmt somit auch eine zentrale Rolle im Unterrichtsgeschehen ein. Experimente sollen die Schüler motivieren, gleichzeitig fachliche Inhalte vermitteln und diese bestätigen. [3] Für die Erklärung der experimentellen Versuche liegen naturwissenschaftliche Modelle zu Grunde. Durch die zur Verfügung stehende Technik Augmented Reality (kurz: AR) ergeben sich neue Möglichkeiten der Anwendung im Unterricht, da dreidimensionale ergänzende Darstellungen möglich sind. Diese Visualisierung kann animiert oder auf Grundlage von Echtdateien aus dem Experiment berechnet worden sein. Somit kann AR als Bindeglied zwischen den zur Erklärung und Vorhersage genutzten theoretischen Modellen und den

Experimenten fungieren. Die Sekundarstufe I bietet in der Elektrizitätslehre der 9. und 10. Klassen viele Experimente zur Anwendung der Augmentierung. Zur technischen Umsetzung wird ein Handheld-Device gebraucht. Tablets bringen einen größeren Bildschirm mit sich und sind so eher dafür geeignet. Da 97% der Kinder ab dem 13. Lebensjahr ein Smartphone benutzen [4] bietet ein Tablet zusätzlich eine intuitivere Handhabung als ein Computer mit Maus und Tastatur.

## 2.2. Das qualitative Usability Konzept

Über 40 Jahre wird bereits an Augmented Reality geforscht, jedoch liegen noch keine genauen Ergebnisse bezüglich AR vor. Dies liegt an der fehlenden Erfahrung, wie AR richtig evaluiert und die Applikationen erstellt werden. [5]

Bei der Entwicklung der Applikation wird eine bestimmte Nutzung der App antizipiert um dahingehend bestmöglich auf alle Eventualitäten einzugehen. Der Nutzer selbst hat jedoch eigene Vorstellungen und Annahmen (vgl. Abb.1 nach [6])

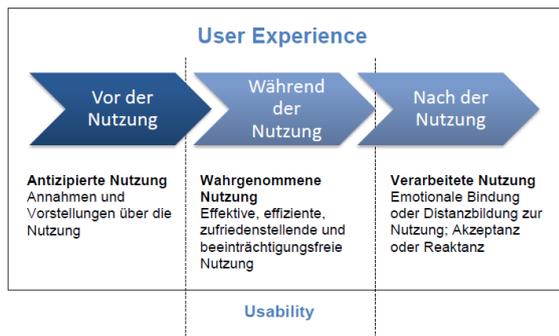


Abb.1: User Experience

Als Qualitätsmerkmal einer zuverlässigen und praxisorientierten App dient die Usability. Diese ist empirisch erhebbar, z.B. mit dem qualitativen Usability Konzept.

Das qualitative Usability Konzept kann einen absoluten Usability Wert generieren, da während des Interviews fünf Hauptkategorien mit 21 Unterkategorien durchlaufen werden. Durch positive oder negative Antworten und der unterschiedlich gewichteten Fragen kann auf den Usability Wert geschlossen werden.

Dieses Konzept bringt jedoch auch die Möglichkeit mit sich, Probleme in der App zu beheben, welche durch eine Art blinden Fleck der Entwickler entstehen. Durch das Interview werden die Fragen auf individuelle Art und Weise beantwortet, sodass die jeweiligen Probleme der Probanden klar zu identifizieren sind und so eine Differenzierung der eigentlichen Unstimmigkeit stattfindet.[2]

## 3. Experimentierstationen

In diesem Projekt wurden insgesamt 6 verschiedene Experimente zum Thema Magnetismus ausgewählt. Diese Thematik wird in Bayern in der 9. Jahrgangsstufe des Gymnasiums behandelt. Ab dem Schuljahr 2022/23 wird, wegen der Wiedereinführung des G9, der Inhalt in der 10. Klasse unterrichtet. [7]

Die Stationen und die Einbindung wurden bereits vorgestellt und können z.B. in [8] nachgelesen werden.

