

Forschungsplattform „Experimentelle Modulare Montageanlage“

Konzept für eine Smartphone-basierte VR-Lernumgebung

K. Rüstmann, K. Tracht

Durch die zunehmende Digitalisierung in produzierenden Unternehmen verändern sich die Prozesse und damit auch die Anforderungen an die Mitarbeiter. In diesem Beitrag wird exemplarisch an der kollaborativen Robotik das Konzept einer Lernfabrik vorgestellt, die dezentral mittels Virtual Reality auf einem (privaten) mobilen Endgerät erlebt werden kann. Um dem Nutzer auch auf begrenzter Hardware eine immersive und interaktive Lernumgebung zu bieten, enthält das Konzept Elemente wie Streaming-Technologien und Hand-Tracking.

STICHWÖRTER

Virtual Reality, Automatisierung, Mensch und Technik

Concept of a smartphone-based VR-Learning Environment

The increasing digitalisation in manufacturing companies is changing the processes and thus also the demands on employees. This article uses collaborative robotics as an example to present the concept of a learning factory that can be experienced decentrally via virtual reality on a (private) mobile device. In order to offer the user an immersive and interactive learning environment even on limited hardware, the concept includes elements such as streaming technologies and hand tracking.

1 Einleitung

Die verarbeitende Industrie ist ein Motor für Wirtschaftswachstum, Wohlstand und damit auch für einen höheren Lebensstandard. Ein wesentliches Wertschöpfungspotenzial digitaler Technologien in der Lieferkette liegt in der Optimierung von Prozessen. Dies ist fast immer mit dem Ziel der Kostensenkung verbunden. Die Steigerung der Effizienz und Effektivität von Prozessen ist nach wie vor häufig einer der wichtigsten Treiber für den Einsatz neuer Technologien [1]. Die Herausforderungen der demografischen Entwicklung, der Globalisierung und der neuen Anforderungen der Märkte machen deutlich, dass der Mensch in den Mittelpunkt der Produktion gestellt werden muss, anstatt sich nur auf den technologischen Fortschritt zu konzentrieren [2]. Für Unternehmen und ihre Beschäftigten ergeben sich durch die zunehmende Automatisierung und Digitalisierung der Produktion Herausforderungen im Bereich der Mitarbeiterqualifizierung: Industrie 4.0 erfordert ein vielfältiges und hohes Maß an digitalen Kompetenzen. Dazu gehören der Umgang mit modernen Schnittstellen sowie die Flexibilität, sich auf neue Software und Technologien einzustellen [3]. Um die Beschäftigten auf die Veränderungen ihrer Arbeit vorzubereiten, ist eine kontinuierliche Weiterbildung auf allen Ebenen der Belegschaft erforderlich [4]. Dies gilt auch für die Mitarbeitenden in den Werkshallen. Während einfache Aufgaben immer mehr automatisiert werden, fallen die verbleibenden Aufgaben, die Fähigkeiten wie Flexibilität und Kreativität sowie die Fähigkeit, intuitiv zu entscheiden, erfordern, in den Aufgabenbereich der Arbeitnehmer [5]. Als beispielhafte Ausgangsbasis für eine Virtual Reality (VR)-Lernumgebung werden in diesem Beitrag kollaborative Roboter

