

An Application of Virtual Reality in Vocational Education in the Context of Physical Learning Content

Qi Guo¹, Benjamin Ditton² and Bernd Zinn³

Abstract: The project "Virtual Physical Sensor Laboratory (VPSL)" focuses on the development and piloting of a virtual teaching and learning environment on the current subject "Sensors of the motor vehicle" and should support the acquisition of competences for the physical fundamentals of innovative sensors in the field of automotive engineering. In the pilot study on the basic suitability of the virtual environment, which was conducted with students (N = 145) at vocational schools, the spatial presence, the flow experience, the usability and the motivation were analyzed. Correlations between these constructs were examined and the correlation between the spatial presence and the flow experience were proven in accordance with the expectations.

Keywords: Virtual learning, vocational education, virtual physical sensor laboratory, learning motivation

¹ Universität Stuttgart, Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT), Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart, guo@ife.uni-stuttgart.de

² Universität Stuttgart, Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT), Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart, b.ditton@tfse.de

³ Universität Stuttgart, Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT), Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart, zinn@ife.uni-stuttgart.de

Eine Anwendung der Virtuellen Realität in der beruflichen Bildung im Kontext physikalischer Lerninhalte

Qi Guo⁴, Benjamin Ditton⁵ und Bernd Zinn⁶

Zusammenfassung: Das Projekt „Virtuelles physikalisches Sensorlabor (VPSL)“ fokussiert die Entwicklung und Pilotierung einer virtuellen Lehr- und Lernumgebung zur aktuellen Thematik „Sensoren des Kraftfahrzeugs“ und soll den Kompetenzerwerb zu den physikalischen Grundlagen innovativer Sensoren rund um die Fahrzeugtechnik unterstützen. In der Pilotierungsstudie zur grundsätzlichen Eignung der virtuellen Umgebung, die mit Schülerinnen und Schülern (N = 145) an berufsbildenden Schulen erfolgte, wurde das räumliche Präsenzerleben, das Flow-Erleben, die Usability und Motivation analysiert. Zusammenhänge zwischen diesen Konstrukten wurden untersucht und erwartungskonform zwischen dem räumlichen Präsenzerleben und dem Flow-Erleben nachgewiesen.

Schlüsselwörter: Virtuelles Lernen, berufliche Bildung, virtuelles physikalisches Sensorlabor, Lernmotivation

1 Einleitung

Während sich in hochschulischen und wirtschaftlichen Bereichen ein Wandel hin zu modernen technologiebasierten Methoden in der Kompetenzentwicklung abzeichnet [Zi17], hinkt der schulische Bereich im Kontext des Einsatzes innovativer Technologien (z.B. Virtual Reality, Augmented Reality, Extended Reality, Digital Twin) oftmals hinterher. Mit ein Grund dafür ist, dass auch kurzfristig verfügbare Mittel für IT-Infrastruktur nur einen von zwei wichtigen Ansatzpunkten für eine digitale Weiterentwicklung abdecken. So wäre es ebenfalls wichtig, langfristig finanzielle Mittel und Zeit in die zeitnahe Weiterentwicklung von Lehrkräften zu innovativen Technologien zu investieren. Diese müssen über eine professionsorientierte digitale Handlungskompetenz verfügen, um die Schülerinnen und Schüler im Kontext der zunehmenden Digitalisierung in der Berufs- und Arbeitswelt zu unterstützen [Ac19] [Zi19] [AZ18]. Dies soll keinesfalls als grundsätzliche Abkehr von etablierten Lehr-Lernmethoden verstanden werden, vielmehr ist es wichtig diese durch aktuelle Lerninhalte zu ergänzen und die Unterrichtsmethoden und -konzepte mit den heutigen technologischen Möglichkeiten zu optimieren [ZGS16].

⁴ Universität Stuttgart, Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT), Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart, guo@ife.uni-stuttgart.de

⁵ Universität Stuttgart, Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT), Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart, b.ditton@tfse.de

⁶ Universität Stuttgart, Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT), Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart, zinn@ife.uni-stuttgart.de

Bei diesem Weiterentwicklungsprozess sollte jedoch immer im Blickfeld behalten werden, dass neue Lehr- und Lerntechnologien im Kontext der Bildung nicht per se zum besseren Bildungoutput führen und eine evidenzbasierte Einführung von neuen Technologien grundlegend bedeutsam ist. Ansonsten können Fehlentwicklungen sowohl zu Ausgaben ohne jeglichen erlangten Gegenwert als auch zu verschlechterten anstatt verbesserten Lehr- und Lernbedingungen an den Schulen führen. Im Kontext dessen soll die Entwicklung und Pilotierung des Virtuellen Physikalischen Sensorlabors (VPSL) mit der Technologie der virtuellen Realität (VR) einen Beitrag dazu leisten, den Einsatz virtueller Lehr- und Lernumgebungen zu fördern, gleichzeitig aber auch die empirische Erforschung zum Einsatz der Zukunftstechnologie im Bezugsfeld der beruflichen Bildung zu unterstützen.