Dahingehend hat sich lediglich die Station 6 – Selbstinduktion verändert. Da bei dieser Station das Experiment sehr schnell abläuft und die Augmentierung rein animiert gewesen wäre, wurde ein anderes Experiment ausgewählt. Beim jetzigen Versuch „Das Weicheiseninstrument“ werden in das Innere



Abb.2: Materialien der Station 6 - Weicheiseninstrument

einer Spule zwei Eisenstäbe gelegt. Durch den anschließenden Stromfluss in der Spule wird in den Eisenstäben ein Magnetfeld erzeugt. Durch die gleiche Ausrichtung der Magnetfelder



Abb.3: Das stromdurchflossene Weicheiseninstrument

stoßen sich die zwei Eisenstäbe ab und bewegen sich an die äußeren Enden des Spuleninnenraums (vgl. Abb.3).

Die Augmentierung sieht in diesem Versuch die Darstellung der ausgerichteten Elementarmagneten innerhalb der Eisenstäbe, sowie eine Bewegung der Elektronen in der Spule selbst vor.

#### 4. Praktische Vorüberlegung

In der praktischen Vorüberlegung müssen zwei Punkte bedacht werden:

- Wie wird die Evaluation der App durchgeführt?
- Wie erfolgt die programmiertechnische Umsetzung?

Zunächst werden die einzelnen Punkte der Evaluation betrachtet. Dabei wird nach dem Modell des problemzentrierten Interviews vorgegangen. [9] Auf die Technische Umsetzung der App wird in Kapitel 5 eingegangen.

##### 4.1. Auswahl der Probanden

Die Auswahl der Probanden erfolgt durch eine freiwillige Teilnahme an der Evaluierung.

Da es um die Verbesserung der Applikation geht, werden keine bestimmten Personengruppen angesprochen.

Unter den Probanden befinden sich also Schüler\*innen, Lehrer\*innen oder auch Student\*innen. Da es um die allgemeine Tauglichkeit der App geht, sind verschiedene Personengruppen mit unterschiedlichem Vorwissen sogar erwünscht. Schüler\*innen, da diese der Zielgruppe der App entsprechen, Lehrer\*innen, welche eine pädagogische Sicht auf die Darstellungen haben, als auch Studierende, welche neue innovative Gedanken haben, sind somit alle als Probanden gerechtfertigt.

##### 4.2. Auswahl der Fragen

Der ursprüngliche Fragenkatalog von Nestler et al. umfasste 259 Fragen, welche in den fünf Hauptkategorien oder den 21 Nebenkategorien gestellt wurden. In der Arbeit von Rudolph [10] wurde dieser Katalog auf 83 Fragen reduziert. Dabei wurden die Fragen in vier verschiedene Ebenen der Wichtigkeit eingeordnet. Die Ebene 0 oder L0-Fragen wurden für so wichtig erachtet, dass diese auf jeden Fall im Fragebogen aufgenommen werden sollten. Entsprechend gibt es noch die Ebenen 1,2 und 3.

Da es in der Studie nicht um AR-Applikationen ging, sondern um Browser Anwendungen, wurde ein erneutes Rating der Fragen des verfeinerten Usability Konzepts erstellt, wobei zusätzlich aus den ursprünglichen 259 Fragen, Fragen ausgewählt wurden, welche auf AR-Applikationen angewandt werden konnten. Insgesamt wurden somit 95 Fragen durch ein Expertenrating (n=8) bewertet. Am Ende wurde eine Auswahl von 19 Fragen für die AR-Applikation getroffen.

Die Fragen mit entsprechender Kategorie sind folgende:

##### Effektivität

- Inwiefern können Sie mit der Software ihre Ziele erreichen?
- Welche Funktionalität fehlt der Software, die Sie benötigen oder gerne nutzen würden?

##### Übersichtliche Gestaltung

- Welche Teile der Software sind unübersichtlich?

##### Einfachheit

- Inwiefern gibt es Situationen, in denen die Bedienung unnötig kompliziert ist – wie denken Sie könnte es auch einfacher gehen?

##### Selbsterklärungsfähigkeit

- Wie erklären sich die einzelnen Funktionen von selbst?

##### Transparenz

- Inwiefern ist der Effekt von Aktionen transparent?

##### Erlernbarkeit

- Welche Probleme hatten Sie während der Einarbeitungsphase?
- Inwiefern kann die Software durch Ausprobieren erkundet werden?

##### Nutzerführung

- Wie nützlich sind diese Erklärungen oder Beschreibungen?