betrachtet. Sie gelten zwar noch als Nische, aber aktuelle Forschungen zeigen, dass sie ein hohes Potenzial für die Unterstützung des Menschen und wirtschaftliche Verbesserungen haben und daher als Schlüsseltechnologie der Industrie 4.0 gelten. Ein großes Problem, das viele Anwendungen der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) davon abhält, ihren Weg in die Industrie zu finden, ist jedoch die Sicherheit [6]. Für den sicheren Einsatz von kollaborativen Robotern sind geschulte Mitarbeiter auf der Fertigungsebene erforderlich. Die Planung und Schulung von kollaborativen Montageaufgaben kann in einer Simulation unterstützt und validiert werden, die eine virtuelle Umgebung nutzt, die auf dem digitalen Zwilling der gesamten Montagestation einschließlich des Roboters basiert. Ein großer Vorteil der Trennung zwischen physischem Roboter und virtuellem Zwilling ist die Programmierung des Roboters, ohne in den eigentlichen Produktionsprozess einzugreifen. Selbst ein ungelerner Mitarbeiter kann im Rahmen von MRK Anwendungsfälle sicher testen, ohne mit dem physischen Modell des Roboters, der in der Produktion läuft, zu interagieren [7]. Dies ermöglicht Unternehmen ein sicheres und anpassungsfähiges Testen neuer Technologien. Durch den sicheren Umgang mit kollaborativen Robotern können Ängste abgebaut und Potenziale aufgezeigt werden.

In der Forschung wurden bereits einige virtuelle Lernfabriken im Bereich MRK vorgestellt: *Smith et al.* stellen eine VR-Plattform vor, die es Auszubildenden ermöglicht, die Rolle eines dreidimensionalen Avatars zu übernehmen und voraufgezeichnete Bewegungen und verbale Anweisungen eines Trainers zu befolgen [8]. *Perez et al.* präsentieren eine Architektur für einen VR-Roboter-Controller, der das Training mit einem Roboter ermöglicht, der gleichzeitig in einer sicheren Umgebung getestet wird [9]. *Matas*

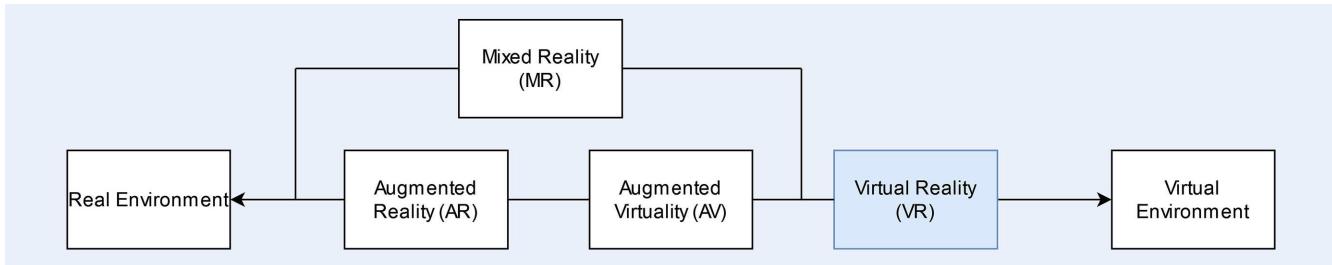


Bild 1. Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum. Grafik: adaptiert von [14], ursprünglich [16]

et al. verfolgen die Körperbewegungen des Benutzers eines Head Mounted Display (HMD), um mehrere Aufgaben mit einem kolaborativen Roboter in einer virtuellen Fabrikumgebung durchzuführen [10]. Sievers et al. bauten eine virtuelle Umgebung, um Mitarbeiter in innovativer und kreativer Prozessplanung mithilfe von Augmented Virtuality (AV) zu schulen [11]. Alle skizzierten Ansätze basieren auf HMDs. Einen alternativen Ansatz bietet die mobile virtuelle Realität (MVR) auf Smartphones in einer einfachen Halterung. Diese sind praktisch in jedem Haushalt vorhanden und bieten eine niedrigschwellige Alternative zu teurer VR-Hardware. Im medizinischen Bereich wird MVR bereits häufig in der Ausbildung eingesetzt. Bei medizinischen Kursen war MVR genauso effektiv wie Desktop-basierte VR, führte aber schneller zu Cybersickness und Schwindelgefühl [12] und verursachte Probleme bei der Navigation innerhalb der VR-Umgebung [13]. Smith et al. kommen zu dem Schluss, dass MVR als Plattform für die Berufsausbildung dazu beitragen kann, ressourceneffizienter in Bezug auf die Maschinenbelegung und die Arbeitszeit der Lehrkräfte zu sein. Insbesondere in Zeiten wie der COVID-Pandemie [14]. In diesem Beitrag wird ein Framework für eine mobile VR-Lernfabrik vorgestellt, die trotz der begrenzten Hardware eines Smartphones größtmögliche Immersion bietet. Dadurch ermöglicht sie es Mitarbeitern (unabhängig vom Arbeitgeber), erste Erfahrungen im Bereich MRK zu sammeln und damit Ängste und Sorgen abzubauen oder auch komplexere Schulungen durchzuführen, ohne teure Geräte anschaffen zu müssen. Dabei wird sich die technologische Entwicklung des „Remote Renderings“, welches als sehr vielversprechend im Bereich VR-Anwendungen angesehen wird [15], zu Nutze gemacht.