2 Beabsichtigte Lernziele

Im Kontext des autonomen Fahrens und dem zunehmenden Einsatz von Assistenzsystemen in der Mobilität der Zukunft, wurde als Thema der VR-Anwendung die Sensortechnik in Kraftfahrzeugen und hierbei insbesondere die zugrundeliegenden physikalischen Grundlagen fokussiert. Für alle Lernenden im technischen Bereich stellt die (zunehmende) Sensortechnik aufgrund ihrer Bedeutung in Kraftfahrzeugen (z. B. Autonomes Fahren), aber auch in vielen anderen Bereichen in denen heute oder in Zukunft eine intelligente Steuerung sinnvoll ist, einen wichtigen fachlichen Lerninhalt dar.

Die von Ditton konzipierte Unterrichtseinheit und Anwendung VPSL setzt eine Kombination verschiedener Lehr- und Lernmethoden ein [Di18]. Diese erscheinen sinnvoll, da so die Vorteile der verschiedenen Methoden im passenden Kontext genutzt und unterschiedliche Lerntypen angesprochen werden können. Die entwickelte VR-Anwendung ist in eine komplette Unterrichtsreihe integriert, kann aber auch als zusätzliches Lernangebot für an Technik interessierte Jugendliche bereitgestellt werden [Di18].

Der Vorteil einer VR-Anwendung, nämlich für den Menschen nicht sichtbare physikalische Phänomene in eine ansonsten der realen Welt nachempfundene dreidimensionale Umgebung hinein zu projizieren, kann optimal für die Darstellung von beispielsweise Atomen, Elektronen, Feldern und Wellen eingesetzt werden. VR kann insgesamt eine neue Lernerfahrung bieten, die sich durch die Bewertung der theoretischen Konstrukte räumliches Präsenzerleben, Flow-Erleben sowie der wahrgenommenen Usability durch die Schülerinnen und Schülern zeigen kann. Räumliches Präsenzerleben in VR fokussiert, inwiefern sich eine Person in der virtuellen Welt präsent fühlt [WW11]. Das Flow-Erleben wird als optimaler mentaler Zustand verstanden, in der eine Person ganz in ihrer Tätigkeit aufgeht [RVE03]. Das Flow-Erleben wird vom dem wahrgenommenen räumlichen Präsenzerleben beeinflusst [ZGS16]. Die wahrgenommene Usability (engl. Benutzerfreundlichkeit) von VR-Anwendungen hat zudem positive Auswirkungen auf die Nutzungsintention der VR-Technologie [PZ18].

Im Projekt LEBUS⁷ wurde die VR-Lernanwendung VPSL entwickelt und erprobt. Innerhalb der Erprobung wurden die theoretischen Konstrukte räumliches Präsenzerleben, Flow-Erleben, Usability und Motivation betrachtet. Innerhalb des vorliegenden Beitrags werden hierzu im Folgenden im 3. Abschnitt die Lerninhalte und didaktische Aufbereitung beschrieben, im 4. Abschnitt die verwendete Soft- und Hardware dargestellt, im 5. Abschnitt die Evaluationsergebnisse präsentiert, um dann im 6. Abschnitt einen Ausblick auf die Weiterentwicklung der VR-Umgebung für Schülerinnen und Schüler an berufsbildenden Schulen geben zu können.

3 Lerninhalte und didaktische Aufbereitung

Alle entwickelten fünf Experimente in VPSL behandeln physikalische Phänomene (Abbildung 1), welche für verschiedene in Kraftfahrzeugen verwendete Sensoren genutzt werden. Zum optimalen Verständnis benötigen die Lernenden grundlegende Kenntnisse aus den Fächern Physik und Mathematik.

