






Themenheft Nr. 51:

Immersives Lehren und Lernen mit Augmented und Virtual Reality – Teil 2.

Herausgegeben von Miriam Mulders, Josef Buchner, Andreas Dengel und Raphael Zender

Handwerkliches Lackieren mit Virtual Reality (HandLeVR)

VR-basierter Kompetenzerwerb in der beruflichen Ausbildung

Miriam Mulders¹ , Matthias Weise² , Andrea Schmitz³ , Raphael Zender⁴ ,
Michael Kerres¹  und Ulrike Lucke² 

¹ Universität Duisburg-Essen

² Universität Potsdam

³ Zentralstelle für die Weiterbildung im Handwerk e.V. (ZWH)

⁴ Humboldt-Universität zu Berlin

Zusammenfassung

Kompetenzentwicklung in der beruflichen Aus- und Weiterbildung beinhaltet den Erwerb von Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen, häufig mit einem Schwerpunkt auf psychomotorischer Koordination. Der Kompetenzerwerb in der Ausbildung zum Fahrzeuglackierer bzw. zur Fahrzeuglackiererin wird durch soziale, wirtschaftliche und ökologische Faktoren behindert. Um diese Hürden zu überwinden, entwickelt das Forschungsprojekt HandLeVR (Handlungsorientiertes Lernen in der VR-Lackierwerkstatt) ein Virtual-Reality-Training auf der Grundlage des empirisch validierten 4C/ID-Modells. Der Artikel stellt das Vorgehen und die Resultate des Projekts vor und präsentiert Ergebnisse einer ersten Evaluierungsstudie (z. B. zu Akzeptanz und Präsenzerleben).

Vocational Painting with Virtual Reality (HandLeVR). VR-Based Skills Acquisition in Vocational Training

Abstract

In vocational training, competence acquisition involves the acquisition of knowledge, skills, and attitudes, often with a focus on psychomotor coordination. For vehicle painters, training is hampered by economic, environmental, and social factors. To overcome these limitations, the HandLeVR research project is developing a Virtual Reality-training based on the empirically validated 4C/ID model. This paper aims to present project processes, outcomes as well as results of a first evaluation study.



1. Motivation und Zielstellung

Virtual Reality (VR) wird bereits in verschiedenen Bereichen der beruflichen Aus- und Weiterbildung eingesetzt (Allcoat und van Mühlenen 2018; Hamilton et al. 2021; Merchant et al. 2014; Mikropoulos und Natsis 2011). Im Baugewerbe (z. B. Sacks, Perlman, und Barak 2013), im Handwerk des Schweissens (z. B. Stone et al. 2013) oder des Fahrzeuglackierens (Konieczny et al. 2008; Yang et al. 2007), beim Militär (z. B. Bhagat, Liou, und Chang 2016) und auch in der Chirurgie (z. B. McCloy und Stone 2001) wurde VR beispielsweise erfolgreich implementiert und die Anwendung in der Praxis untersucht. In diesen Sektoren wird VR oftmals dazu genutzt, Kompetenzen der psychomotorischen Koordination zu erwerben und zu trainieren. Dazu befinden sich die Lernenden in einer computergenerierten dreidimensionalen Umgebung, in der die intendierten Fertigkeiten in einer Reihe von Lernaufgaben eingeübt werden. Ausser für den Erwerb motorischer Fertigkeiten wird VR auch als Bildungsmedium für den Erwerb von deklarativem Wissen und Einstellungen herangezogen (Jensen und Konradsen 2018).¹

VR-Lernanwendungen können variabel gestaltet werden, indem Rahmenbedingungen gezielt modifiziert und durch zusätzliche dreidimensionale Inhalte (Hinweise, Prompts, Anleitungen, Feedback zur Performanz etc.) ergänzt werden. VR bietet somit gerade für die berufliche Aus- und Weiterbildung einen Beitrag zum Erwerb von Fertigkeiten für die berufliche Praxis. Denn tatsächlich sind die Kontextbedingungen in der Praxis oftmals so, dass ein Üben in der Realität nur eingeschränkt möglich ist, weshalb VR in solchen Fällen eine sinnvolle Ergänzung des Trainings darstellt.

An dieser Stelle sollen die Restriktionen vorgestellt werden, denen der Fertigkeitserwerb im Bildungsalltag im Handwerk oftmals unterworfen ist (z. B. Zender et al. 2018):

- 1 Das Trainieren von Fertigkeiten ist mit Aufwendungen verbunden, da es viel Zeit und Mühe kostet, das reale Training einzurichten.
- 2 Das reale Training kann teuer sein, da Materialien und Werkstücke verbraucht werden. Zudem ist eine Betreuung durch Ausbildungspersonal vonnöten, die wiederum Kosten verursacht.
- 3 Das Trainieren in der Realität kann unattraktiv und wenig intuitiv sein, da visuelle Hinweise zur korrekten Ausübung der Fertigkeit fehlen.
- 4 Das Trainieren in der Realität ist in manchen Fällen unmöglich oder ethisch fragwürdig, da Notfallsituationen (z. B. ein Brand) nicht beliebig zu simulieren sind.

¹ Die benannten Restriktionen wurden im Projektverlauf durch diverse Expert:innen aus dem Feld bestätigt

VR ist imstande, diese Limitationen zu überwinden (z. B. Zender et al. 2018) und Auszubildenden im Rahmen ihrer beruflichen Aus- und Weiterbildung zusätzliche Übungsgelegenheiten zu bieten. Da auch die Entwicklung von VR-Lernanwendungen kosten- und zeitintensiv ist und ebenso die Anschaffung des nötigen Equipments für Akteure aus der Bildung mit Aufwendungen einhergeht, sollte VR für mehrere Auszubildende und über einen langen Zeitraum einsetzbar sein. Lernende sollten ohne zusätzlichen Betreuungsaufwand bedarfsorientiert üben können, sodass Lernfortschritte ersichtlich werden. Ausserdem ermöglichen VR-Anwendungen den Lernenden, in einem privaten Raum zu lernen. Dies ist besonders wichtig für den Fall, dass sie sich aufgrund der Anwesenheit von Ausbildungspersonal unwohl fühlen könnten. Darüber hinaus bietet VR die Möglichkeit, zusätzliche, in der Realität nicht verfügbare Hilfen in den Lernprozess zu integrieren, die den Fertigkeitserwerb massgeblich unterstützen. Des Weiteren ist das Training in VR sicher und stellt weder für Lernende eine Gefährdung dar noch belastet es unnötig die Umwelt (Conges et al. 2020; Li et al. 2017).

Der Transfer von in VR erlernten Fertigkeiten in die reale Welt ist für den Trainingserfolg von zentraler Bedeutung. Die Studienlage erscheint hier ernüchternd. Während einige Studien (z. B. Champney et al. 2017; Rose, Brooks, und Attree 2000) darauf hindeuten, dass der Transfer gelingt und es nur ausreichend Realitätsnähe zwischen den in VR und in der Realität erforderlichen Handlungsmustern braucht, fanden andere Studien (Velaz et al. 2014) wenige Vorteile von VR für den Transfer in praktische Settings.

Insgesamt sind VR-Technologien in den letzten Jahren populär geworden und ihre Wirksamkeit für das Training von Fertigkeiten in der beruflichen Bildung wurde in einer Vielzahl von Einzelstudien nachgewiesen. Xie et al. (2021) untersuchten umfassend VR-Lernanwendungen im Bereich der beruflichen Bildung und unterscheiden zwischen der Ausbildung von Ersthelfenden, der medizinischen Ausbildung, der militärischen Ausbildung, der Ausbildung im Transportwesen, im Handwerk und in Bezug auf zwischenmenschliche Fähigkeiten. Nichtsdestotrotz ist zu konstatieren, dass das Potenzial von VR als Bildungstechnologie auch im Sektor der beruflichen Bildung noch nicht eingehend erforscht wurde (Kim et al. 2020).

In dem Forschungsprojekt, das diesem Artikel zugrunde liegt, wurde das Training von Arbeitskräften im Handwerk der Fahrzeuglackierung untersucht. In diesem Berufsfeld sind authentische und realitätsnahe Lerneinheiten oft rar. Fahrzeuglackierer:innen müssen in einem komplexen Umfeld effektiv arbeiten, haben aber nur selten Gelegenheit, Verfahren zu üben, bevor sie diese an realen Werkstücken ausführen sollen. Im Bereich der Fahrzeuglackierung müssen verschiedene Techniken (z. B. Neuteillackierung, Reparaturlackierung) zum Auftragen einer Lackschicht auf ein Werkstück trainiert werden. Adäquate, häufige und handlungsorientierte Trainingsszenarien werden jedoch durch wirtschaftliche (z. B.

Materialkosten), ökologische (z. B. umweltsensible Materialien) und soziale Faktoren (z. B. begrenzte Betreuungskapazität des Ausbildungspersonals) erschwert. Es hat sich gezeigt, dass die derzeitigen Methoden zum Erlernen von Fertigkeiten den in der Praxis der Fahrzeuglackierer:innen geforderten Kompetenzerwerb nicht hinreichend adressieren.

Die Ausbildung in der Fahrzeuglackierung stützt sich in der Regel stark auf das Auswendiglernen von Schritten aus kriterienbasierten Checklisten. Da die Auszubildenden jedoch nur wenig Gelegenheit haben, diese Schritte praktisch zu erproben und über mehrere Übungsdurchläufe hinweg zu festigen, haben sie möglicherweise Schwierigkeiten, sich an das ursprünglich Gelernte zu erinnern und es anzuwenden. VR kann diesem Bildungsproblem im Berufszweig der Fahrzeuglackierung begegnen und die Anwendung von Strategien in praktischen Settings unterstützen. Sie versetzt die Lernenden in eine realistische Arbeitsumgebung, im vorliegenden Fall eine Lackierwerkstatt, in der sie sicher üben können, ohne dadurch Schaden zu nehmen. Die im Rahmen des Forschungsprojekts *HandLeVR*² konzipierte **VR-Lackierwerkstatt** kann von den Auszubildenden wiederholt zu Übungszwecken genutzt werden. Dabei wird ihnen stets sofort und konsistent Feedback zu ihrer Leistung durch das System rückgemeldet. Die VR-Lackierwerkstatt wurde in mehreren Iterationen und interdisziplinär konzipiert, immer wieder getestet und weiterentwickelt. Die entwickelte VR-Umgebung umfasst eine geeignete Variation von authentischen Lernaufgaben, die anhand einer definierten Anzahl von Parametern (z. B. hinsichtlich Art des Werkstücks, Schichtaufbau, didaktische Methode) und in Bezug auf die Komplexität angepasst werden können. Dabei wurden die Lernaufgaben als Kundenaufträge gestaltet. Weiterführende Informationen (z. B. Videomaterial) und Forschungsergebnisse zum Projekt sind auf der Homepage und in diversen Publikationen (Schmitz und Mulders 2021; Zender et al. 2019; Zender und Weise 2020) zu finden. Bisherige VR-Anwendungen in diesem Berufsfeld sind eher als rudimentär einzustufen und beinhalten geringfügige didaktische Vorüberlegungen (z. B. Konieczny et al. 2008; Yang et al. 2007).

Insgesamt scheint die Fahrzeuglackierung für den VR-Einsatz prädestiniert zu sein. Psychomotorische Abläufe können wiederholt trainiert werden, was für die Festigung neu erworbener Fertigkeiten entscheidend ist. Zudem ist keine haptische Rückmeldung von den 3D-Werkstücken erforderlich, da diese bei der Lackapplikation nicht berührt werden. Anstelle von handelsüblichen Controllern halten die Auszubildenden eine originalgetreue 3D-gedruckte Lackierpistole in ihrer dominanten Hand. Dies adressiert dieselben motorischen Handlungsabläufe (z. B. Drücken des Hebels), die auch in der Realität nötig sind, was den Transfer in die Praxis erleichtert.

2 HandLeVR (Handlungsorientiertes Lernen in der VR-Lackierwerkstatt) ist ein dreijähriges vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Verbundprojekt (01.01.19 bis 31.03.22; <https://handlevr.de>, Förderkennzeichen: 01PV18002B). Die im Projekt entwickelte Software ist verfügbar unter <https://github.com/HandLeVR>.