2 VR-Trainingsumgebung

Unter dem Oberbegriff Extended Reality (XR) werden VR, Mixed Reality (MR), Augmented Reality (AR) und die dazwischen liegenden Bereiche wie AV zusammengefasst. Milgram und Kishino führten 1994 den Begriff der „Mixed Reality“ ein [16]. In **Bild 1** ist das sogenannte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum dargestellt. Am einen Ende des Kontinuums befindet sich die reale Welt, am anderen Ende die computersimulierte Umgebung „Virtual Reality“. Sie verschiebt die Wahrnehmung des Benutzers vollständig von der realen Welt in eine ähnliche oder völlig andere virtuelle Welt. Eine virtuelle Realität, die durch reale Elemente wie haptisches Feedback ergänzt wird, nennt man „Augmented Virtuality“. Wenn reale Objekte und Umgebungen mit der realen Welt vermischt werden, spricht man von „Augmented Reality“: Der Benutzer sieht seine reale Umgebung zusammen mit compu-

tergenerierten Informationen. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf einem Framework für eine VR-Umgebung.

Eine VR-Erfahrung sollte ein hohes Maß an Immersion bieten, um realistische Arbeitsbedingungen darzustellen. Der Begriff „Immersion“ unterscheidet sich vom Begriff „Präsenz“, der die subjektive Wahrnehmung des Benutzers widerspiegelt, in einer nicht-physischen Welt physisch anwesend zu sein. Sie ist von Person zu Person unterschiedlich [17]. Um ein angenehmes Nutzererlebnis und eine möglichst hohe Immersion zu erzeugen, müssen VR-Systeme drei kritische Punkte erfüllen [18]:

- Reaktionsfähigkeit: Die Latenzzeit sollte unter 10–25 ms liegen, um ein gutes Nutzererlebnis zu ermöglichen.
- Hochwertige visuelle Effekte: Die vom VR-System gerenderten Szenen sollten fotorealistisch sein und hohe Bildwiederholraten bieten, wobei 60 Bilder pro Sekunde die Mindestanforderung sind.
- Mobilität: Das VR-System sollte ungebunden sein, um ein optimales VR-Erlebnis zu bieten, so dass sich der Benutzer frei bewegen kann, ohne Angst zu haben, zu stolpern.

MVR erfüllt einen dieser Punkte, die Mobilität, vollständig. Für die qualitativ hochwertige Darstellung von Inhalten, ohne auf die begrenzte Hardware des Smartphones Rücksicht nehmen zu müssen, soll das Remote-Rendering zum Einsatz kommen. Das bedeutet, dass die hohe Rendering-Last auf einen leistungsfähigen Server ausgelagert wird und die gerenderten Bilder dann über ein drahtloses Netzwerk auf das Smartphone gestreamt werden. Dies führt zum dritten Punkt und gleichzeitig zum Flaschenhals dieser Technologie: die Reaktionsfähigkeit. Das System muss über eine sehr gute Internetverbindung verfügen oder alternativ eine Möglichkeit haben, Verbindungsverluste oder eine vorübergehend niedrige Qualität der Internetverbindung auszugleichen, um eine niedrige Latenzzeit aufrechtzuerhalten und Motion Sickness beim Nutzer zu vermeiden.