##### Attraktivität

- Inwiefern empfinden Sie die Software als hochwertig?
- Welchen Wert hat die Software für Sie?
- Inwiefern ist die Software Ihrer Meinung nach professionell?
- Inwiefern finden Sie die Software optisch ansprechend?

##### Innovativität

- Inwiefern finden Sie die Software neuartig, innovativ?

##### Zufriedenheit

- In welchem Maß sind Sie mit der Software zufrieden ?
- Was macht diese Software benutzerfreundlich?

##### Stressfreiheit

- Wie frustrierend ist der Einsatz der Software?

##### Zusätzlich aus den ursprünglichen Fragen

- Wie unterstützt die Visualisierung die Erledigung Ihrer Aufgabe?
- Inwiefern ist die dargestellte Information verständlich?

Diese Fragen wurden in einem Leitfaden in Vorbereitung auf das Interview strukturiert gegliedert.

##### 4.3. Auswahl des Ortes

Der Ort der Durchführung sollte frei von Ablenkung sein und genügend Platz für die Durchführung bieten.

In Zeiten der Covid-19 Pandemie ist die Auswahl des Ortes keine leichte Aufgabe, da der normale Publikumsverkehr vor Ort fehlt. Deshalb wurden mittels einem Flyer, welcher in den Vorlesungen

gezeigt oder per E-Mail verschickt wurde, die Probanden akquiriert. Durch diese Auswahl ist ein besonderes Maß an Flexibilität gefragt, sodass einige Probanden mit den Materialien besucht und mit anderen ein Termin direkt an der Universität Würzburg vereinbart wurde.

#### 4.4. Protokollierungstechnik

Bei der Befragung wurde das Gespräch und zusätzlich ein Screenshot des Tablet-Bildschirms aufgezeichnet, um auftretende Probleme direkt zu protokollieren. Auf Videomitschnitte wurde verzichtet, jedoch wurden Notizen während der Experimentierphase gemacht.

### 5. Technische Umsetzung

Zur technischen Umsetzung werden in diesem Abschnitt nur Eckpunkte angegeben, da eine genauere Darstellung der Vorgänge zu umfangreich wäre.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, bringt die Technologie AR noch einige Einschränkungen mit sich. Aktuell größtes Problem ist eine schnelle und stabile Erkennung der Targets, welche die Grundfläche im Raum definieren und die vorliegende Lernumgebung identifizieren. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich diese Problematik bald lösen lässt, da die Entwicklung von immer präziseren Kameraobjektiven fortschreitet und auf Basis der Software Ansätze von Objekterkennung im Raum stehen.

#### 5.1. Software

Für die Entwicklung der Applikationen werden im Wesentlichen drei verschiedene Programme genutzt: Unity3D ist eine Entwicklungsumgebung für 3D-Spiele. Die Basis bildet eine unendliche Ebene, deren Orientierung durch ein Target klar definiert wird. Auf diese Ebene können im Raum Objekte, zweidimensionaler oder dreidimensionaler Natur eingebunden werden. Mittels C#-Scripts können die Abhängigkeiten zueinander festgelegt werden. Zusätzlich übernimmt Unity die Kompilierung der App. Dabei können sowohl Android-Programmpakete (APK) als auch iOS App Store Packages (ipa) erzeugt werden.

Vuforia arbeitet dicht mit Unity zusammen. Dieses Tool analysiert das vom Tablet erhaltene Kamerabild und sucht nach den zuvor definierten Zielen oder auch Targets. Hat Vuforia dieses Target herausgefiltert, ist an dieser Stelle die Grundebene für die in Unity verwendete Orientierung gelegt. Einmal erkannt, kann nun das Tablet frei im Raum bewegt werden und die Skalierung der Ansicht passt sich der Entfernung zum Target an.

Blender wird dazu genutzt, um die Vorauswahl der 3D-Objekte in Unity zu erweitern. Mit diesem Programm ist es möglich filigranere Objekte vorher zu erstellen und diese dann direkt in Unity einbinden zu können.

Alle Programme benötigen eine Einarbeitungsphase und sind nicht ohne weiteres sofort zu bedienen.