Ausserdem kann in VR sofort eine Rückmeldung über die Schichtdicke und weitere relevante Erfolgsparameter gegeben werden, während es in der realen Welt mehrere Stunden dauert, bis Ergebnisse sichtbar werden.

In den nächsten Abschnitten wird das methodische Vorgehen zur Entwicklung der VR-Lackierwerkstatt und weiterer Projektartefakte beschrieben. Darüber hinaus wird eine umfassende Evaluierung der VR-Lackierwerkstatt vorgestellt. Die Ergebnisse werden präsentiert und eingehend diskutiert. Mittels der Evaluierung sollen die folgenden zentralen Forschungsfragen des Projekts beantwortet werden:

- 1 Ist das VR-Training technisch und didaktisch so aufbereitet, dass es zum Kompetenzerwerb im Rahmen der Berufsausbildung zum Fahrzeuglackierer bzw. zur Fahrzeuglackiererin den erforderlichen Beitrag leisten kann?
- 2 Welche Lernprozessvariablen stellen sich als relevant für die Nutzung der VR-Lernumgebung heraus?
- 3 Ist die VR-Anwendung generell nutzungsfreundlich?
- 4 Wird die verwendete Technologie von der Zielgruppe der Auszubildenden akzeptiert?

Der Artikel schliesst mit einem Ausblick auf zukünftige Forschung und Möglichkeiten des Transfers in praktische Lehr- und Lernsettings der beruflichen Aus- und Weiterbildung.

2. Projektvorgehen und praktische Projektergebnisse

Im Forschungsprojekt wird von einem dreischrittigen Lehr-Lern-Prozess ausgegangen: Zunächst definiert das Ausbildungspersonal eine oder mehrere Lernaufgaben für einen oder mehrere Auszubildende. Im nächsten Schritt wird diese Lernaufgabe von den Lernenden ausgeführt. Abschliessend erfolgt die gemeinsame Auswertung der ausgeführten und aufgezeichneten Lernhandlung im Gespräch zwischen Ausbildungspersonal und Auszubildenden.

Zur Abbildung dieses Lehr-Lern-Prozesses wurden im Rahmen des Projekts drei Komponenten entwickelt. Die drei Komponenten zusammen bilden die VR-Lackierwerkstatt:

- 1 ein Autorenwerkzeug (Desktop-Anwendung)
2. eine Trainingsanwendung (VR-Anwendung)
3. ein Reflexionswerkzeug (Desktop-Anwendung)

Das Autorenwerkzeug wird genutzt, um einsatzfähige Lernaufgaben und zusätzliche Übungen für die VR-Trainingsanwendung zu erzeugen. Das Ausbildungspersonal kann dazu anhand einer Reihe von Parametern einfache bis komplexe Lernaufgaben definieren. In der VR-Trainingsanwendung bearbeiten Auszubildende diese

Aufgaben. Während des VR-Lackiervorganges wird die Leistung der Auszubildenden über eine Reihe von Variablen (z. B. Lackverbrauch, Abstand zum Werkstück) erfasst und gespeichert. Diese Daten dienen als Grundlage für die spätere Auswertung der Leistung mittels des Reflexionswerkzeugs.

Die Durchführung des Forschungsprojekts erfolgte in Zusammenarbeit mit Ausbildungspersonal und Auszubildenden aus dem Bereich der Fahrzeuglackierung. Die Aufgaben wurden in einer Vielzahl von Iterationen erprobt und weiterentwickelt. Abbildung 1 visualisiert den agilen Entwicklungsprozess. Dieser wird unterteilt in eine fortlaufende Anforderungsanalyse, das didaktische Design, die Systementwicklung/-anpassung und die darauf basierenden praktischen Ergebnisse.

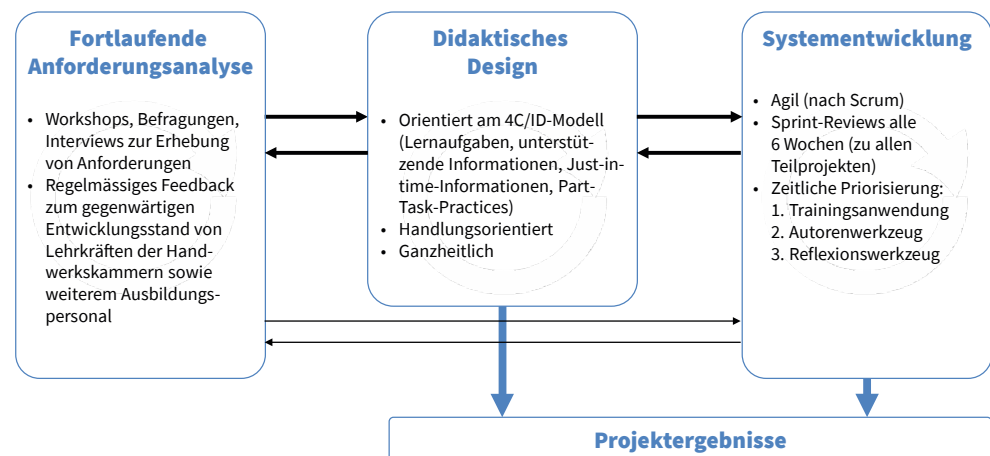


Abb. 1: Agiler Entwicklungsprozess im Projekt HandLeVR.

2.1 Fortlaufende Anforderungsanalyse

Um einen möglichst breiten Transfer der VR-Lackierwerkstatt in die ausbildenden Institutionen zu fördern, ist die Entwicklung einer praxisnahen Lehr-Lern-Anwendung notwendig. Deren Einsatzfähigkeit wurde mithilfe der fortlaufenden Erhebung von Anforderungen und Feedbacks in verschiedenen Settings und Aktivitäten sichergestellt. Konkret wurden insbesondere in der ersten Projekthälfte im Rahmen von Interviews, Verhaltensbeobachtungen und Fokusgruppen in unterschiedlichen Gruppenkonstellationen Bedarfe und inhaltliche Anforderungen der Zielgruppen gesammelt. Die Gruppen setzten sich aus dem Ausbildungspersonal des nationalen Ausbildungszentrums Mercedes-Benz Ludwigsfelde GmbH sowie Lehrpersonen von verschiedenen Bildungszentren der Handwerkskammern in Deutschland zusammen. Durch den iterativen Prozess der Softwareentwicklung (siehe Punkt 2.3)

konnten die Ergebnisse aus diesen Massnahmen kontinuierlich in den Entwicklungszyklus einfließen und Feedback bzw. weitere Anforderungen auf Basis von aktuellen Entwicklungsständen generiert werden.

Während zu Projektbeginn hauptsächlich Anforderungen aus Sicht der Lehrpersonen und des Ausbildungspersonals gesammelt wurden, rückten ab der zweiten Projekthälfte die Bedarfe der Lernenden im Rahmen von zwei Evaluierungsphasen in den Fokus. Diese wurden mit Auszubildenden der Mercedes-Benz Ludwigsfelde GmbH sowie den beteiligten Bildungszentren durchgeführt. Durch dieses Vorgehen konnten innerhalb der Entwicklung Anforderungen und Bedarfe an eine VR-Lernanwendung aus unterschiedlichen institutionellen Kontexten berücksichtigt werden.

2.2 Didaktisches Design

Auch wenn sich eine zunehmende Anzahl von Studien mit VR in Bildungskontexten beschäftigt (z. B. Makransky und Petersen 2021), fehlt es häufig an Modellen und Theorien, die als Grundlage für die VR-Lernszenarien dienen (z. B. Mulders et al. 2020; Radianti et al. 2020). Zum didaktischen Design der VR-Lackierwerkstatt wurde daher das evidenzbasierte **4C/ID-Modell** (van Merriënboer, Jelsma, und Paas 1992) genutzt. Das vielfach erprobte Instruktionsmodell wurde bislang vorwiegend für die Ausbildung komplexer kognitiver Kompetenzen herangezogen (Costa et al. 2022). Bis dato ist wenig bekannt über die Relevanz des Modells für den Erwerb psychomotorischer Kompetenzen innerhalb der beruflichen Bildung und die Eignung als didaktisches Modell in VR. Es wird dennoch davon ausgegangen, dass das Instruktionsmodell die Gestaltung von handlungsorientiertem Training fördert, wie es die Lehrpläne der Berufsbildung fordern, die Integration von unterstützenden Anweisungen und Feedback ermöglicht und zusätzliche Trainingsgelegenheiten für motorische Fertigkeiten mit hohem Mass an Routine und Genauigkeit bietet. Ebenso wird postuliert, dass das 4C/ID-Modell den integrativen Kompetenzerwerb von Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen gleichermaßen unterstützt. Da VR-Technologien jedoch besonders für das Training psychomotorischer Fähigkeiten geeignet scheinen und nur begrenzt Vorteile für den Wissenserwerb haben (z. B. Jensen und Konradsen 2018), wird konstatiert, dass Lernaufgaben und Übungen, die gemäss dem 4C/ID-Modell für VR entwickelt wurden, den Kompetenzerwerb, vor allem aber den Erwerb von motorischen Fertigkeiten bei angehenden Fahrzeuglackierer:innen erleichtern.

Gemäss dem 4C/ID-Modell ist die VR-Trainingsanwendung strukturiert in die vier Komponenten **Lernaufgaben, unterstützende Informationen, Just-in-time-Informationen** und **Part-Task-Practices**. Lernaufgaben (z. B. Fallbeispiele) sind in übergeordneten Aufgabenklassen (z. B. Neuteillackierung) organisiert. Aufgabenklassen beinhalten dabei stets Lernaufgaben gleichen Komplexitätsniveaus. Aufgabenklassen unterscheiden sich jedoch in ihrer Komplexität. Am Anfang bearbeiten

Auszubildende Aufgaben einfacher Aufgabenklassen (z. B. Neuteillackierung), später schwieriger Aufgabenklassen (z. B. Spot-Repair). Sämtliche Lernaufgaben bilden stets eine vollständige Handlung in Form eines Kundenauftrags ab. Zudem unterscheiden sich die Lernaufgaben hinsichtlich der Art des Werkstücks (z. B. Motorhaube), der verwendeten Materialien (z. B. Zwei-Komponenten-Basislack) und des Lackierverfahrens (z. B. Zwei-Schicht-Lackierung). Innerhalb der Lernaufgaben sind unterstützende Informationen eingebettet und permanent für die Auszubildenden verfügbar. Diese offerieren den Auszubildenden notwendiges Wissen zu ausgewählten Aspekten des Lackierprozesses (z. B. Fehler im Spritzbild). Die Wissensbausteine werden u. a. vermittelt über kurze Erklärvideos, Drag-and-drop-Aufgaben, VR-Best-Practice-Beispiele oder verbal über einen virtuellen Ausbildungsmeister. Just-in-time-Informationen bieten den Auszubildenden genau dann Hilfestellung, wenn sie benötigt wird. Während zu Beginn einer Aufgabenklasse die Just-in-time-Informationen permanent als Hilfestellung verfügbar sind, wird die Darbietung innerhalb einer Aufgabenklasse nach und nach ausgeschlichen (**Fading**), da die Informationen mit zunehmender Routine seltener benötigt werden. Ein Strahl, der die ideale Distanz zum Werkstück farblich indiziert, ist eine derartige Information. Part-Task-Practices sind zusätzliche und vereinfachte Übungseinheiten zum Trainieren von wiederkehrenden Aspekten, die ein besonderes Mass an Routine erfordern (z. B. das Einhalten des korrekten Winkels zwischen Pistole und Werkstück). Sie sind nicht Teil einer Lernaufgabe, sondern tauchen intermittierend zwischen den Lernaufgaben einer Aufgabenklasse auf. Zusätzlich erlaubt das Modell eine flexible Anpassung an die Bedürfnisse der Lernenden. Durch die variierende Komplexität der Aufgaben sowie durch die verfügbaren Hilfestellungen kann der Schwierigkeitsgrad auf die Auszubildenden zugeschnitten werden. Für eine detailliertere Beschreibung des didaktischen Designs entlang des 4C/ID-Modells sei auf Videomaterialien auf der Homepage des HandLeVR-Projekts verwiesen, welche beispielhafte virtuelle Lernaufgaben beschreiben sowie das didaktische Design anhand dieser näher erläutern.