Die am Bremer Institut für Maschinenbau (bime) als Forschungsplattform und Lernfabrik entwickelte „Experimentelle Modulare Montageanlage“, kurz EMMA bildet die Grundlage der virtuellen Trainingsumgebung. Diese ermöglicht den Kompetenzaufbau im Bereich der Montageplanung und -durchführung. Sie besteht aus rekonfigurierbaren, autonomen Teilmustern und bildet damit die Anforderungen einer wandlungsfähigen Produktion ab. Da sie digital verfügbar und in die VR-Umgebung integriert, aber auch physisch vorhanden ist (siehe **Bild 2**), ist ein Vergleich zwischen der virtuellen Lernfabrik und der Schulung am realen Objekt möglich [19]. Damit können Vergleiche zwischen Auszubildenden, die in der realen Anlage ausgebildet wurden, solchen, die mit konventioneller VR ausgebildet wurden und solchen, die mit MVR ausgebildet wurden, gezogen werden.

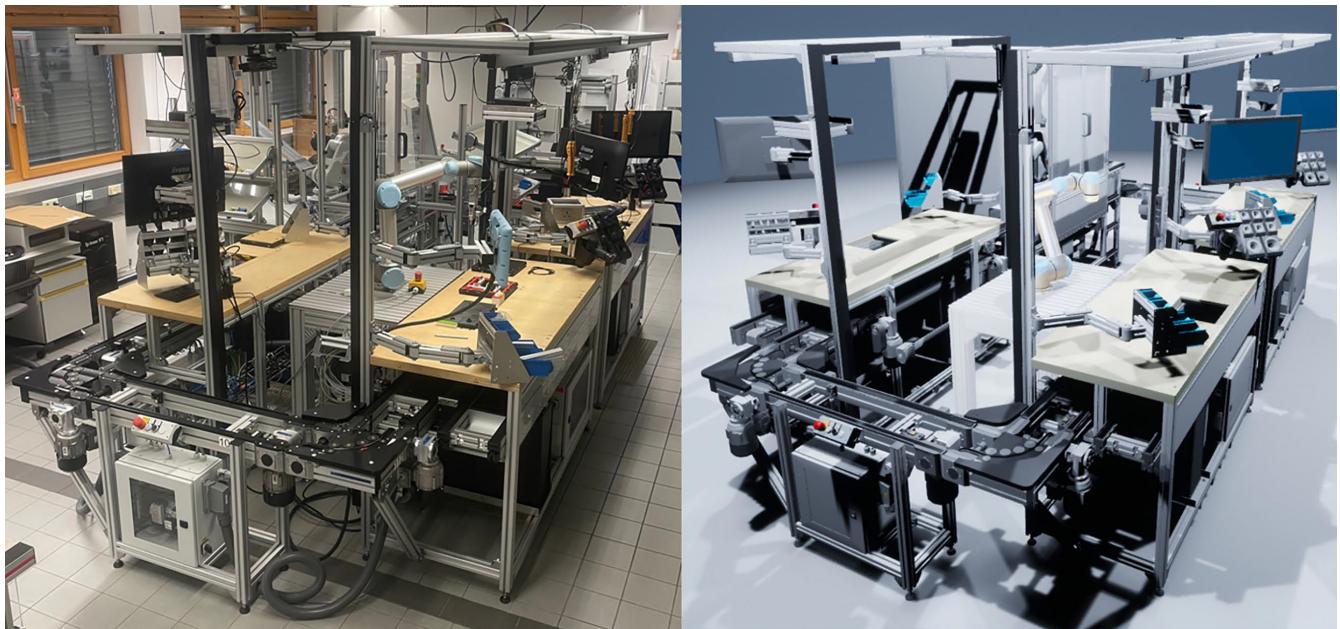


Bild 2. Experimentelle Modulare Montageanlage im bime (links) und in der UE (rechts). Foto und Grafik: bime