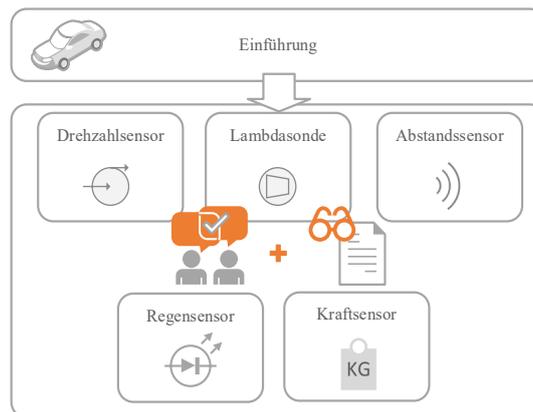


Abb. 1: Überblick zur Anwendung VPSL

Vorteilhaft ist es, dass es sowohl im Bildungsplan des Technischen Gymnasiums im Profil Mechatronik [Mi16], als auch in der Berufsschule im berufsbezogenen Bereich zum Ausbildungsberuf Kraftfahrzeugmechatroniker / Kraftfahrzeugmechatronikerin [Mi13] direkte Anknüpfungspunkte zu den Inhalten des virtuellen Lernlabors gibt.

⁷ Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsinitiative Lehrerbildung“ von Bund und Ländern mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01JA1902 (Lehrerbildung an berufsbildenden Schulen 2) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

3.1 Experiment 1: Der Drehzahlsensor

Drehzahlsensoren für Kraftfahrzeuge können auf verschiedene Art und Weise technologisch umgesetzt werden. Während früher überwiegend nach einem induktiven Messprinzip arbeitende Sensoren eingesetzt wurden, werden heute meist Hall-Sensoren (oft auch als Hallsonden bezeichnet) verwendet [Re16]. In der virtuellen Umgebung erfolgt nach einer kurzen Einführung eine Wiederholung der Wirkungsweise und der Formel der Lorentzkraft. Zum besseren Verständnis der sogenannten „Linken-Hand-Regel“, die im Kontext von Bedeutung ist, steht dazu das in Abbildung 2 dargestellte dreidimensionale Hand-Modell zur Verfügung. Anschließend erfolgt eine Erklärung zum Hall-Effekt. Links im Bild befindet sich dazu ein Stromkreis, in dem Elektronen fließen. Darüber schwebt ein Magnet der vom Nutzer senkrecht verschoben werden kann. Innerhalb des Leiterplättchens werden Pfeile eingeblendet, die die Lorentzkraft anschaulich symbolisieren.

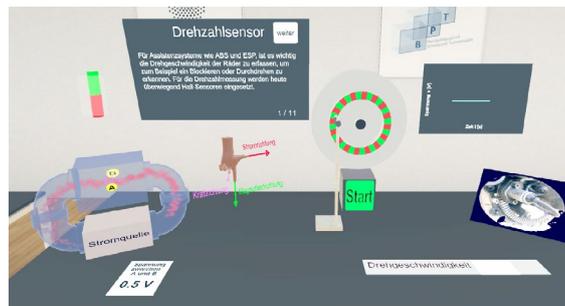


Abb. 2: Virtueller Versuchsaufbau zum Experiment Drehzahlsensor

3.2 Experiment 2: Lambdasonde

Die Lambdasonde vergleicht den Restsauerstoffgehalt im Abgas mit dem Sauerstoffgehalt einer Referenz, meistens mit der aktuellen Atmosphärenluft. Die Lamdasonde (λ -Sonde) wird benötigt um die Luftzahl λ berechenbar zu machen, die den Quotienten aus tatsächlich zugeführter Luftmenge und der für eine optimale Verbrennung benötigten Menge angibt [Re16]. In der virtuellen Umgebung werden die relevanten Größen und der prinzipielle Messprozess visualisiert. Zudem erfolgen zunächst eine Erläuterung der Aufgabe der Lambdasonde und die Arbeitsweise der Regelung. Anschließend kann das in Abbildung 3 rechts zu sehende Motorenmodell gestartet werden. Die Zylinder beginnen sich zu bewegen und es strömen Partikel durch das Abgasrohr. Einige Partikel wandern durch die Sonde und vermischen sich mit den Abgasen. Im Display des Messgeräts rechts wird eine Spannung angezeigt. Zur besseren Beobachtung können die drei Partikelarten (Abgase, Sauerstoff aus der Frischluft, Sauerstoff aus dem Motor) sowie das Abgasrohr ausgeblendet werden. Dazu steht hinter dem Demonstrationsmotor eine Schalttafel mit beschrifteten Schaltern zur Verfügung.