2.3 Systementwicklung

Die Umsetzung der drei Teilkomponenten der VR-Lackierwerkstatt erfolgte in Anlehnung an das agile Vorgehensmodell **Scrum** (Sutherland 2020). Hierbei sind insbesondere die drei Rollen **Scrum-Master** (sorgt für die Einhaltung der Scrum-Richtlinien, stellt nötige Ressourcen zur Verfügung und organisiert Termine), **Product-Owner** (erfragt Anforderungen bei den Stakeholdern und verwaltet sie) und **Entwicklungsteam** (setzt die Anforderungen um) vorgegeben. Scrum sieht eine strikte Trennung dieser Rollen vor, was in diesem Projekt aufgrund der zur Verfügung stehenden personellen Ressourcen nicht möglich war. Entsprechend gab es einen Scrum-Master, aber die Rolle des Product-Owners wurde vom Leiter des

Entwicklungsteams eingenommen. Das Entwicklungsteam bestand ausserdem aus zwei bis drei studentischen Hilfskräften und einem kurzzeitig angestellten technischen Mitarbeiter. Das Zusammenführen der Rollen führte zu einer vereinfachten Kommunikation zwischen dem Entwicklungsteam und den didaktischen Partnern bzw. dem Praxispartner. So konnten Anforderungen schnell erhoben und nötige Details für die Umsetzung unkompliziert besprochen werden.

Das Scrum-Framework sieht sogenannte **Sprints** vor, in denen neue Anforderungen umgesetzt und die Anwendungen erweitert werden. Im Sprint-Planning wurden die im darauffolgenden Sprint umzusetzenden Anforderungen ausgewählt und Verantwortlichkeiten zugewiesen. Anforderungen wurden in Form von Tickets auf der universitätseigenen Instanz von GitLab³ organisiert. Am Ende eines Sprints wurde stets ein neuer Prototyp mit den aktuellen Weiterentwicklungen zur Verfügung gestellt, der von sämtlichen Projektpartnern aus unterschiedlichen Perspektiven (d. h. Expert:innen für den Transfer und die didaktische Gestaltung, aber auch aus der Praxis, hier: Ausbildungspersonal der Mercedes Benz Ludwigsfelde GmbH, selbst) getestet und als Grundlage für die weitere Anforderungserhebung genutzt werden konnte. Dieser Prototyp wurde im Rahmen eines Sprint-Reviews vorgestellt, welches mit allen Projektpartnern durchgeführt wurde, um die umgesetzten Anforderungen zu diskutieren. Die Dauer eines Sprints betrug in diesem Projekt jeweils sechs Wochen. Dies ist länger als in Scrum-Projekten üblich, was durch die Grösse des Entwicklungsteams begründet ist. Die längere Sprintdauer stellte einen guten Kompromiss aus Agilität und verfügbarer Entwicklungszeit dar und ermöglichte eine ausreichend schnelle Reaktion auf neue Anforderungen.

Im ersten Entwicklungsjahr lag der Fokus vor allem auf der VR-Trainingsanwendung, die das zentrale Element des Lernsystems darstellt. Hier bestand die Herausforderung insbesondere in der realistischen Darstellung des Farbauftrags, die den didaktischen Anforderungen genügen sollte, aber auch im richtigen Verhältnis zum benötigten Arbeitsaufwand stehen musste. Auch die Umsetzung des virtuellen Ausbildungsmeisters und der Hilfestellungen standen früh im Fokus der Entwicklungsarbeiten. Im zweiten Entwicklungsjahr wurden insbesondere die verschiedenen Teilaufgaben zur Vermittlung relevanter Wissensbausteine – wie z. B. Sortieraufgaben, Multiple-Choice (MC)-Fragen und Schätzaufgaben – gemäss dem didaktischen Design implementiert und eine erste Version des Autorenwerkzeugs umgesetzt, um Ausbildungspersonal und Lehrpersonen die selbstständige Erstellung von Aufgaben zu ermöglichen. Im letzten Entwicklungsjahr wurde das Autorenwerkzeug erweitert, um die Verwaltung von Nutzenden, Gruppen, Aufgabensammlungen, Medien, Lücken und Aufnahmen zu ermöglichen. Auch die Entwicklung und Ausarbeitung des Reflexionswerkzeugs stand zu Projektende im Fokus.

3 <https://about.gitlab.com>, letzter Zugriff: 22.04.2022.

2.4 *Praktische Projektergebnisse*

Die im Zuge des Entwicklungsprozesses erarbeiteten Artefakte beziehen sich auf die folgenden Bereiche: (1) die Lackierpistole, (2) die dreiteilige VR-Lackierwerkstatt bestehend aus der VR-Trainingsanwendung, dem Reflexions- und dem Autorenwerkzeug, (3) das didaktische Design und (4) diverse Begleitmaterialien, die den Transfer in praktische Bildungssettings sichern sollten.

Sämtliche digitalen Artefakte sind frei zugänglich bei GitHub⁴ zu finden und wurden unter die offene MIT-Lizenz gestellt.

2.4.1 *Nachbau einer Lackierpistole*

Die Haptik der Lackierpistole und des zugehörigen Druckschlauchs spielt eine essenzielle Rolle beim Trainieren des Farbauftrags. Entsprechend war die Nachbildung des haptischen Feedbacks eine zentrale Herausforderung im Projekt. Der erste Ansatz der sensorischen Erweiterung einer echten Lackierpistole stellte sich als zu fehleranfällig heraus, da die Sensoren ungeschützt aussen an der Lackierpistole befestigt werden mussten. Aus diesem Grund wurde ein druckbares 3D-Modell einer Lackierpistole umgesetzt, die es Ausbildungsbetrieben ermöglicht, einen eigenen Nachbau einer Lackierpistole mithilfe eines 3D-Druckers zu erstellen (siehe Abb. 2). Ein *Arduino Nano*⁵ ermöglicht die Übermittlung der Stellungen des Abzugshebels und der Drehknöpfe über ein USB-Kabel. Dieses kann durch einen Druckschlauch geführt werden, der gleichzeitig der realistischen Nachbildung der Haptik einer echten Lackierpistole dient. Eine Halterung am Kopf des Nachbaus ist in der Lage, verschiedene VR-Controller aufzunehmen, um Position und Ausrichtung der Lackierpistole im Raum zu erfassen. Die Halterung ist austauschbar, um auch zukünftige Controller zu unterstützen. Metallelemente im Nachbau sorgen dafür, dass Schwerpunkt und Gewicht dem einer echten Lackierpistole entsprechen.

4 <https://github.com/HandLeVR>, letzter Zugriff: 28.04.2022.

5 <http://store.arduino.cc/products/arduino-nano>, letzter Zugriff: 22.04.2022.



Abb. 2: 3D-Druck einer nachgebauten Lackierpistole mit Druckschlauch.

2.4.2 VR-Lackierwerkstatt

Das desktopbasierte **Autorenwerkzeug** dient primär der Erstellung und Anpassung von Lernaufgaben. Es stehen verschiedene Teilschritte zur Verfügung wie z. B. das Lackieren eines Werkstücks sowie MC-Fragen oder unterstützende Informationen (Bilder, Videos oder Texte), welche mithilfe des Baukastenprinzips zusammengestellt und konfiguriert werden können. Die Lernaufgaben werden auf einem lokalen oder dedizierten Server gespeichert und können einzelnen oder mehreren Auszubildenden zugewiesen werden. Das Autorenwerkzeug ermöglicht ausserdem die Verwaltung von Nutzenden und Gruppen sowie von Medien, Lacken und Aufnahmen, die in Lernaufgaben verwendet werden können.

Die Durchführung der Lernaufgaben wird dann in einer VR-basierten **Trainingsanwendung** realisiert. Es werden verschiedene Head-Mounted Displays (HMDs) unterstützt, z. B. die *Meta Quest 2*,⁶ *HTC VIVE Pro 2*⁷ und die *Pico Neo 3 Pro*⁸, die die Augen umschliessen und in der Regel integrierte Lautsprecher besitzen. Die Auszubildenden befinden sich in einer virtuellen Lackierkabine, welche ein zu lackierendes Werkstück als 3D-Modell beinhaltet, das auf einen Lackierständer gespannt wurde (siehe Abb. 3).

6 <https://www.oculus.com/quest-2>, letzter Zugriff: 22.04.2022.

7 <https://www.vive.com/de/product/vive-pro2>, letzter Zugriff: 22.04.2022.

8 <https://www.vive.com/de/product/vive-pro2>

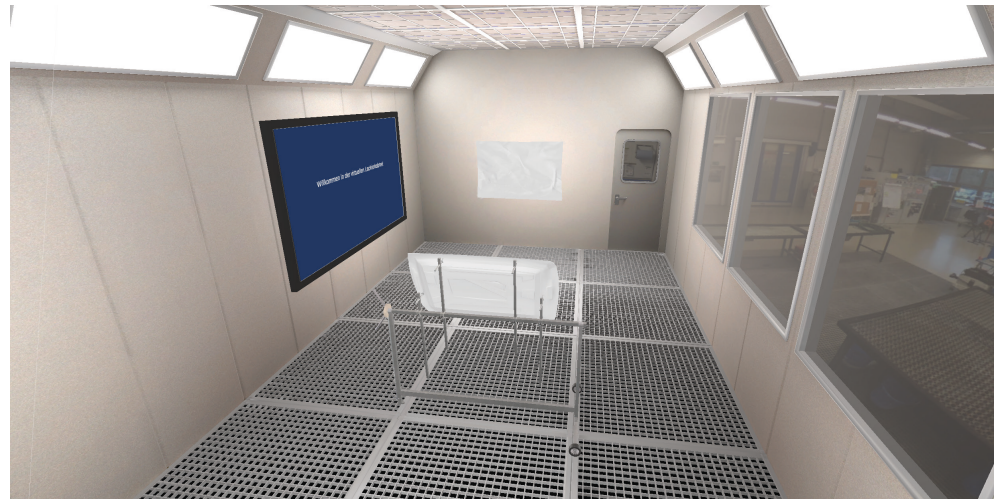


Abb. 3: Die VR-Lackierkabine mit folgenden Elementen: Plakat für Spitzprobe, Monitor, auf Halterung gespanntes Werkstück.

Ausserdem befindet sich ein Papier für eine Spritzprobe an der Wand, und ein Monitor zur Abbildung von multimedialen Darstellungen steht zur Verfügung. Gemäss dem jeweiligen Kundenauftrag, der jeder Lernaufgabe zugrunde liegt, sind die Auszubildenden dazu aufgefordert, eine oder mehrere Lackschichten zu applizieren. Zwischen den zuvor erwähnten Teilschritten kann durch die Interaktion mit farbigen Münzen gewechselt werden. Durch das Einsammeln einer grünen Münze gelangt man zum nächsten Teilschritt. Durch das Einsammeln einer roten Münze kehrt man zum vorherigen Teilschritt zurück. Ein virtueller Ausbildungsmeister (siehe Abb. 4) begleitet die Auszubildenden während einer Lernaufgabe, gibt Instruktionen und verbale Unterstützung. Darüber hinaus sind ausgewählte Wissensbausteine Teil einer Lernaufgabe. Über diverse multimediale Darstellungen (z. B. 3D-Thermometer, sortierbare Objekte und Erklärvideos) wird vor allem der Erwerb deklarativen Wissens (z. B. hinsichtlich Temperatur in Lackierkabine) und arbeitsrelevanter Einstellungen (z. B. hinsichtlich Sicherheitskleidung) adressiert. Der in Abschnitt 2.2 bereits erwähnte Distanzstrahl (siehe Abb. 4) unterstützt in der Aufgabenklasse Neuteillackierung die Auszubildenden bei der Einhaltung eines angemessenen Abstands zwischen Lackierpistole und Werkstück. Um ihnen eine Rückmeldung zu ihrer Leistung zu geben, stehen einerseits zahlenbasierte Erfolgsindikatoren (z. B. bzgl. Farbverbrauch, Einhalten einer angemessenen Geschwindigkeit) und andererseits die sogenannte *Heatmap* zur Verfügung (siehe Abb. 4). Letztere illustriert nach der Applikation auf dem Werkstück selbst in Farben die Schichtdicke. Mithilfe einer Lupenfunktion können Lackierung und *Heatmap* miteinander verglichen werden.