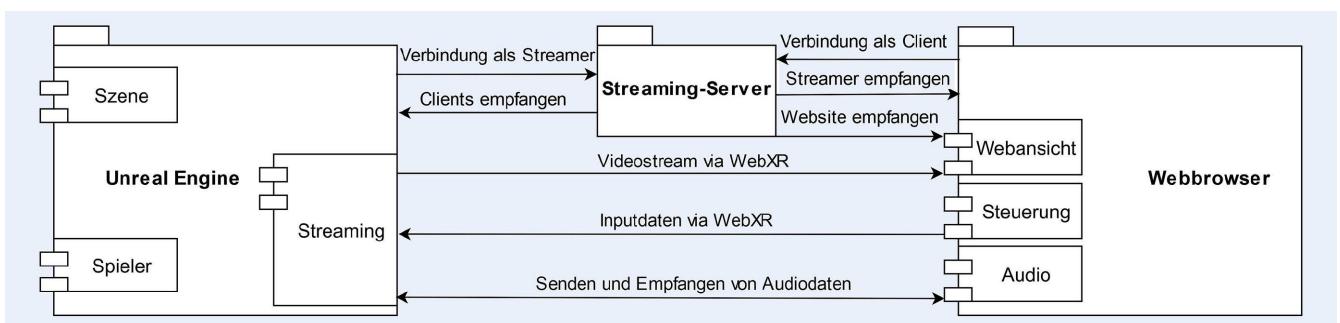


Bild 3. Streaming-Architektur. Grafik: bime

3 Technisches Konzept

Das Grundkonzept, das es verschiedenen Akteuren ermöglicht, auf der vorgestellten Plattform zu interagieren, bietet mehrere Einsatzmöglichkeiten, eine Trainingsumgebung zu initialisieren und darin zu interagieren. Zum einen kann der Ausbilder der Initiator einer Schulung in der Schulungsumgebung sein. Er startet die Sitzung und lädt einen oder mehrere Schulungsteilnehmer ein, indem er einen Link zu der von ihm erstellten Sitzung sendet. Die Teilnehmer können dann, nachdem sie sich eingeloggt haben, die Bewegungen des Ausbilders nachvollziehen sowie sprachlich mit ihm kommunizieren. Dies erlaubt dem Ausbilder, wichtige Schritte in der virtuellen Umgebung zu beschreiben oder eine virtuelle Anlage zu erläutern.

Wurden die Auszubildenden eingewiesen, kann die Steuerung in der Sitzung an einen Teilnehmer übertragen werden. Die Teilnehmer haben so die Möglichkeit in der gleichen Umgebung ebenfalls zu trainieren und mit Akteuren zu interagieren. Akteure sind definiert als (kollaborative) Roboterarme oder Module der EMMA. Im Falle des Roboters bedeutet dies die Manipulation des TCP (Tool Center Point), das Öffnen und Schließen des Greifers und das Anlernen (Teachen) von Trajektorien mithilfe von Wegpunkten. Im Falle der modularen Montageanlage bedeutet dies das Anhalten und Starten des Werkstücktransports sowie das

Beladen der Werkstückträger an den einzelnen Montagestationen. Im zweiten Anwendungsfall startet der Auszubildende das Training selbst und führt ein Trainingsszenario ohne Trainer durch.

3.1 Streaming

Der detaillierte Streaming-Aufbau kann wie in Bild 3 dargestellt in drei Pakete unterteilt werden. Die Basis der virtuellen Umgebung wird von der Unreal Engine (UE) 5 bereitgestellt. Das UE-Paket enthält alle relevanten Spieldaten und Objekte, mit denen ein Spieler interagieren kann. Das UE-Paket kann entweder in einer lokalen Umgebung oder online ausgeführt werden und stellt mithilfe der in UE bereitgestellten Pixelstreaming-Technologie eine Verbindung zu einem Streaming-Server her. Der Streaming-Server muss sowohl vom UE-Paket als auch von Webbrowsern aus erreichbar sein. Der Streaming-Server wartet darauf, dass beide Pakete eine Verbindung herstellen und sendet die Verbindungsinformationen an die andere Partei, damit diese eine direkte Verbindung herstellen kann. Dadurch wird eine direkte Verbindung zwischen dem UE-Paket und dem Webbrowser hergestellt. Wenn ein weiterer Webbrowser eine Verbindung herstellt, wird dieser Schritt wiederholt.