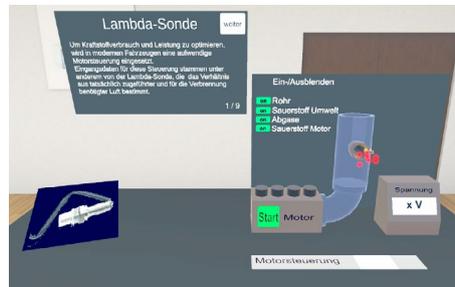


Abb. 3: Virtueller Versuchsaufbau zum Experiment Lambdasonde

3.3 Experiment 3: Abstandssensor

Abstandssensoren sind in Kraftfahrzeugen ein weit verbreitetes Assistenzsystem und geben dem Fahrer akustische und/oder visuelle Informationen über den Abstand zu für ihn schwer zu sehenden Objekten vor oder hinter dem Fahrzeug. Der im virtuellen Experiment verwendete Sensor arbeitet mit Ultraschall, was auch auf die meisten in Realität genutzten Sensoren zutrifft [Re16]. In der Umsetzung des virtuellen Experiments zum Abstandssensor erfolgt zunächst eine Bedeutungszuschreibung des Versuchs anhand der Verbreitung des Sensors in den Fahrzeugen und einer möglichen Verwendung in autonomen Fahrzeugen. Nach der Bedeutungszuschreibung erfolgt zunächst eine Beschreibung des Messvorgangs und eine Erklärung der Fachbegriffe. Die Nutzerin bzw. der Nutzer kann eine zu sehenden Ultraschallwelle auslösen (Abbildung 4) und ihre Ausbreitung und Reflexion beobachten.

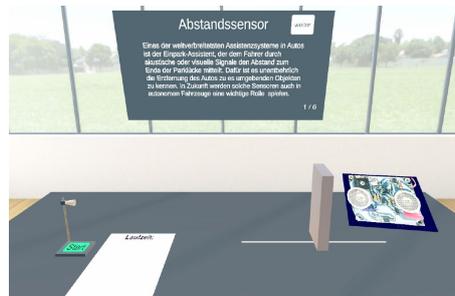


Abb. 4: Virtueller Versuchsaufbau zum Experiment Abstandssensor

3.4 Experiment 4: Regensensor

Regensensoren werden genutzt, um die Wassermenge auf der Frontscheibe zu ermitteln. Zur Erfassung der Regenmenge wird ein optoelektronisches Verfahren eingesetzt. Die Leuchtdiode erzeugt einen Lichtstrahl, der durch ein Glaselement an der Frontscheibe in dieses eingestrahlt wird [Re16]. In der virtuellen Lernumgebung erfolgt zunächst eine

Beschreibung des Regensensors in der Frontscheibe von Fahrzeugen zur Detektion der Regenmenge auf der Scheibe, um den Scheibenwischer mit passender Wischfrequenz zu betreiben. Danach kann die Nutzerin bzw. der Nutzer die in Abbildung 5 links befindliche „Regenmaschine“ aktivieren, worauf diese beginnt Regentropfen auszustoßen, welche auf die darunter angebrachte Glasscheibe fallen. Die entsprechende Spannung wird im Display angezeigt. Eine größere gemessene Spannung wird auch in Form einer Bewegung des symbolischen Wischers wiedergegeben.

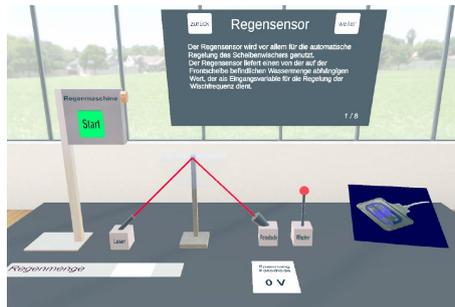


Abb. 5: Virtueller Versuchsaufbau zum Experiment Regensensor

3.5 Experiment 5: Kraftsensor

Kraftsensoren auf Basis der Piezoelektrizität sind generell weit verbreitet. Diese Art von Kraftsensoren nutzt den piezoelektrischen Effekt, um eine Kraft in eine messbare elektrische Spannung zu überführen [Re16]. Auf dem Bildschirm erfolgt zunächst eine Erklärung über die Anwendungsfälle von Kraftsensoren in Fahrzeugen. Danach erfolgt eine Erläuterung zum piezoelektrischen Effekt und wie dieser zur Messung einer mechanischen Kraft genutzt werden kann. Dann folgt der für die Lernenden aktive Teil. Abbildung 6 zeigt den Experimentiertisch, auf dem sich links drei unterschiedlich gestaltete Würfel mit verschiedenen Masseangaben befinden. Diese können mit dem Controller gegriffen und auf dem Sensorelement recht abgelegt werden. Innerhalb dessen befindet sich ein animiertes (piezoelektrisches) Kristallgitter (z. B. Galliumphosphat, Turmalin). Wird nun ein Massewürfel auf den Sensor gelegt, wird dieser gestaucht und das Kristallgitter im Inneren wird verschoben. Es entstehen Transversal-, Longitudinal- und Schereffekte mit Ladungseffekten.