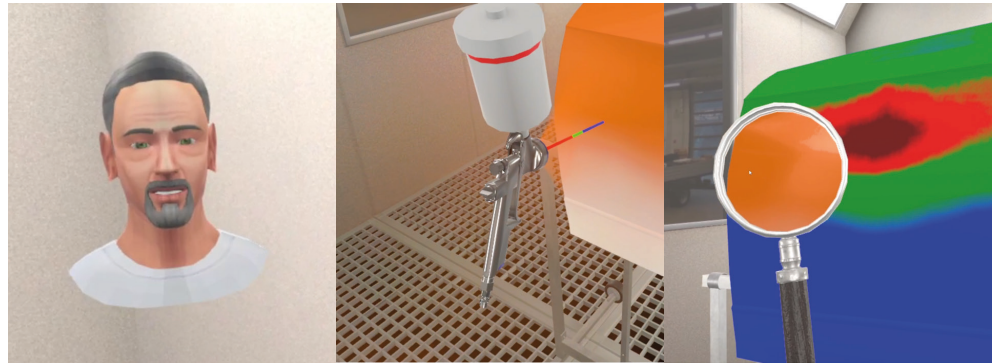


Abb. 4: Virtueller Ausbildungsmeister, Distanzstrahl und Heatmap mit Lupe.

Mit dem **Reflexionswerkzeug** (siehe Abb. 5) kann das Ausbildungspersonal die Lackierleistung innerhalb der Lernaufgaben gemeinsam mit einzelnen oder einer Gruppe von Auszubildenden im Nachhinein besprechen. Das System speichert hierfür alle Lackierarbeiten, die als Lernaufgaben in VR durchgeführt wurden. Zur Besprechung der Lernleistung kann zu verschiedenen Zeitpunkten in der Aufnahme gesprungen werden, um diese von dort an abzuspielen und an beliebigen Stellen zu pausieren. Dabei stehen jederzeit verschiedene Auswertungsparameter (z. B. Abstand zum Werkstück, Winkel und durchschnittliche Schichtdicke) zur Verfügung, die es mittels Farbskalen ermöglichen, die erreichten Resultate zu den Zielvorgaben in Bezug zu setzen. Ausserdem steht im Reflexionswerkzeug auch die bereits erwähnte Heatmap zu Verfügung und eine Visualisierung des Pfades der Lackierpistole unterstützt bei der Reflexion der Führung der Lackierpistole. So können Kompetenzdefizite, aber auch Fortschritte diskutiert und in darauffolgenden Aufgaben und Übungen gezielt adressiert werden, indem zusätzliche Hilfen bzw. Übungen integriert werden oder bei steigender Kompetenz das Schwierigkeitsniveau erhöht wird.

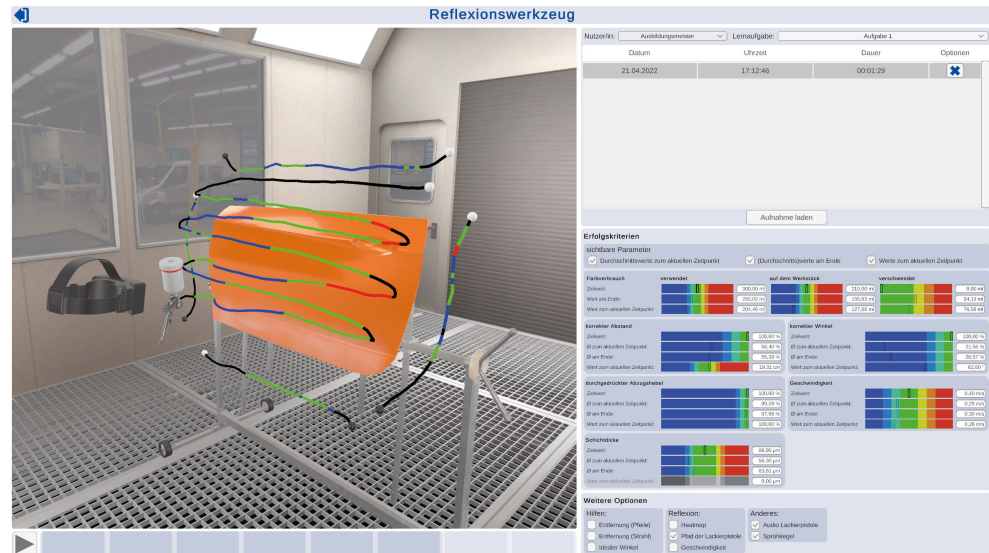


Abb. 5: Aufnahme im Reflexionswerkzeug mit aktiviertem Pfad der Lackierpistole.

2.4.3 Didaktisches Design

Im Zuge des Projekts wurde gemäss dem 4C/ID-Modell ein didaktisches Design ausgearbeitet. Das didaktische Design umschliesst die Konzeption eines für die beteiligten Personen (d. h. Lehr-/Ausbildungspersonal, Auszubildende) passenden Lehr-/Lernangebots.

Die VR-Anwendung beinhaltet die Aufgabenklassen Neuteil-, Reparatur- und Spot-Repair-Lackierung, welche sich wiederum aus mehreren Lernaufgaben und Part-Task-Practices zusammensetzen. Die Aufgabenklasse Neuteillackierung enthält beispielsweise sechs Lernaufgaben – von einem Fallbeispiel hin zu einem konventionellen Kundenauftrag – und drei Part-Task-Practices, um das Einhalten des Abstands zwischen Pistole und Werkstück zu üben. Lernaufgaben wie auch Part-Task-Practices wurden als Drehbücher formuliert. Die einzelnen Szenen (d. h. was der VR-Meister sagt, was auf dem Monitor abgebildet wird usw.) sind darin detailliert beschrieben. Ein Auszug ist in Abb. 6 dargestellt. Die Drehbücher wurden einerseits genutzt, um in mehreren Zyklen inhaltliches Feedback durch Ausbildungspersonal wie Lehrpersonen einzuholen, was in die Überarbeitung einfluss. Andererseits dienten sie dazu, die Lernaufgaben in VR umsetzen zu können (siehe Abschnitt 2.3 zur Systementwicklung). Neben den Lernaufgaben und Part-Task-Practices sind zur Umsetzung der Modellkomponente unterstützende Informationen und eine Vielzahl von Multimedia-Materialien (z. B. vertonte Präsentationsfolien) konzipiert worden. Bei der Entwicklung angemessener Just-in-time-Informationen stellte sich bereits

zu Projektbeginn dar, dass das Einhalten eines angemessenen Abstands zum Werkstück für Auszubildende herausfordernd ist. Dieser Herausforderung wird in der ersten Aufgabenklasse mit dem Distanzstrahl begegnet.

Szene	Werkstück und Pistole	VR-Meister	Monitor und Werkbank	Interaktion	Anmerkung Autorenwerkzeug
1	Weißer Motorhaube	Schön, dass du wieder da bist. Wir befinden uns mitten in der ersten Aufgabenklasse zu Neuteillackierungen. Im zu dieser Lernaufgabe gehörenden Kundenauftrag geht es darum, eine Motorhaube in zwei Schichten mit einer Zweischichtlackierung zu lackieren. Was versteht man überhaupt unter einer Zwei-Schicht-Lackierung? Lege alle Bestandteile, die du für eine Zweischichtlackierung benötigst, in den Korb.	Korb und verschiedene Farbdosen: Basislack, 2K-Klarlack, 2K-Decklack, Grundierfüller, Nass-in-Nass-Füller, Primer	Auswählen der Materialien Grüne Münze einsammeln Korrektes Ergebnis wird gezeigt Grüne Münze einsammeln	
2		Lerne nun mehr über die Unterschiede zwischen Ein-, Zwei- und Dreischichtlackierungen.	Vertonte Slideshow Decklackierungen	Grüne Münze einsammeln	
3		Du hast nun die Möglichkeit, den Kundenauftrag mitzugestalten. In welcher Farbe soll die Motorhaube lackiert werden?	MC-Frage: Farbe 1: MB 9744 Brillantsilber Farbe 2: MB 5890 Canvasitblau-metallic Farbe 3: MB 9197 Obsidianschwarz-metallic Farbe 4: MB 7755 Tenoritgrau-metallic	Kiste mit einer Kugel auf Werkbank Kugel in vorgesehenes Loch befördern Grüne Münze einsammeln	

Abb. 6: Auszug aus einem Drehbuch der Aufgabenklasse Neuteillackierung.

2.4.4 Begleitmaterialien

Die Befähigung des Ausbildungspersonals und der Lehrpersonen gilt neben der technischen Ausstattung als wichtigster Erfolgsfaktor bei der Einführung von digitalen Lernmedien im institutionellen Bildungskontext (Bach 2016; Kreidl 2011). Anhand der Anforderungsanalyse (siehe Abschnitt 2.1) hat sich herausgestellt, dass bei der Implementierung unterschiedliche Personengruppen (z. B. Technologiebeauftragte, Ausbildungspersonal, Lehrpersonen, Personen aus Leitungsebenen oder aus der IT-Abteilung) mit verschiedenen Perspektiven und Fragestellungen involviert sein können. Dementsprechend wurde im Rahmen des Projekts ein umfassendes Handbuch⁹ zur VR-Lackierwerkstatt entwickelt, welches als Grundlage für deren Einsatz im Ausbildungsgeschehen dient und durch seine inhaltliche Struktur die Perspektiven der verschiedenen Personengruppen adressiert. So werden nach einer allgemeinen Einführung die technischen Anforderungen mit Hinweisen zur Installation und Konfiguration sowie eine Praxisanleitung zur Nutzung und die didaktischen Grundlagen der VR-Lackierwerkstatt vorgestellt. Abschliessend werden die Funktionen der einzelnen Systemkomponenten (Autorenwerkzeug, Trainingsanwendung und Reflexionswerkzeug) in jeweils einzelnen Kapiteln beschrieben. Somit ist ein umfangreiches Dokument entstanden, welches im Kern das Ausbildungspersonal dabei unterstützt, den Unterricht mit der VR-Lackierwerkstatt didaktisch fundiert vorzubereiten und durchzuführen. Als Ergänzung wurden ein Tutorial-Video für die

9 Siehe Begleitmaterialien in GitHub: <https://github.com/HandLeVR/>, letzter Zugriff: 22.04.2022.

Nutzung der VR-Anwendung sowie Leitfäden mit Umgangs- und Verhaltensregeln sowie Hygienehinweisen entwickelt, um die Befähigung der Auszubildenden im Umgang mit der VR-Lackierwerkstatt zu erleichtern.

3. Evaluierung

3.1 Vorgehensweise

Nach zweieinhalb Jahren Projektarbeit wurde eine grösser angelegte Evaluierung durchgeführt. Die Mixed-Methods-Evaluierungsstudie generierte Daten aus: (1) Fragebögen, (2) Diskussionsgruppen und (3) Verhaltensbeobachtungen. In jeweils ein-tägigen Workshops wurden von angehenden Fahrzeuglackierer:innen der Mercedes-Benz Ludwigsfelde GmbH sowie von drei weiteren nationalen Bildungszentren eine Lernaufgabe und eine Part-Task-Practice aus der Aufgabenklasse Neuteillackierung ausgeführt. Die Auszubildenden bearbeiteten die Aufgaben allein und selbstständig ohne externe Hilfe (siehe Abb. 7). Dabei kamen als HMDs *HTC VIVEs* und 3D-gedruckte Lackierpistolen (siehe Abb. 2) zum Einsatz. Die Versuchsleitungen folgten einem Leitfaden, um die Versuchsbedingungen so einheitlich wie möglich zu gestalten. Sie achteten darauf, dass die maximale Nutzungsdauer 30 Minuten nicht überstieg (Smith und Burd 2019). Vor der VR-Erfahrung schauten sich die Auszubildenden ein Video-Tutorial an, welches relevante Funktionalitäten innerhalb der VR und auch die Besonderheiten beim Tragen eines HMDs erklärt. Nach der VR-Erfahrung füllten alle Auszubildenden verschiedene Fragebögen aus und nahmen an einer Diskussionsgruppe teil.