Das Streaming-Modul innerhalb des UE-Moduls empfängt die Eingaben vom Webbrowser und leitet sie entweder an einen

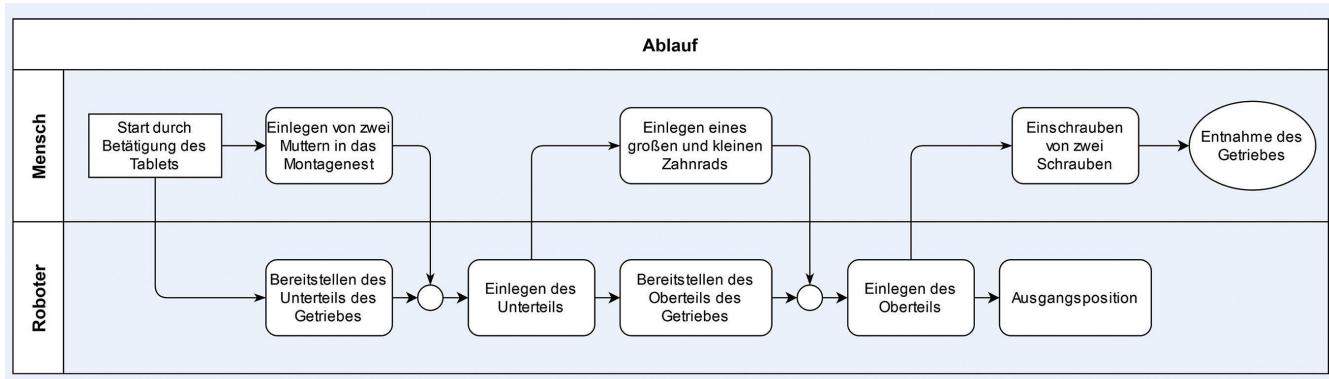


Bild 4. Montageablauf des Weiterbildungsszenarios. *Grafik: bime*

Spieler oder einen Roboter weiter. Durch die Bereitstellung mehrerer Webzugänge für den Trainer, den Nutzer und die Robotersteuerung, die jeweils auf dem Streaming-Server-Paket gehostet werden, kann sich der Benutzer in der gewünschten Rolle verbinden.

Momentan sind im verwendeten Streaming-Server eine „Nvidia RTX 4070“ und 256 GB RAM verbaut. Hinter einer Endian Firewall kann der Server auf einen Up- und Downstream von 1 GBe zurückgreifen. Das Bottleneck dieser Infrastruktur sind bei der Betrachtung von nur einer Session der Up- und Downstream, welche den in Kapitel 2 unter dem Punkt Reaktionsfähigkeit geforderten Ping von 10–25 ms nicht erfüllen können. Aufgrund dessen wird der Standort des Servers verändert, um einen Up- und Downstream von 10 GBe zu ermöglichen. Die Punkte hochwertige visuelle Effekte und Mobilität werden erfüllt. Möchte man mehrere Sessions gleichzeitig auf dem Server starten, muss auch die Grafikleistung erhöht werden.