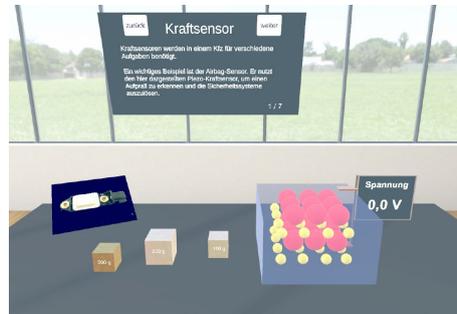


Abb. 6: Virtueller Versuchsaufbau zum Experiment Kraftsensor

4 Notwendige Soft- und Hardware

Zu Beginn der Entwicklung musste die Entscheidung zwischen einer PC-gebundenen- und einer Standalone-VR-Brille getroffen werden. Während die intuitivere Bedienung und die bessere Darstellungsqualität für die PC-gebundene Version sprechen, besitzen die Standalone-VR-Brillen insbesondere die Vorteile einer günstigeren Anschaffung und flexiblerer Einsatzmöglichkeiten. Für die Nutzung in der Schule überwiegen die Argumente für die Standalone-VR-Brille, da der Kostenunterschied insbesondere für Schulen bei der Anschaffung eines Klassensatzes immens ist. Die Systemeigenschaften von Oculus Go (Auflösung: 2560 x 1440; System-on-a-Chip: Vier-Kern-Prozessor Snapdragon 821; Controller: Wireless Controller) ermöglicht eine gute Darstellungsqualität und ein gutes Benutzererlebnis. Die notwendige Software ist die selbst entwickelte Virtual-Reality-Lernanwendung, Virtuelles Physikalisches Sensorlabor (VPSL), die ein Prototyp für den Einsatz von virtuellen Lernumgebungen im schulischen Umfeld ist.

5 Evaluationsergebnisse

Um die grundsätzliche Qualität der Anwendung VPSL, die Eignung für den realen Unterricht an berufsbildenden Schulen und den beiden Zielgruppen sowie den eingangs skizzierten wissenschaftlichen Aspekten nachzugehen, wurden eine Expertenbefragung (N = 18) und eine Pilotierungsstudie (N = 145) durchgeführt.

5.1 Expertenbefragung

Im Entwicklungsprozess der VR-Umgebung wurde eine Expertenbefragung im Hinblick auf die curriculare und inhaltliche Validität sowie bezüglich der Usability durchgeführt. Die Expertenbefragung wurde mit 18 Personen durchgeführt. Dabei handelte es sich um Studenten und wissenschaftliche Mitarbeiter aus den drei Fachbereichen Pädagogik und

technische Didaktik (n = 9), IT und Software (n = 4), sowie Physik und Naturwissenschaften (n = 5). Durch diese Auswahl sollten die Schwerpunkte Wissensvermittlung, Umsetzung der Nutzeroberfläche und fachliche Korrektheit überprüft werden, um weitere Optimierungen an der VR-Umgebung und den Lerninhalten vornehmen zu können. Angemerkt werden muss, dass alle Probanden aufgrund ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit ohnehin ein Interesse an der Thematik im technischen oder pädagogischen Sinne haben.

5.2 Pilotierungsstudie

Das Ziel der Pilotierungsstudie ist es, Wissen zur Beschreibung und Erklärung zum Einsatz der Anwendung VPSL zu erhalten. Angelehnt an bisherige Erkenntnisse auf dem Gebiet der VR-Lernanwendungen, sollen insbesondere die Themen Räumliches Präsenzerleben (mit dem Instrument MEC-Spatial-Presence-Questionnaire [Vo04] [Wi07]), Flow-Erleben (mit einer Adaption der Flow-Kurzskala [RVE03]), Usability (mit einer Adaption der Fragebögen [GHD99] und [Eu95]) und Motivation (mit dem von [Pr96] adaptierten Instrument) untersucht werden.

Von den befragten Schülerinnen und Schülern (N = 145) sind 92.4 % männlich und 7.6 % weiblich. Das durchschnittliche Alter der Probanden beträgt rund 19 Jahre (M = 18,63; SD = 2,24).

Von den Probanden (n = 144) geben 94,5 % an, dass sie keine VR-Brille besitzen. Abbildung 7 zeigt die Häufigkeit der Nutzung von PC- oder Konsolenspielen.