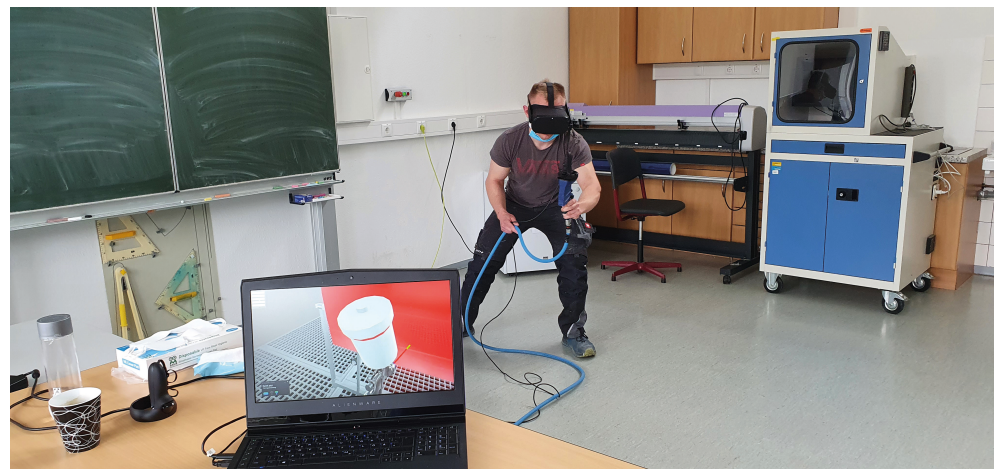


Abb. 7: Ein Auszubildender testet die VR-Lackierwerkstatt.

3.2 Messinstrumente

Die schriftlichen Materialien bestanden aus mehreren Fragebögen. Als soziodemografische Daten wurden mit geschlossenen Fragen Alter, Geschlecht, Muttersprache, höchster Bildungsabschluss und Vorerfahrungen im Umgang mit VR erfasst.

Symptome des Unwohlseins in VR wurden retrospektiv und basierend auf den in der Literatur (z. B. Kim et al. 2018) als prävalent bezeichneten Symptomen (z. B. Schwindel, Übelkeit) auf einer Skala von 1 (*nicht vorhanden*) bis 4 (*stark*) bewertet.

Um die Wirksamkeit einzelner didaktischer Aspekte der VR-Lackierwerkstatt zu erheben, musste auf selbst erstelltes Fragebogenmaterial zurückgegriffen werden. Die zugrunde liegende Likertskala (Gesamtbewertung, Dauer der Lernaufgabe, didaktische Elemente, 4C/ID-Modell, Kompetenzerwerb) reichte hier von 1 (*stimme überhaupt nicht zu*) bis 5 (*stimme voll und ganz zu*).

Beispielitem: Die Multiple-Choice-Frage zu Ursachen von Läufern ist inhaltlich sinnvoll und hat mich beim Lernen unterstützt.

Die individuell erlebte Arbeitsbelastung wurde mithilfe des NASA-TLX (Hart 2006) erhoben. Der Fragebogen besteht aus mehreren Unterskalen (geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung) zur subjektiv erfahrenen Belastung in VR, die innerhalb eines 100-Punkte-Bereichs (0 = *wenig belastet*, 100 = *sehr belastet*) bewertet wurden.

Beispielitem: Wie hart musstest du dich anstrengen, um die Lernaufgaben zu erfüllen?

Die Nutzungserfahrung wurde mittels User Experience Questionnaire (UEQ) von Laugwitz, Held und Schrepp (2008) gemessen. Die VR-Erfahrung sollte anhand von Gegensatzpaaren auf einer siebenstufigen Skala (z. B. *erfreulich* – *unerfreulich*) bewertet werden. Die zugehörigen Subskalen des Fragebogens beziehen sich auf Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Steuerbarkeit, Stimulation und Originalität. Um ausserdem gezieltes Feedback zu ausgewählten Komponenten der Anwendung zu erhalten, wurden zusätzliche Aussagen generiert, bei denen die Proband:innen über eine Likertskala von 1 (*stimme überhaupt nicht zu*) bis 5 (*stimme voll und ganz zu*) angeben sollten, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

Beispielitem: Die Teleportation mit der Lackierpistole funktionierte problemlos.

Das Erleben von Präsenz in VR wurde mittels Multimodal Presence Scale (Makransky, Lilleholt, und Aaby 2017; Volkmann et al. 2018) erfasst. Das Mass unterscheidet zwischen physikalischer Präsenz, Selbst-Präsenz und sozialer Präsenz. Die zugrundeliegende fünfstufige Skala reicht von 1 (*stimmt gar nicht*) bis 5 (*stimmt völlig*).

Beispielitem: Die virtuelle Umgebung erschien mir real.

Allgemeine Einstellungen gegenüber der VR-Technologie wurden anhand mehrerer in der Akzeptanzforschung relevanter Kategorien erfasst: wahrgenommene Nützlichkeit und wahrgenommene Bedienbarkeit (Davis 1989), Verwendungsabsicht und wahrgenommener Genuss (Technology Acceptance Model nach Manis und Choi 2019) sowie Angst vor der Technologie (Bertrand und Bouchard 2008; Venkatesh und Morris 2003). Die ursprünglichen Items wurden ins Deutsche übersetzt und auf den vorliegenden Kontext übertragen. Sie sollten auf einer Likertskala von 1 (*stimme überhaupt nicht zu*) bis 5 (*stimme voll und ganz zu*) beantwortet werden.

Beispielitem: Ich denke, der Einsatz von VR-Trainings macht den Ausbildungsberuf attraktiver.

Nach dem Ausfüllen des Fragebogenmaterials wurden die Auszubildenden in der Diskussionsgruppe gebeten, Potenziale und Herausforderungen der VR-Lackierwerkstatt zu benennen. Dazu wurden sie in Kleingruppen ($N=5$) eingeteilt und erhielten Poster und weitere Schreibutensilien. Nach 30 Minuten Kleingruppenarbeit wurden die Auszubildenden gebeten, ihre Diskussionsergebnisse gemeinsam mit den anderen Gruppen, den Versuchsleitungen und den Ausbildungsmeister:innen zu teilen. Abbildung 8 visualisiert die zu diskutierenden Leitfragen und das Ergebnis einer Kleingruppenarbeit.

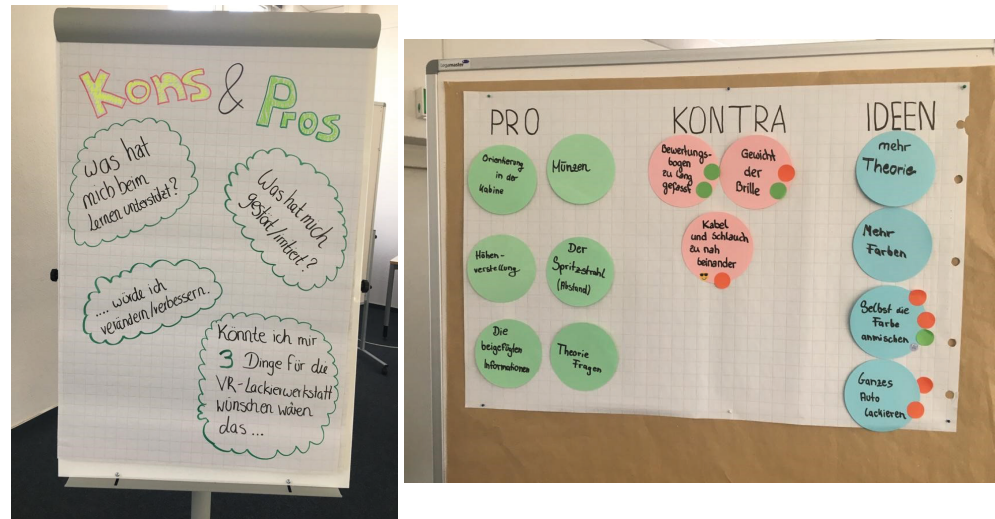


Abb. 8: Leitfragen der Diskussionsphase und Ergebnis einer ausgewählten Kleingruppenarbeit.

Die Daten der Fragebögen wurden mithilfe von SPSS quantitativ ausgewertet, und es wurden deskriptive und erste inferenzstatistische Analysen getätigt. Die Ergebnisse der Diskussion wurden nach der qualitativen Inhaltsanalyse von Kuckartz (2014) ausgewertet und induktiv Kategorien abgeleitet.

Neben den Fragebögen und Diskussionsgruppen lieferte auch das VR-System selbst Daten zum Verhalten der Auszubildenden in VR. Das Verhalten wurde anhand von Erfolgskriterien (z. B. zu Schichtdicke, Winkel) operationalisiert. Diese Daten könnten in die Bewertung einfließen. Aufgrund der geringen Stichprobengröße wurden diese Daten bislang nicht ausgewertet und sind Gegenstand künftiger Untersuchungen.

3.3 Empirische Ergebnisse

Insgesamt nahmen 47 Auszubildende teil, 16 von der Mercedes-Benz Ludwigsfelde GmbH und 31 von anderen nationalen Ausbildungseinrichtungen. Ihr Alter lag zwischen 17 und 37 Jahren ($M=20.91$, $SD=3.65$). 23% sind weiblich, 77% männlich. Die Verteilung nach Bildungsabschluss ist Abb. 9 zu entnehmen.

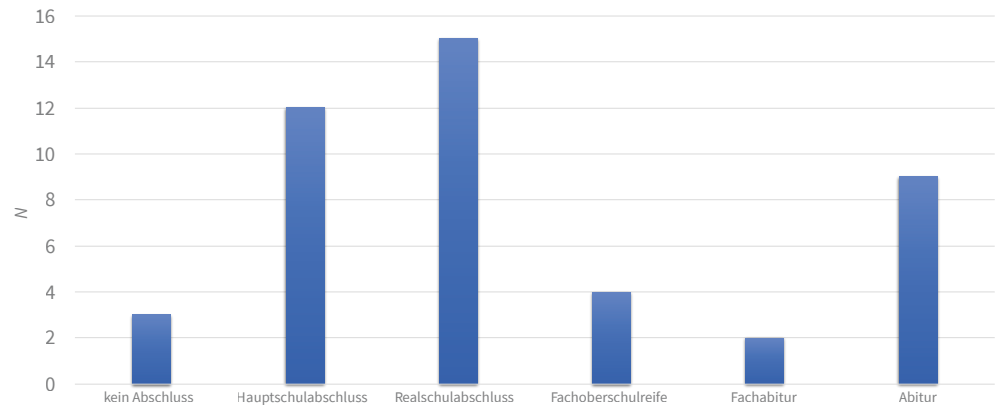


Abb. 9: Höchster Bildungsabschluss.

Für 75% ist die Erstsprache Deutsch. Weitere Auszubildende gaben als Muttersprache Armenisch oder Türkisch an. Die Hälfte der Auszubildenden (49%) berichtete, bereits Erfahrungen mit VR gemacht zu haben, allerdings in fast allen Fällen äusserst selten. Hinsichtlich Alter, Geschlecht, Muttersprache, Bildungsabschluss und Vorerfahrung mit der Technologie kann von einer repräsentativen Stichprobe gesprochen werden (BIBB 2019).

Die Auszubildenden wurden gebeten, eine Gesamtbewertung zu ihrer VR-Erfahrung abzugeben. Auf einer fünfstufigen Skala liegt die Zufriedenheit bei $M = 4.30$ ($SD = .70$) und die Weiterempfehlung der VR-Anwendung an andere Auszubildende bei $M = 4.46$ ($SD = .75$). Den hohen Mittelwerten und geringen Streuungen zufolge waren sich die Auszubildenden hinsichtlich ihrer hohen Bewertung der VR-Anwendung einig. In den Diskussionsgruppen wurden ausserdem Trainingselemente wie der Distanzstrahl, das interaktive Thermometer und die Heatmap als Vorteile genannt. Ferner wird die Möglichkeit, Fehler machen zu können, ohne Schaden anzurichten und Kosten zu verursachen, als befreiend bewertet. Das unangenehme Gefühl beim Tragen von HMDs und die visuelle Schärfe, durch die auch kleine Fehler (z. B. minimale Lackläufer) sichtbar werden können, wurden dagegen moniert.