#### 5.2. Hardware

Die genutzte Hardware ist per se erst einmal unabhängig von der Applikation an sich. Es kann jedoch vorkommen, dass ältere Geräte mit der Bewältigung der Daten teilweise überfordert sind und somit ein reibungsloser Ablauf nicht garantiert werden kann. Zum anderen muss man sich auch nach den späteren örtlichen Begebenheiten richten. Somit werden die entwickelten Apps hauptsächlich für Tablets optimiert, da durch den DigitalPakt Schule auch davon auszugehen ist, dass Klassensätze von Tablets an den Schulen häufiger anzutreffen sind. Eine Nutzung von Smartphones oder AR-Brillen, falls vorhanden, ist jedoch nicht ausgeschlossen.

#### 5.3. Beispiel

Im Folgenden wird die App Magnetfeldlinien der ersten Station vorgestellt.

Im klassischen Schulunterricht kennt man den Ver-

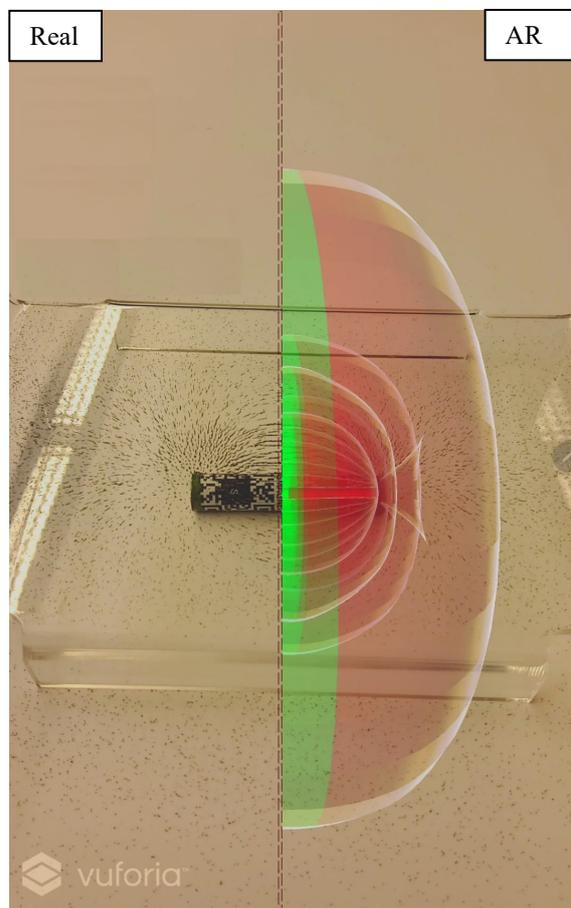


Abb.4: Augmentiertes Realexperiment

such, bei dem mit Eisenspänen auf einer Ebene oberhalb eines Magneten das magnetische Feld sichtbar wird. Diese Darstellung ist jedoch nur zweidimensional. Das magnetische Feld hingegen ist in der Realität dreidimensional und raumfüllend.

Mit AR ist es nun möglich dieses Feld digital zu augmentieren (erweitern) (vgl. Abb.4). In der Abbildung ist zu erkennen, dass unter dem Plexiglastischen ein Magnet liegt, dessen Pole mit einem Target versehen sind. Anhand dieses Targets erkennt Vufo-

ria das vorliegende Experiment und gibt diese Information der App weiter. Daraufhin wird auf Grundlage der gefundenen Ebene das 3D-Magnetfeld auf dem Tablet projiziert. Einmal erkannt ist es, wie schon erwähnt, nun möglich sich das Feld aus unterschiedlichen Richtungen anzuschauen. In der App ist es zusätzlich möglich, die 2D-Ansicht dazuschalten, sodass dem Anwender ein Vergleich zwischen dem Realexperiment auf Ebene des Tisch und dem dreidimensionalen ermöglicht wird.