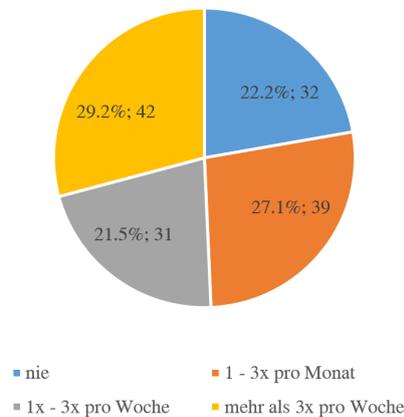


Abb. 7: Kreisdiagramm zur Häufigkeit der Computer- und Konsolenspiele

Die Mittelwerte der Subskalen (Räumliches Situationsmodell, Aufmerksamkeit, Bildliches Vorstellungsvermögen, Handlungsmöglichkeiten, Willentliche Aussetzung der Ungläubigkeit, Involvement und Selbstlokalisierung) des Räumlichen Präsenzerlebens sind bis auf das Bereichsspezifische Interesse (M = 2,65; SD = 0,85) größer als der

Skalenmittelwert von 3. Die Probanden scheinen also gut in die virtuelle Umgebung integriert zu sein und können auch die dort gebotenen Handlungsmöglichkeiten gut wahrnehmen (siehe Abbildung 8).

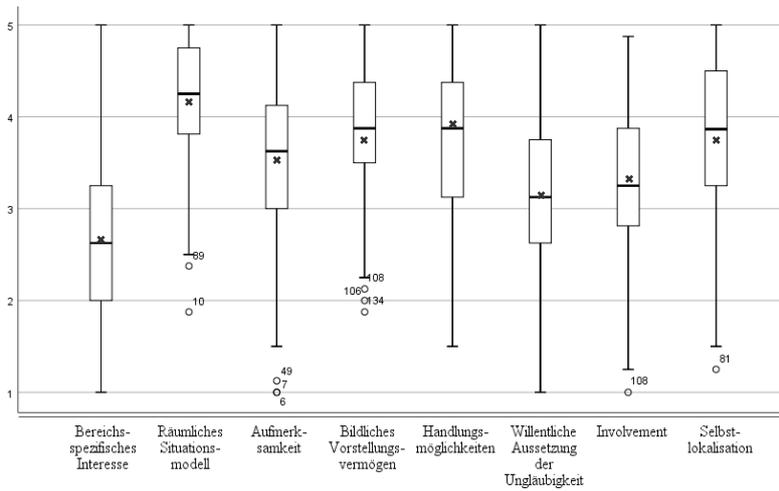


Abb. 8: Kastendiagramme der Verteilung der Ergebnisse der Subskalen des Räumlichen Präsenzerlebens

In Abbildung 9 wird ersichtlich, dass das Flow-Erleben mit einem Mittelwert $M = 4,93$ (Skala 1-7) leicht überdurchschnittlich ist. Es kann daher angenommen werden, dass ein erheblicher Teil der Probanden durchschnittlich bis relativ gut beansprucht wurde und daher fokussiert an den gestellten Aufgaben arbeiten konnte.

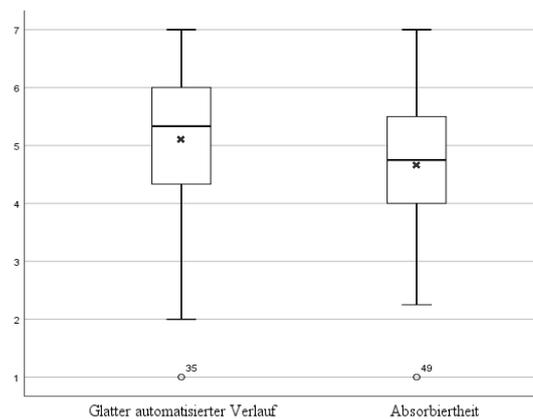


Abb. 9: Kastendiagramme der Verteilung der Ergebnisse der Subskalen des Flow-Erlebens

Die Usability der Anwendung wird mit einem Mittelwert von $M = 4,62$ bei einem Skalenmittel von 3,5 überwiegend als eher gut eingeschätzt. Die Mittelwerte der

Subskalen der Usability in den sechs Dimensionen liegen alle deutlich über den Skalenmittelwerten von 3,5 (siehe Abbildung 10).