Des Weiteren sollte die Dauer der Lernaufgaben bewertet werden. Abbildung 10 illustriert die Einschätzung der Auszubildenden. Der Grossteil der Auszubildenden empfand die Dauer der VR-Szenarien als genau richtig.

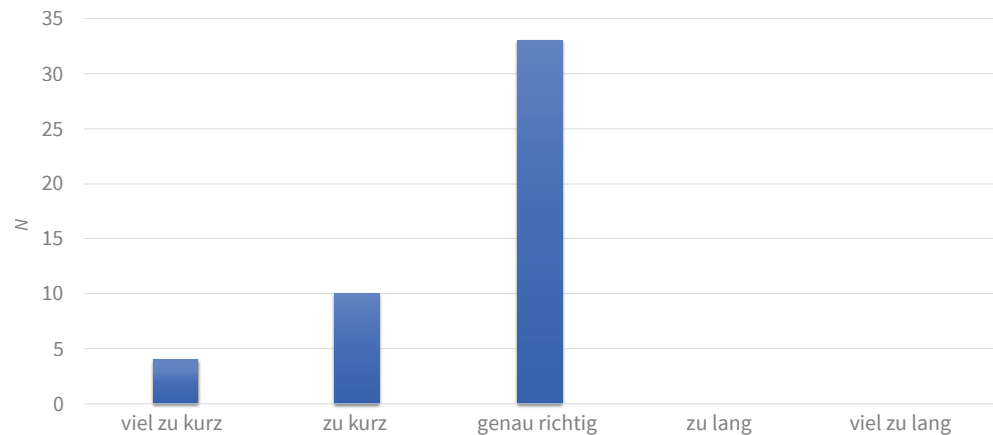


Abb. 10: Einschätzung der Auszubildenden zur Dauer der Lernaufgabe.

Neben diesen eher allgemeinen Befunden der Evaluierung sollen in den nachfolgenden Abschnitten u. a. Befunde aus Sicht der Didaktik und der Systementwicklung näher beleuchtet werden.

3.3.1 Didaktik und Lernprozessvariablen

Die Auszubildenden waren aufgefordert anzugeben, inwieweit die Lernaufgaben zum integrativen Erwerb von Kompetenzen, d. h. von Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen, beigetragen haben und ob es Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Kompetenzen gibt. Gemäss den Ergebnissen unterstützen Lernaufgaben den Erwerb von Fertigkeiten, Kenntnissen und Einstellungen gleichermaßen in zufriedenstellender Weise (siehe Tab. 1). Gepaarte t-Tests ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kompetenzarten (Wissen und Fertigkeiten: $t(46) = -.34$, $p = .74$; Einstellungen und Fertigkeiten: $t(46) = 1.12$, $p = .13$; Wissen und Einstellungen: $t(46) = 1.34$, $p = .07$). Demzufolge scheinen die eingesetzten VR-Szenarien – zumindest aus Sicht der Auszubildenden – den Erwerb von Fertigkeiten, Wissen und Einstellungen gleichermaßen zu unterstützen. Die erwartete Überlegenheit von VR zugunsten des Fertigkeitserwerbs und zum Nachteil des Wissens- und Einstellungserwerbs zeigte sich in der vorliegenden Studie nicht. Es ist jedoch zu betonen, dass es sich hier um retrospektive Einschätzungen von Auszubildenden handelt, die sich auf ein einziges VR-Erlebnis beziehen.

Subskala	<i>M</i>	<i>SD</i>
Wissen	3.17	.79
Fertigkeiten	3.21	.86
Einstellungen	3.45	.86

Tab. 1: Einschätzung der Auszubildenden hinsichtlich des Kompetenzerwerbs.

Die VR-Lackierwerkstatt wurde gemäss den vier Komponenten des 4C/ID-Modells konzipiert. Inwieweit das didaktische Design gelungen ist, sollte von den Auszubildenden anhand von vier Items bewertet werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 verschriftlicht. Alle vier Komponenten wurden gemäss den Ergebnissen von den Auszubildenden als für das Lernen förderlich bewertet. Demzufolge scheint auch die Passung des 4C/ID-Modells in der VR-Anwendung gelungen zu sein. Einschränkend ist jedoch anzumerken, dass die Ergebnisse nichts hinsichtlich der Wirksamkeit des Modells im Kontext VR sagen. Vielmehr zeigen sie, dass das Modell generell einsetzbar ist. Folgestudien sollten das verwendete 4C/ID-Modell mit anderen Instruktionsmodellen vergleichen.

Modellkomponente	<i>M</i>	<i>SD</i>
Vollständige Handlung in Form einer Lernaufgabe	3.98	.77
Sinnvolle unterstützende Informationen	4.02	.68
Sinnvolle Just-in-time-Informationen	3.68	.76
Sinnvolle Teilaufgaben	3.98	.74

Tab. 2: Einschätzung der Auszubildenden hinsichtlich der Passung des 4C/ID-Modells.

Die Auszubildenden wurden darüber hinaus gebeten, die Wirksamkeit einzelner didaktischer Elemente zu bewerten, die in die VR-Szenarien eingebunden waren. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zu finden. Auch wenn sämtliche didaktischen Elemente hoch bewertet wurden, fallen die besonders hohen Bewertungen für die Darstellung von typischen Lackierfehlern und für den Distanzstrahl auf.

Didaktisches Element	<i>M</i>	<i>SD</i>
Multiple-Choice-Frage	3.87	.69
Darstellung von typischen Lackierfehlern	4.22	.73
Münzen	3.93	.74
Interaktives Thermometer	3.96	.73
Virtueller Ausbildungsmeister	3.74	1.00
Präsentation zur Behebung von Läufern	3.72	.81
Lupe	3.65	1.06
Distanzstrahl	4.28	.81
Tutorial	3.58	.92

Tab. 3: Einschätzung der Auszubildenden hinsichtlich ausgewählter didaktischer Elemente.

Als Lernprozessvariablen wurden die Arbeitsbelastung, das Präsenzerleben und Symptome des Unwohlseins erhoben.

Generell wurden kaum Symptome des Unwohlseins berichtet. In einigen wenigen Fällen gaben die Auszubildenden an, dass sie Schwierigkeiten hatten, scharf zu sehen, oder berichteten von Desorientierung oder allgemeinem Unbehagen. Aufgrund der Seltenheit der Symptome wird auf eine genauere Darstellung an dieser Stelle verzichtet. Zu beachten ist jedoch, dass die Technologie nur innerhalb eines Tages eingesetzt wurde. Langzeiteffekte konnten so nicht betrachtet werden.

Hinsichtlich der Gesamtarbeitsbelastung lag der durchschnittliche Wert der Auszubildenden bei $M=31.09$ ($SD=25.05$). Die Werte für die Unterskalen sind Tab. 4 zu entnehmen. Der Befund zur Subskala zeitliche Anforderungen ist konsistent mit dem Befund, der in Abb. 10 visualisiert wurde. Insgesamt ist die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung im Vergleich zu anderen VR-Studien (z. B. Grier 2015) als niedrig einzuordnen. Es fallen jedoch hohe Streuungen auf. Dementsprechend scheinen die Auszubildenden die Belastung durch die VR-Technologie sehr unterschiedlich wahrgenommen zu haben. Des Weiteren ergab sowohl die Frage zur NASA-TLX-Subskala zeitliche Anforderungen als auch die Frage zur zeitlichen Dauer, dass die in VR verbrachte Zeit als kurz wahrgenommen wurde. Zukünftige Studien sollten untersuchen, ab welchem Zeitpunkt der Gebrauch von VR bzw. HMDs als aversiv erlebt wird.

Subskala	<i>M</i>	<i>SD</i>
Geistige Anforderungen	47.17	25.33
Körperliche Anforderungen	46.05	28.09
Zeitliche Anforderungen	17.50	18.85
Leistung	35.09	24.98
Anstrengung	25.66	28.00

Tab. 4: Einschätzung der Auszubildenden hinsichtlich der Arbeitsbelastung (NASA-TLX).

Hinsichtlich des Präsenzerlebens scheinen die Auszubildenden sich über alle drei Subfacetten des Konstrukts hinweg in VR anwesend gefühlt zu haben ($M=3.43$, $SD=.65$). Die Einzeldaten sind in Tab. 5 verschriftlicht. Bei allen Facetten der Skala sind hohe Mittelwerte und geringe Streuungen zu finden, was darauf hindeutet, dass die Auszubildenden sich voll auf die virtuelle Umgebung einlassen und in diese eintauchen konnten.

Subskala	<i>M</i>	<i>SD</i>
Physikalische Präsenz	3.88	.56
Selbst-Präsenz	3.27	.83
Soziale Präsenz	3.12	.87

Tab. 5: Einschätzung der Auszubildenden hinsichtlich Präsenzerleben.

3.3.2 Systementwicklung

Hinsichtlich der User-Experience schnitt die VR-Anwendung in allen Subskalen gut bis sehr gut ab, und das bei einer geringen Streuung (siehe Abb. 11). Insbesondere hinsichtlich Attraktivität, Durchschaubarkeit und Stimulation wurden sehr gute Werte erreicht. Die etwas schlechteren Ergebnisse bei der Effizienz und der Steuerbarkeit sind vermutlich auf kleinere Probleme in der Nutzung der Anwendung zurückzuführen. So gab es vermehrt die Rückmeldung, dass die Navigation zwischen den einzelnen Teilschritten der Aufgabe über die farbigen Münzen nicht immer durchschaubar war und teilweise unzuverlässig funktionierte. Es kam vor, dass sich die Münzen ausserhalb des Sichtfelds befanden und den Auszubildenden somit nicht bewusst war, dass zum nächsten Teilschritt gewechselt werden konnte. Auch war die Auswahl der Münzen in grösserer Entfernung, die durch einen Lichtstrahl umgesetzt wurde, nicht immer zuverlässig, da die Münzen zu klein waren, um sie präzise auswählen zu können. Auch zur Teleportation und Interaktion mit Objekten gab es vereinzelt die Rückmeldung, dass diese Features nicht immer funktionierten. An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass sich die aktuell noch sehr innovativ anmutende und ungewohnte VR-Technologie nach Erfahrung der entwickelnden Autor:innen typischerweise verfälschend auf einzelne Subskalen auswirkt. So schneiden VR-Anwendungen hinsichtlich der Originalität oft übermässig positiv ab.

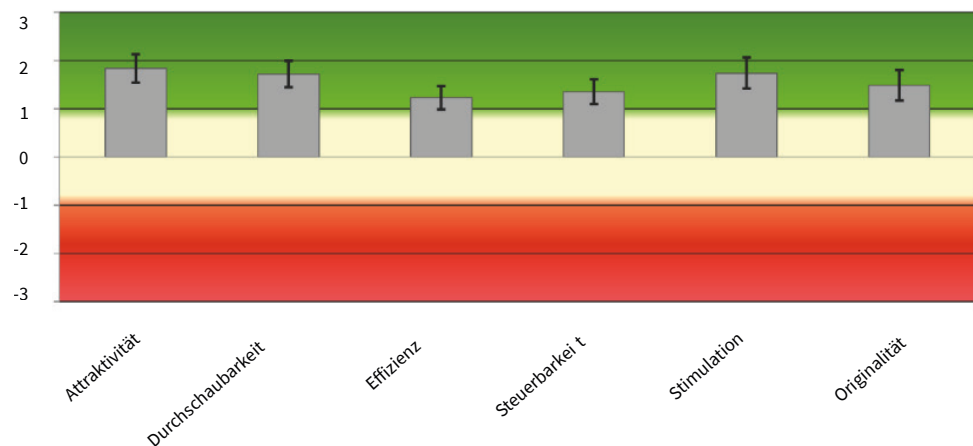


Abb. 11: Ergebnisse des User Experience Questionnaires.