3.2 Interaktion

Um einen Akteur in VR über einen Webbrowser effektiv steuern zu können, wird WebXR [20] verwendet, um die Tracking-Informationen oder die Position des Headsets zu erhalten und über den WebRTC-Stream an UE [21] weiterzugeben. Für die Interaktion mit der VR-Umgebung kann ein Handtracking eingesetzt werden, das ohne zusätzliche Hardware, also nur mit der Kamera des Smartphones, funktioniert. *Qian et al.* schlagen eine Methode für eine Smartphone-basierte Freihandmanipulation für AR vor, die jedoch auf zusätzliche Hardware in Form eines Leap Motion Gerätes angewiesen ist [22]. *Jiang et al.* verfolgen die Position von einer oder zwei Händen, indem sie das Smartphone in ein aktives Sonarsystem verwandeln. Diese Methode ist jedoch nicht für alle Smartphone-Modelle geeignet und kann nur wenige Handtrajektorien zuverlässig erkennen [23]. *Zhang et al.* bieten eine geräteinterne Echtzeit-Methode zur Handverfolgung, die mit nur einer RGB-Kamera auf einem mobilen Gerät arbeitet. Sie ist open-source und über Googles MediaPipe, welches mittels Machine Learning Framework die Position und Pose der Finger ermittelt, implementiert [24, 25]. Das Handtracking Modell wird mit Hilfe eines an die Bedürfnisse dieses Konzepts angepassten, open-source erhältlichen C++ Plugins (ue4-medaiapipe-plugin) in der UE implementiert. Der Handtracking-Algorithmus liefert 21 2D-Markierungen für jede Hand. Außerdem erkennt er, ob die erkannte Hand die linke oder rechte Hand des Benutzers ist. Mithilfe des Animationssystems der UE kann aus den 2D-Markern

ein animiertes Modell einer Hand abgebildet werden. Diese Hand kann dann anstelle eines Controllers genutzt werden um mit Objekten zu interagieren und sie zu greifen. Um auch die Berechnungen des Algorithmus auf den Server auszulagern, müssen Kamerasdaten des mobilen Endgeräts per Pixelstreaming an die UE gesendet werden. Dieser Part befindet sich noch in Entwicklung.

4 Weiterbildungsszenario

Die entwickelte virtuelle Trainingsumgebung bietet einen Tutoriallevel, der spielerisch die Steuerung in der Umgebung abhängig vom genutzten Endgerät erklärt. Des Weiteren ist er mit Inhalten zum sicheren Umgang mit kollaborativen Robotern sowie Informationen zur Aufklärung des Nutzens dieser Roboter angereichert. Hat der Nutzer diesen Level durchlaufen, können Weiterbildungsszenarien ausgewählt werden, in denen verschiedene Aspekte der Arbeit mit und Inbetriebnahme von kollaborativen Robotern erlernt werden können. Das Szenario, das auch an der realen Anlage im Laborversuch durchgeführt werden kann ist ein Montageszenario, in dem ein kleines Getriebe mithilfe eines Universal Robot 5 (UR5) montiert wird. Für den UR5 wurden die inverse sowie direkte Kinematik per C++-Plugin in die Engine implementiert, so dass er die gleichen Bewegungen ausführt wie der echte Roboter. Ebenfalls implementiert ist eine Schnittstelle zum Robot Operation System (ROS), die der Übertragung von Achswinkeln und Positionsdaten des TCPs vom virtuellen zum realen Roboter dient. Somit kann ein in der Virtualität programmiertes Szenario auf den realen Roboter überführt werden. Der Nutzer bekommt auf einem Bildschirm der EMMA die auszuführenden Montageschritte angezeigt und führt diese Schritte darauffolgend zusammen mit dem kollaborativen Roboter aus. Dazu müssen die Teile des Getriebes in der richtigen Orientierung an den korrekten Ort geführt werden. Die Engine erkennt dies und lässt die Teile an die richtige Position schnappen. Während der Nutzer seine Montageschritte ausführt stellt der Roboter weitere Bauteile bereit und bekommt, sobald der Nutzer seinen Montageschritt fertiggestellt hat, durch die Bedienung des zum Roboter gehörenden Tablets das Signal das Teil der Baugruppe hinzuzufügen. Schrauben können mit Hilfe eines eingebundenen Akkuschraubers befestigt werden. In **Bild 4** ist der Montageablauf detailliert dargestellt. In einem anspruchsvolleren Szenario wird dem Nutzer beigebracht, den Roboter so zu programmieren, dass er die zur Montage benötigten Bauteile bereitstellen kann. Dazu programmiert der Nutzer im Teach-In-Verfahren Wegpunkte des Roboters indem er den Endeffektor des

UR5 zu gewünschten Positionen führen kann. In einem Menü kann er wählen, ob es sich um einen Weg-, Halte oder Greifpunkt handeln soll.