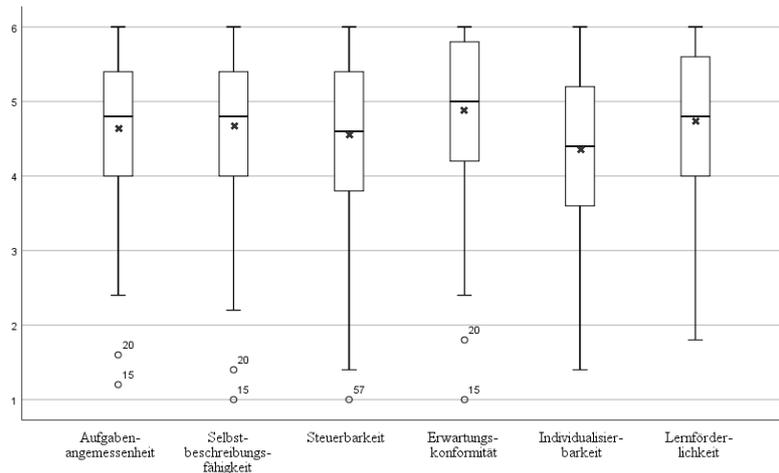


Abb. 10: Kastendiagramme der Verteilung der Ergebnisse der Subskalen der Usability

Insgesamt ist festzustellen, dass die erhobene Motivationsausprägung durchgehend hohe Mittelwerte (Skala 1-6) aufweist und die Testpersonen die Nutzung der Anwendung als motivierend empfinden (siehe Abbildung 11).

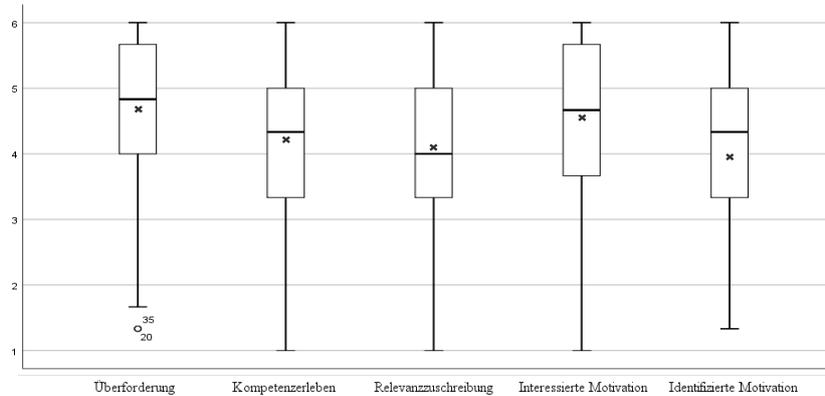


Abb. 11: Kastendiagramme der Verteilung der Ergebnisse der Subskalen der Motivation

Die Motivation allgemein zeigt einen deutlichen Zusammenhang sowohl mit dem Räumlichen Präsenzerleben ($r = 0,425$; $p < 0,01$), als auch mit der Wahrnehmung der Usability ($r = 0,372$; $p < 0,01$).

6 Ausblick

Um die VR-Anwendung VPSL im schulischen Umfeld erfolgreich einzusetzen, müssen auf der Basis der Expertenbefragung und der Pilotierungsstudie verschiedene Voraussetzungen erfüllt werden. Demnach erscheint sinnvoll, dass die Zielgruppe basale physikalische Vorkenntnisse zu den inhaltlichen Themen (u.a. Wellen, Reflexion, Brechung) für den Lerninhalt in VPSL haben sollte [TM15]. Wenn die Zielgruppe keine Vorerfahrung zur Nutzung der VR-Technologie hat, sollte eine Einführung in den Aufbau des virtuellen Labors und die Nutzung der Soft- und Hardware vor der Lernphase durchgeführt werden. Bezüglich der Sicherheit während der Lernphase empfiehlt es sich, die Schülerinnen und Schüler immer zu zweit mit einer VR-Brille alle Experimente abwechselnd durchführen zu lassen. Eine technische Voraussetzung ist es für die Anwendung VPSL die Hardware „Oculus Go“ zu benutzen. Da die aktuelle Version nur im Einzelbenutzermodus funktioniert, ist ein Internetzugang nicht notwendig und unterstützt damit den mobilen Einsatz in Schulen. Die am häufigsten genannte Verbesserungsidee aus der Expertenbefragung ist eine spielerische Komponente einzubauen, um die Schülerinnen und Schüler zusätzlich im virtuellen Lernarrangement zu motivieren. So könnten die Experimente im Sinne von Herausforderungen (Levels) gestaltet werden, die zuerst bestanden werden müssen, um den nächsten fachlich anspruchsvolleren Versuch zur Sensortechnik freizuschalten, was der Grundidee des Gamification, also dem Einbinden von Spiel-Elementen in Nicht-Spiele-Anwendungen, entspricht. Für die nachfolgende Evaluation der Applikation sind empirische Vergleiche mit einer Kontrollgruppe ohne VR-Bedingung, z. B. desktop-basierter Lernumgebung, auch sinnvoll, sowohl aus qualitativer als auch in quantitativer Sicht. Für die Erweiterung der Applikation ist es auch denkbar, die Unterstützung von mehreren Nutzenden für kollaboratives Lernen zu realisieren. Mit dem vorgestellten virtuellen physikalischen Sensorlabor VPSL verbinden sich aber auch eine Reihe von weitergehenden Forschungsfragen rund um die Lehr- und Lernforschung. So stellen sich Fragen zu den kognitiven Wirkungseffekten des Lernens in der Anwendung, den tatsächlichen Transfereffekten aber auch Forschungsdesiderate an die weitere Optimierung der Usability beispielsweise durch die stärkere Einbindung von natürlichen Benutzerschnittstellen.