Die Ergebnisse zu den zusätzlichen Aussagen sind in Tab. 6 zusammengefasst. Auch hier wurden durchgängig gute Resultate erzielt. In den Diskussionsgruppen gab es viel positive Rückmeldung, insbesondere zur realistischen Darstellung von Läufern bei der Applikation von zu viel Lack. Es wurde aber auch angemerkt, dass der Lack zu schnell glänzt und nicht den Detailgrad eines echten Lacks erreicht. Die fehlende Darstellung des Druckschlauchs in VR wurde von einigen Auszubildenden

bemängelt, wobei die Bewertungen hier weit auseinandergingen. Die Teleportation war nur möglich, wenn sich die Lackierpistole weiter weg vom Werkstück befand, was im Allgemeinen gut angenommen wurde. Hier gab es aber eine grössere Streuung in den Ergebnissen, was vermutlich auf die bereits angesprochenen vereinzelt Probleme bei der Teleportation zurückzuführen ist. Auch die Führung des Druckschlauchs und die Interaktion mit Objekten funktionierte gut, wobei bei Letzterer eine bessere Hervorhebung von interagierbaren Objekten gewünscht wurde.

Komponente	<i>M</i>	<i>SD</i>
Lackdarstellung	3.64	.77
Lackierpistole	4.16	.74
Führung des Druckschlauchs	3.87	.82
Kein Druckschlauch in VR	3.78	.97
Interaktion mit Objekten	3.82	.84
Teleportation	4.04	.95
Werkstück	4.00	.85

Tab. 6: Einschätzungen der Auszubildenden hinsichtlich einzelner Komponenten der VR-Anwendung.

3.3.3 Einstellungen gegenüber VR

Zur Erhebung allgemeiner Einstellungen gegenüber der VR-Technologie wurden verschiedene Aussagen zur Nutzbarkeit und Wirksamkeit abgefragt. Das Gesamtergebnis zeigt eine insgesamt positive Einstellung der Auszubildenden gegenüber der VR-Technologie ($M = 3.42$, $SD = 1.05$). Die Items sind bestimmten Einflussfaktoren zugeordnet, wodurch ein differenziertes Bild erzeugt wird (siehe Tab. 7).

Faktor	<i>M</i>	<i>SD</i>
Wahrgenommene Nützlichkeit	3.51	.67
Wahrgenommene Bedienbarkeit	3.81	.49
Verwendungsabsicht	3.84	.79
Wahrgenommener Genuss	4.09	.80
Angst vor Bedienbarkeit	2.09	.97

Tab. 7: Einschätzungen der Auszubildenden hinsichtlich der Akzeptanz.

Mit Ausnahme der Angst vor der Technologie liegen die einzelnen Faktoren im positiven Niveau mit einer eher geringen Streuung. Dabei wurde der wahrgenommene Genuss von den Auszubildenden am höchsten bewertet. Dieser Faktor beschreibt, inwieweit die Nutzung als angenehm bzw. unterhaltsam empfunden wird – unabhängig von Nutzen bzw. Leistung der Technologie (Manis und Choi 2019) –, und wird in verschiedenen Studien zu digitalen Lernmedien als wichtiger Einflussfaktor

identifiziert (Abdullah und Ward 2016). Im Vergleich dazu wurde die wahrgenommene Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit von den Auszubildenden eher niedrig bewertet. Dies könnte im Zusammenhang mit der geringen Vorerfahrung mit VR-Technologien stehen. Diverse Studien belegen, dass fehlende Vorerfahrung die wahrgenommene Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit negativ beeinflussen (Pletz und Zinn 2018; Thim 2017). Aufgrund der nicht vorhandenen Vorerfahrung ist der niedrige Wert hinsichtlich des Faktors Angst vor Bedienbarkeit ein positives Ergebnis. Der Wert sagt aus, dass die Auszubildenden keine oder geringe Berührungsängste in Bezug auf die Technologie haben. Angst vor der Bedienung als emotionaler Faktor ist dabei mit Vermeidung oder geringerer Nutzung assoziiert (Abdullah und Ward 2016; Bertrand und Bouchard 2008), was im Falle der VR-Lackierwerkstatt eher als unwahrscheinlich einzuschätzen ist. Wichtig ist zu betonen, dass die erhobenen Einflussfaktoren mit zunehmender Erfahrung der Auszubildenden sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden (Thim 2017). Entsprechend könnten weitere Erhebungen in Bezug auf eine zeitlich längere Nutzung der VR-Lackierwerkstatt weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Akzeptanz der VR-Technologie liefern.

4. Diskussion

Der vorletzte Abschnitt des Artikels fasst die Projektergebnisse und die Resultate der Evaluierungsstudie mit Blick auf die im ersten Abschnitt formulierten Forschungsfragen zusammen.

Auf die erste Forschungsfrage «Ist das VR-Training geeignet, um den Kompetenzerwerb im Rahmen der Berufsausbildung zum Fahrzeuglackierer bzw. zur Fahrzeuglackiererin zu unterstützen?» kann geantwortet werden, dass die VR-Trainingsanwendung generell geeignet ist, um den Kompetenzerwerb im Rahmen dieser Berufsausbildung zu unterstützen. Es braucht jedoch grösser angelegte Studien mit einem Blick auf Langzeitwirkungen, die untersuchen, inwiefern ein nachhaltiger Einsatz der VR-Lackierwerkstatt in der Berufsausbildung gelingen kann und inwiefern sich die Integration in die Ausbildung und über mehrere Ausbildungsjahre auf den Kompetenzerwerb – genauer gesagt den Erwerb von Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen – sowie auf den Transfer in die Berufspraxis auswirkt.

Die zweite Forschungsfrage betrachtete, inwieweit latente Lernprozessvariablen die Nutzung der VR-Lernumgebung beeinflussen. Symptome des Unwohlseins konnten zumindest in dieser Untersuchung selten festgestellt werden. Das Erleben von Präsenz und Arbeitsbelastung während der VR-Erfahrung scheint relevant zu sein. Zukünftige Forschung sollte Zusammenhänge der Konstrukte hinsichtlich der Lernresultate der VR-Lernanwendung fokussieren.

Die dritte Forschungsfrage zielte auf die Nutzungsfreundlichkeit der VR-Anwendung ab. Insgesamt hat die VR-Umgebung hinsichtlich der Nutzungserfahrung sehr gut abgeschnitten. Insbesondere die realistische Darstellung der Farbkabine, der Lackierpistole und des Farbauftrags wurde positiv bewertet. Es wurde aber auch angemerkt, dass die Darstellung der Lacke hinsichtlich der Glanzentwicklung und des Detailgrades nicht an die Realität heranreicht. Hier stösst die aktuelle Technologie sowohl softwareseitig als auch in der Darstellungsqualität von HMDs noch an ihre Grenzen. Viele der in der Evaluierung identifizierten Probleme wurden aufgegriffen, um die Anwendung weiter zu verbessern. So wurde beispielsweise der Auswahlbereich der Münzen vergrössert und die Teleportation angepasst.

Die vierte und letzte Forschungsfrage fokussierte die Akzeptanz der eingesetzten Technologie durch die Zielgruppe der Auszubildenden. Gemäss der vorliegenden Evaluierung wird die verwendete VR-Technologie generell von der Zielgruppe angenommen. Massnahmen für den Abbau von Hürden oder Widerständen waren dementsprechend nicht notwendig. Um die Akzeptanz weiter zu fördern, wurden Begleitmaterialien zum Umgang mit der VR-Technologie erstellt, die den Einstieg erleichtern.

5. Limitationen und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung basiert nicht auf einem Kontrollgruppendesign, d. h., die Ergebnisse des Kompetenzerwerbs wurden nicht verglichen mit einer Gruppe, die ohne die VR-Technologie lernte. Aus mehreren Gründen wurde sich gegen ein solches Forschungsdesign entschieden: Zunächst sei auf die grundlegenden Bedenken verwiesen, die gegenüber Medienvergleichsstudien seit vielen Jahren vonseiten der mediendidaktischen Forschung vorgebracht werden (z. B. Reeves und Lin 2020; Rey 2010). Mediengestützte Verfahren lassen sich nicht sinnvoll mit traditionellen Formaten vergleichen, denn es ist nicht die Technik an sich, die eine Wirkung für das Lernen entfaltet, sondern ein Treatment, in dem ein bestimmtes didaktisches Design in einer Technik für eine gegebene Lehr-Lern-Situation implementiert wird. Aus diesem Grund sind Studien umstritten, die als schlichter Medienvergleich angelegt sind. Die Herausgeber der Zeitschrift *Educational Technology: Research & Development* lehnen entsprechende Forschungsdesigns etwa explizit ab (Johnson et al. 2021).

Ferner wurden im Rahmen dieser Studie lediglich deskriptive und erste inferenzstatistische Analysen berichtet. Die erhobenen Daten bieten jedoch die Möglichkeit, weitere Analysen anzustellen und beispielsweise die Zusammenhänge zwischen Konstrukten (z. B. zwischen der Akzeptanz von VR-Anwendungen und dem Erleben von Präsenz) zu betrachten.

Darüber hinaus war für das Projekt wesentlich, dass in der Ausbildung von Fahrzeuglackierer:innen die Möglichkeit zum intensiven und wiederholten Training an einer Reihe unterschiedlich komplexer Werkstücke vielfach nicht hinreichend sichergestellt ist. Sie haben also schlicht nicht ausreichend Gelegenheiten zum Trainieren und Ausbilden von Fertigkeiten des Lackierens. Die Betriebe verfügen häufig nicht über das Trainingsmaterial. Der Lack ist für reines Training oft zu teuer und zudem umwelt- und gesundheitsschädlich. Die betrieblich verfügbaren Lackierwerkzeuge und -kabinen werden meist für die Bearbeitung von Kundenaufträgen benötigt. Fasst man diese Rahmenbedingungen zusammen, wird deutlich, wie wenig sinnvoll ein Vergleich einer Gruppe mit vs. ohne VR-Lernanwendung ist. Interessant wäre dagegen ein Vergleich unterschiedlicher didaktischer Designs, auch zur Prüfung des 4C/ID-Modells, das den Erwerb von Fertigkeiten beschreibt und hier erstmals im Kontext von VR-Trainingsumgebungen zur Anwendung gekommen ist.

Es sei zudem darauf verwiesen, dass die entwickelte VR-Anwendung zwar mit verschiedenen HMDs und VR-Controllern erprobt wurde, dass jedoch die gewonnenen Erkenntnisse aus technischer Sicht nach wie vor spezifisch für das konkrete Setting sind. Andere Geräte, andere Software oder andere Interaktionsformen können zu anderen Bewertungen der Nutzung des Systems führen. Eine Übertragung der aus der vorliegenden Empirie abgeleiteten Aussagen auf VR im Allgemeinen wäre somit unzulässig.

Neben den anwendungsspezifischen Erkenntnissen sind jedoch einige durchaus verallgemeinerbare Resultate und Erfahrungen aus der Projektarbeit anzuführen. Dazu zählt insbesondere die konsequent angewandte *agile Entwurfsmethodik* (siehe Abb. 1), die nicht nur die Arbeit im Projekt strukturiert hat und ermöglichte, dass jederzeit ein nutzbarer Prototyp verfügbar war, sondern insbesondere auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Mediendidaktik und Bildungstechnologie sowie einen beständigen Austausch hinsichtlich Theorie und Praxis ermöglicht hat. Wenn auch die engmaschigen Abstimmungen externen Betrachtenden aufwendig erschienen sein mögen, so wurde dadurch doch ein geteiltes Verständnis zwischen allen Projektbeteiligten sichergestellt, was abweichende Erwartungshaltungen oder Missverständnisse schnell aufzuzeigen bzw. zu beheben half.

Ebenso wurden durch die konsequente Einbindung von Praxis- und Transferpartnern die Relevanz für das Berufsfeld und die Nachhaltigkeit der Entwicklung befördert. Dies äusserte sich beispielsweise in Überlegungen zum Autoren- und zum Reflexionswerkzeug, die sich in die Ausbildungspraxis einfügen und aufwandsarm betreibbar sein müssen. Auch die Abstimmung zum Lizenzmodell der veröffentlichten Software berücksichtigt die Bedürfnisse aller Partner, sowohl aus der Forschung nach möglichst breitem Teilen als auch aus der Praxis nach kommerzieller Verwertbarkeit. Ob damit ein nachhaltiger Betrieb und eine Weiterentwicklung der Ergebnisse möglich werden, muss die Zukunft zeigen.