## 6. Ablauf der Evaluierung

Wie schon bei den praktischen Vorüberlegungen erklärt, wird es verschiedene Orte und auch Gruppen von Probanden bei der Evaluierung geben. Das Zeitfenster jedoch beträgt bei allen ca. 45 Minuten und setzt sich ausfolgenden Abschnitten zusammen:

### Einführung:

Zu Beginn der Datenerhebung erhalten die Probanden eine Einverständniserklärung zur Aufnahme ihrer persönlichen Daten und einer Tonaufnahme des Interviews für die darauffolgende Transkription. Anschließend erhalten die Probanden einen Fragebogen zu ihrer interaktionsbezogenen Technikaffinität (Affinity for Technology Interaction (ATI) Scale)[11]. Durch die Erhebung dieser Affinität, soll in einer Auswertung die Hypothese überprüft werden, ob eine höhere Technikaffinität die Arbeit der Probanden mit den Applikationen vereinfacht oder zu schnelleren individuellen Lösungen bei Problemen führt.

Danach erhalten die Probanden ein kurzes Erklärvideo, welches den Ablauf des Experiments und dessen fachliche Hintergründe beleuchtet. Mit diesem Video sollen auch fachfremde Probanden die Möglichkeit haben sich mit der Thematik Magnetismus vertraut zu machen und ihr Wissen, falls vorhanden, zu reaktivieren. Zusätzlich soll der Fokus auf den bevorstehenden Versuch gelegt werden.

Für die Beantwortung des ATI-Scale und das Abspielen des Videos werden ca. 5 Minuten gebraucht.

### Arbeitsphase:

In der darauffolgenden Arbeitsphase bearbeiten die Probanden eine Station mit den dafür gestellten Aufgaben. Zur Beantwortung und Überprüfung ihrer Antworten werden die Probanden darauf aufmerksam gemacht die entsprechende Applikation zu nutzen. Die gestellten Aufgaben entsprechen dem Niveau der 9. Klassen, sodass in den veranschlagten 15 Minuten dieser Phase genug Zeit bleibt, dass die Probanden sich zu Beginn mit der App vertraut machen können. Dabei wird nur eingegriffen, wenn die Targets verdeckt sind und somit eine Erkennung für die Applikation unmöglich ist.

### System Usability Score:

Nach der Arbeitsphase erhalten die Probanden den quantitativen System Usability Score (SUS) von John Brooke [12]. Dieser erfasst mit 10 Items die Usability. Diese Items lassen aber keine offenen

Antworten zu. Deshalb werden in der Auswertung einzelne Items mit den Antworten der qualitativen Umfrage ins Verhältnis gesetzt, um abwägen zu können, warum sie diese Entscheidung im SUS getroffen haben. Aufgrund der kurzen Ausfülldauer werden für diesen Teil maximal 5 Minuten veranschlagt. Mit dem Ergebnis des SUS soll eine Tendenz der Benutzerfreundlichkeit festgestellt werden.

### Qualitatives Usability Konzept:

Abschließend wird das Interview durchgeführt. Mit den 19 Fragen sollen Aspekte aufgegriffen werden, welche durch den Kurztest nicht erfasst werden können. Durch die persönliche Befragung kann individuell auf die Probleme der Tester mit der App eingegangen werden. Nach Abschluss des Interviews ist die Datenerhebung abgeschlossen. Für diesen Teil werden ca. 20 Minuten eingeplant.

## 7. Erste Ergebnisse und Ausblick

Erste Befragungen wurden bereits durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Probanden meist intuitiv richtig mit der App umgehen. Berührungsängste mit dem Tablet und der App sind nicht zu sehen. Es wird eher nach dem Prinzip „Trial and Error“ vorgegangen. Dabei fällt auf, dass die Erkennung teilweise durch Spiegelungen von Zimmerlampe oder Sonnenlicht erschwert wird. Dies zeigt sich auch in den Antworten. Dabei geben die Probanden aber auch von sich aus Lösungen, wie dieses Problem verringert werden kann. Programmiertechnische oder darstellende Probleme werden auch genannt. Die programmiertechnischen Probleme beziehen sich dabei auf Abfragen innerhalb der App, welche von der logischen Reihenfolge noch umstrukturiert werden müssen. Die darstellenden Probleme ergaben sich meist durch falsche Skalierung der Ansicht, sodass Teile der Augmentierung außerhalb des Bildschirmbereichs des Tablets lagen.

Diese Probleme können aber schnell behoben werden und sind den Entwicklern bislang nicht wirklich aufgefallen, da diese genau wussten, wie sie das Tablet zu halten oder zu benutzen haben.