Literaturverzeichnis

- [Ac19] Ackeren van, I. et al.: Digitalisierung in der Lehrerbildung: Herausforderungen, Entwicklungsfelder und Förderung von Gesamtkonzepten. *Die Deutsche Schule*, 1/111, S. 103-119, 2019.
- [AZ18] Ariali, S.; Zinn, B.: Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 4/6, S. 7-29, 2018.
- [Di18] Ditton, B.: Entwicklung und Pilotierung der VR-Lernanwendung Virtuelles Physikalisches Sensorlabor (VPSL). Universität Stuttgart (unveröffentlicht). 2018.

- [Eu95] Europäisches Komitee für Normung: EN ISO 9241-10. Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 10: Grundsätze der Dialoggestaltung. 1995.
- [GHD99] Gediga, G.; Hamborg, K.; Düntsch, I.: The IsoMetrics usability inventory: An operationalization of ISO 9241-10 supporting summative and formative evaluation of software systems. *Behaviour & Information Technology*, 3/18, S. 151-164, 1999.
- [Mi13] Ministeriums für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg: Bildungsplan für die Berufsschule. Kraftfahrzeugmechatroniker/Kraftfahrzeugmechatronikerin. Ausbildungsjahr 1, 2, 3 und 4. 2013.
- [Mi16] Ministeriums für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg: Bildungsplan für das berufliche Gymnasium der sechs- und dreijährigen Aufbauform. Profil Mechatronik. Eingangsklasse. 2016.
- [PZ18] Pletz, C.; Zinn, B.: Technologieakzeptanz von virtuellen Lern- und Arbeitsumgebungen in technischen Domänen. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 4/6, S. 86-105, 2018.
- [Pr96] Prenzel, M. et al.: Selbstbestimmt motiviertes und interessiertes Lernen in der kaufmännischen Erstausbildung. *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik*, 13, S. 108-127, 1996.
- [Re16] Reif, K.: Sensoren im Kraftfahrzeug. Bosch Fachinformation Automobil. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [RVE03] Rheinberg, F.; Vollmeyer, R.; Engeser, S.: Die Erfassung des Flow-Erlebens. In (Stiensmeier-Pelster, J.; Rheinberg, F. Hrsg.): *Diagnostik von Motivation und Selbstkonzept*, Hogrefe, Göttingen, S. 261-279, 2003.
- [TM15] Tipler, P. A.; Mosca, G.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Springer, Berlin, 2015.
- [Vo04] Vorderer, P. et al.: MEC Spatial Presence Questionnaire. <http://academic.csuohio.edu/kneuendorf/frames/MECFull.pdf>. Stand: 18.09.2015.
- [Wi07] Wirth, W. et al.: A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media Psychology*, 3/9, S. 493-525, 2007.
- [WW11] Weibel, D.; Wissmath, B.: Immersion in computer games: The role of spatial presence and flow. *International Journal of Computer Games Technology*, S. 6-20, 2011.
- [Zi17] Zinn, B.: Digitalisierung der Arbeit: Kompetenzerwartungen des Beschäftigungssystems und didaktische Implikationen. In (Bonz, B.; Schanz, H.; Seifried, J. Hrsg.): *Berufsbildung vor neuen Herausforderungen: Wandel von Arbeit und Wirtschaft*, Schneider Verlag Hohengeheren, Baltmannsweiler, 13, S. 163-176, 2017.
- [Zi19] Zinn, B.: Lehren und Lernen zwischen Virtualität und Realität. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 1/7, 2019.
- [ZGS16] Zinn, B.; Guo, Q.; Sari, D.: Entwicklung und Evaluation der virtuellen Lern- und Arbeitsumgebung VILA. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 1/4, S. 89-117, 2016.