Literatur

- Abdullah, Fazil, und Rupert Ward. 2016. «Developing a General Extended Technology Acceptance Model for E-Learning (GETAMEL) by analysing commonly used external factors». *Computers in Human Behavior* 56 (March): 238–56. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.11.036>.
- Allcoat, Devon, and Adrian von Mühlennen. 2018. «Learning in virtual reality: Effects on performance, emotion and engagement». *Research in Learning Technology* 26. <https://doi.org/10.25304/rlt.v26.2140>.
- Bertrand, Manon, and Stéphane Bouchard. 2018. «Applying the technology acceptance model to VR with people who are favorable to its use». *Journal of Cyber Therapy & Rehabilitation: 200-210*. <https://interactivemediainstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/JCR-12.pdf#page=80>.
- Bach, Alexandra. 2016. «Nutzung von digitalen Medien an berufsbildenden Schulen–Notwendigkeit, Rahmenbedingungen, Akzeptanz und Wirkungen». *Jahrbuch der berufs- und wirtschaftspädagogischen Forschung: 107-123*. <https://doi.org/10.25656/01:12732>.
- Bhagat, Kaushal Kumar, Wei-Kai Liou, und Chun-Yen Chang. 2016. «A cost-effective interactive 3D virtual reality system applied to military live firing training». *Virtual Reality* 20 (2): 127-140. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0284-x>.
- Bundesinstitut für Berufsbildung – BIBB. 2019. «Datensystem Auszubildende – Datenblätter». <https://www.bibb.de/dienst/dazubi/de/1871.php?fulltextSbmt=anzeigen&src=berufesuche&keyword=Fahrzeuglackierer>.
- Champney, Roberto K., Kay M. Stanney, Laura Milham, Meredith B. Carroll, und Joseph V. Cohn. 2017. «An examination of virtual environment training fidelity on training effectiveness». *International Journal of Learning Technology* 12 (1): 42-65. <https://doi.org/10.1504/IJLT.2017.083997>.
- Conges, Aurélie, Alexis Evain, Frederick Benaben, Olivier Chabiron, und Sebastien Rebiere. 2020. «Crisis management exercises in virtual reality». *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops: 87-92*. <https://doi.org/10.1109/VRW50115.2020.00022>.
- Costa, Joana Martinho, Guilhermina Lobato Miranda, und Mário Melo. 2022. «Four-component instructional design (4C/ID) model: A meta-analysis on use and effect». *Learning Environments Research* 25 (2): 445-463. <https://doi.org/10.1007/s10984-021-09373-y>.
- Davis, Fred. 1989. «Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use and User Acceptance of Information Technology». *MIS Quarterly* 13: 319–339. <https://doi.org/10.2307/249008>.
- Grier, Rebecca A. 2015. «How high is high? A meta-analysis of NASA-TLX global workload scores». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 59 (1): 1727-1731. <https://doi.org/10.1177/1541931215591373>.
- Hamilton, David, Jim McKenchnie, Edward Edgerton, und Claire Wilson. 2021. «Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design». *Journal of Computers in Education* 8 (1): 1-32. <https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2>.

- Hart, Sandra G. 2006. «NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later». *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* 50 (9): 904–908. <https://doi.org/10.1177/15419312060500090>.
- Jensen, Lasse, und Flemming Konradsen. 2018. «A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training». *Education and Information Technologies* 23 (4): 1515-1529. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>.
- Johnson, Tristan. E., Lin Lin, Patricia A. Young, Hale Ilgaz, Gwendolyn Morel, und J. Michael Spector. 2021. «Thinking from Different Perspectives: Academic Publishing Strategies and Management in the Field of Educational Technology». *What Journal Editors Wish Authors Knew About Academic Publishing: 37–48*. <https://www.learntechlib.org/primary/p/219093/>.
- Kim, Hyun K., Jaehyun Park, Yeongcheol Choi, und Mundeong Choe. 2018. «Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment». *Applied ergonomics* 69: 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>.
- Kim, Kevin Gonyop, Catherine Oertel, Martin Dobricki, Jennifer K. Olsen, Alessia E. Coppi, Alberto Cattaneo, und Pierre Dillenbourg. 2020. «Using immersive virtual reality to support designing skills in vocational education». *British Journal of Educational Technology* 51 (6): 2199–2213. <https://doi.org/10.1111/bjet.13026>.
- Konieczny, Jonathan, Gary Meyer, Clement Shimizu, John Heckman, Mark Manyen, und Marty Rabens. 2008. «VR spray painting for training and design». *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*: 293-294. <https://doi.org/10.1145/1450579.1450659>.
- Kozak, J. J., P.A. Hancock, E. J. Arthur, und S. T. Chrysler. 1993. «Transfer of training from virtual reality». *Ergonomics* 36 (7): 777–784. <https://doi.org/10.1080/00140139308967941>.
- Kreidl, Christian. 2011. «Akzeptanz und Nutzung von E-Learning-Elementen an Hochschulen. Gründe für die Einführung und Kriterien der Anwendung von E-Learning». <https://doi.org/10.25656/01:8288>.
- Kuckartz, Udo. 2014. *Mixed methods: methodologie, Forschungsdesigns und Analyseverfahren*. Wiesbaden: Springer.
- Laugwitz, Bettina, Theo Held, und Martin Schrepp. 2008. «Construction and evaluation of a user experience questionnaire». *Symposium of the Austrian HCI and usability engineering group*: 63-76. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89350-9_6.
- Li, Lan, Fei Yu, Dongquan Shi, Jianping Shi, Zongjun Tian, Jiquan Yang, Xingsong Wang, und Qing Jiang. 2017. «Application of virtual reality technology in clinical medicine». *American journal of translational research* 9 (9): 3867-3880. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28979666/>.
- Makransky, Guido, Lau Lilleholt, und Anders Aaby. 2017. «Development and validation of the Multimodal Presence Scale for virtual reality environments: A confirmatory factor analysis and item response theory approach». *Computers in Human Behavior* 72: 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.02.066>.

- Makransky, Guido, und Gustav B. Petersen. 2021. «The cognitive affective model of immersive learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality». *Educational Psychology Review* 33 (3): 937-958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>.
- Manis, Kerry T., und Danny Choi. 2019. «The virtual reality hardware acceptance model (VRHAM): Extending and individuating the technology acceptance model (TAM) for virtual reality hardware». *Journal of Business Research* 100: 503-513. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.021>
- McCloy, Rory, und Robert Stone. 2001. «Virtual reality in surgery». *Bmj* 323 (7318): 912–915. <https://doi.org/10.1136/bmj.323.7318.912>.
- Merchant, Zahira, Ernest Goetz, Lauren Cifuentes, Wendy Keeney-Kennicutt, und Trina Davis. 2014. «Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis». *Computers & Education* 70: 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>.
- Mikropoulos, Tassos A., und Antonis Natsis. 2011. «Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009)». *Computers & Education* 56 (3): 769-780. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.10.020>.
- Mulders, Miriam, Josef Buchner, und Michael Kerres. 2020. «A framework for the use of immersive virtual reality in learning environments». *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)* 15 (24): 208-224. <https://doi.org/10.3991/ijet.v15i24.16615>.
- Pletz, Carolin, und Bernd Zinn. 2018. «Technologieakzeptanz von virtuellen Lern- und Arbeitsumgebungen in technischen Domänen». *Journal of Technical Education (JOTED)* 6 (4): 86-105. <https://doi.org/10.48513/joted.v6i4.143>.
- Radianti, Jaziar, Tim A. Majchrzak, Jennifer Fromm, und Isabell Wohlgenannt. 2020. «A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda». *Computers & Education* 147: 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>.
- Reeves, Thomas C., und Lin Lin. 2020. «The research we have is not the research we need». *Educational Technology Research and Development* 68 (4): 1991-2001. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09811-3>.
- Rey, Günter Daniel. 2010. «Multimedia learning: Are we still asking the wrong questions? ». *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia* 19 (1): 103-120. <https://www.learn-techlib.org/primary/p/33131/>.
- Rose, F. D., B. M. Brooks, und E. A. Attree. 2000. «Virtual reality in vocational training of people with learning disabilities». *3rd International conference on disability, virtual reality and associated technologies*: 129-135. <https://centaur.reading.ac.uk/19120/>.
- Sacks, Rafael, Amotz Perlman, und Ronen Barak. 2013. «Construction safety training using immersive virtual reality». *Construction Management and Economics* 31 (9): 1005-1017. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.828844>.
- Schmitz, Andrea, und Miriam Mulders. 2021. «Institutionelle Rahmenbedingungen für den Einsatz von Virtual Reality als Lerntechnologie». *Proceedings of DELFI Workshops 2021*: 47-58. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:1393-opus4-7338>.

- Smith, Shamus P., und Elizabeth L. Burd. 2019. «Response activation and inhibition after exposure to virtual reality». *Array* 3: 100010. <https://doi.org/10.1016/j.array.2019.100010>.
- Stone, R. T., E. McLaurin, P. Zhong, und K. Watts. 2013. «Full virtual reality vs. integrated virtual reality training in welding». *Welding Journal* 92 (6): 167–174. http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2013_06_s167.pdf.
- Sutherland, J. J. 2020. *Das Scrum-Praxisbuch*. Bad Langensalza: Campus/Beltz.
- Thim, Christof. 2017. *Technologieakzeptanz in Organisationen – Ein Simulationsansatz*. Dissertation. Universität Potsdam. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-401070>.
- Van Merriënboer, Jeroen J., Otto Jelsma, und Fred G. Paas. 1992. «Training for reflective expertise: A four-component instructional design model for complex cognitive skills». *Educational Technology Research and Development* 40 (2): 23-43. <https://doi.org/10.1007/BF02297047>.
- Vélaz, Yaiza, Jorge Rodríguez Arce, Teresa Gutiérrez, Alberto Lozano-Rodero, und Angel Susescun. 2014. «The influence of interaction technology on the learning of assembly tasks using virtual reality». *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 14 (4): 041007. <https://doi.org/10.1115/1.4028588>.
- Venkatesh, Viswanath, Michael G. Morris, Gordon B. Davis, und Fred D. Davis. 2003. «User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View». *MIS Quarterly* 27: 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>.
- Volkman, Torben, Daniel Wessel, Nicole Jochems, und Thomas Franke. 2018. «German Translation of the Multimodal Presence Scale». *Mensch und Computer 2018 – Tagungsband*: 475-479. <https://doi.org/10.18420/muc2018-mci-0428>.
- Xie, Biao, Huimin Liu, Rawan Alghofaili, Yongqi Zhang, Yeling Jiang, Flavio Destri Lobo, Changyang Li, Wanwan Li, Haikun Huang, Mesut Akdere, Christos Mousas, und Lap-Fai Yu. 2021. «A review on virtual reality skill training applications». *Frontiers in Virtual Reality* 2: 645153. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.645153>.
- Yang, Ungyeon, Gun. A. Lee, Seonhyung Shin, Sunya Hwang, und Wookho Son. 2007. «Virtual reality based paint spray training system». *2007 IEEE Virtual Reality Conference*: 289-290. <https://doi.org/10.1109/VR.2007.352506>.
- Zender, Raphael, Matthias Weise, Markus von der Heyde, und Heinrich Söbke. 2018. «Chancen und Herausforderungen beim Lernen und Lehren mit VR/AR-Technologien». *DeLFI - Die 16. E-Learning Fachtagung Informatik*: 275-276. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2018-229913>.
- Zender, Raphael, Pia Sander, Miriam Mulders, Matthias Weise, Ulrike Lucke, und Michael Kerres. 2019. «HandLeVR: Action-Oriented Learning in a VR Painting Simulator». *International Symposium on Emerging Technologies for Education*: 46–51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38778-5_6.
- Zender, Raphael, und Matthias Weise. 2020. «VR-Lernumgebungen am Beispiel der Lackierwerkstatt im Projekt HandLeVR». *Proceedings of DELFI Workshops 2020*: 19-30. <https://doi.org/10.18420/delfi2020-ws-103>.