Insgesamt ist jedoch eine positive Resonanz auf die App zu verzeichnen, welche durch hohe Innovativität und intuitives Benutzen begründet wird. Aussagen wie, „so etwas hätte ich früher gebraucht“ oder „Ich würde sie gerne jetzt schon für meinen Unterricht benutzen“ wurden getätigt.

Auch wenn noch nicht alle Befragungen absolviert sind, lässt sich jetzt schon feststellen, dass die Bewertung der App durch zufällige Probanden für die Entwicklung pädagogisch sinnvoller Applikationen unabdingbar ist.

**8. Literaturverzeichnis**

- [1] HUBIG, Stefanie ; BERG, Achim: *Schüler-Studie zur Digitalisierung der Bildung*. URL <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Schueler-wuenschen-sich-digitale-Schulen>
- [2] NESTLER, Simon ; ARTINGER, Eva ; COSKUN, Tayfur ; YILDIRIM-KRANNIG, Yeliz ; SCHUMANN, Sandy ; MAEHLER, Mareike ; WUCHOLT, Fabian ; STROHSCHNEIDER, Stefan ; KLINKER, Gudrun: *Assessing qualitative usability in life-threatening, time-critical and unstable situations*. GMS Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie; 7(1):Doc01; ISSN 1860-9171 / GMS Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie; 7(1):Doc01; ISSN 1860-9171 (2011)
- [3] LINDLAHR, William: *Virtual-Reality-Experimente für Interaktive Tafeln und Tablets*. In: MAXTON-KÜCHENMEISTER, Jörg; MEBINGER-KOPPELT, Jenny (Hrsg.): *Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Hamburg : Joachim-Herz-Stiftung Verlag, 2014 (Naturwissenschaften), S. 90–97
- [4] BERG, Achim: *Kinder und Jugendliche in der digitalen Welt*. URL <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mit-10-Jahren-haben-die-meisten-Kinder-ein-eigenes-Smartphone>
- [5] DA SILVA, Manoela M. O. ; TEIXEIRA, João Marcelo X. N. ; CAVALCANTE, Patricia S. ; TEICHRIEB, Veronica: *Perspectives on how to evaluate augmented reality technology tools for education: a systematic review*. In: *Journal of the Brazilian Computer Society* 25 (2019), Nr. 1
- [6] SARODNICK, Florian ; BRAU, Henning: *Methoden der Usability Evaluation : Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung*. 3., unveränderte Auflage. Bern : Hogrefe, 2016
- [7] STAATSINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND BILDUNGSFORSCHUNG: *LehrplanPLUS : Fachlehrplan - Gymnasium Physik*. URL <https://www.lehrplanplus.bayern.de/schulart/gymnasium/fach/physik/inhalt/fachlehrplaene-Überprüfungsdatum 2020-11-05>
- [8] SCHWANKE, Hagen ; KREIKENBOHM, Annika ; TREFZGER, Thomas: *Augmented Reality in Schülerversuchen der E-Lehre in der Sekundarstufe I, Band 41*. In: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDPC) (Hrsg.): *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* Online, 2021, S. 641–644
- [9] MAYRING, Philipp: *Einführung in die qualitative Sozialforschung : Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. 6., überarbeitete Auflage. Weinheim, Basel : Beltz, 2016 (Pädagogik)
- [10] RUDOLPH, Carmen: *Evaluierung von Usability durch standardisierte Leitfadenterviews*. München, Technische Universität München, Fakultät für Informatik. Masterarbeit. 2011-04-18. URL <http://campar.in.tum.de/Students/MAQualitativ-eUsabilityConcept>
- [11] FRANKE, Thomas ; ATTIG, Christiane ; WESSEL, Daniel: *A Personal Resource for Technology Interaction: Development and Validation of the Affinity for Technology Interaction (ATI) Scale*. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 35 (2019), Nr. 6, S. 456–467
- [12] BROOKE, John: *SUS - A quick and dirty usability scale*. In: JORDAN, Patrick W. (Hrsg.): *Usability evaluation in industry : Based on the International Seminar Usability Evaluation in Industry that was held at Eindhoven, The Netherlands, on 14 and 15 September 1994*. London : Taylor & Francis, 1996, S. 189–194

**Förderung**

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben wird im Rahmen des Projekts „Die Zukunft des MINT-Lernens“ von der Telekom-Stiftung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.