Das Montageszenario kann zusätzlich mit Gamification-Elementen wie einem Punktesystem und Sounds bei Abschluss von Aufgaben erweitert werden, um den Effekt dieser Elemente auf die Motivation des Nutzers das Szenario durchzuführen zu untersuchen. Des Weiteren wird eine Studie durchgeführt die die Unterschiede in der Durchführung eines Weiterbildungsszenarios mit Hilfe des Streaming-Ansatzes auf einem Smartphone zu einem klassischen HMD untersucht. Dazu werden sowohl die Usability mithilfe des System Usability Scale (SUS) [26], die Akzeptanz mithilfe des Technology Acceptance Models (TAC) [27] sowie die Arbeitsbelastung mithilfe des NASA Task Load Index (NASA-TLX) [28] verglichen. Außerdem werden quantitative Parameter wie die Montagezeit und -fehler untersucht. Dazu wird die Montage von den Probanden nach Durchlaufen des Weiterbildungsszenarios an der realen EMMA durchgeführt.

5 Diskussion

Der Wandel in der Fertigung im Zuge von Industrie 4.0 bringt neue Herausforderungen für Beschäftigte auf allen Ebenen mit sich. Insbesondere kollaborative Roboter erfordern eine umfassende Schulung der Mitarbeiter in der sicheren Zusammenarbeit und Inbetriebnahme dieser. Dieser Beitrag beschreibt ein Framework für eine mobile Virtual-Reality-Umgebung im Bereich der MRK. Der virtuelle Ansatz, der auf niedrigschwelliger Hardware nutzbar ist, ermöglicht eine dezentral erfahrbare Lernumgebung, die jeder vom eigenen Wohnzimmer aus nutzen kann und die nicht nur für MRK-Anwendungen geeignet ist, sondern auch auf andere Bereiche ausgedehnt werden kann, in denen eine niedrigschwellige Ausbildung benötigt wird. Durch den Remote-Rendering-Ansatz in Verbindung mit WebRTC/XR wird auf der Nutzerseite lediglich ein Smartphone mit einem Webbrowser zur Darstellung der Webansicht (setzt eine Internetverbindung voraus) und ein Gyroskop zur Erfassung der Kopfbewegungen benötigt. Dies stellt eine Universalität dar, die es in VR-Lernszenarien mit diesem grafischen Niveau und der damit verbundenen Immersion noch nicht gibt. Es können viel mehr Nutzer erreicht werden als mit Lernumgebungen, die nur mithilfe eines HMD in Kombination mit einem leistungsstarken Computer bedient werden können. Darüber hinaus bietet das Framework eine tageszeitunabhängige Zugänglichkeit, unabhängig vom Arbeitgeber, wobei zu untersuchen ist, welche Elemente innerhalb des Trainings einen Nutzer motivieren, ein solches Training außerhalb seiner beruflichen Tätigkeit durchzuführen.

FÖRDERHINWEIS

Das Projekt „Künstliche Intelligenz für maßgeschneiderte Weiterbildung zur Stärkung der Beschäftigungsfähigkeit bei fortschreitender digitaler Durchdringung der Produktion im Kontext von Industrie 4.0“ (KIWI), Förderkennzeichen 21IN-VI25) wird vom BMBF und BIBB im Rahmen des Innovationswettbewerbs INVITE gefördert.

L i t e r a t u r

- [1] Hoberg, K.; Petersen, M.; Heinen, J.: Die Implikationen digitaler Technologien für die Supply Chain 4.0, in: Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019, pp. 165–187
- [2] Wolf, M., et al.: Current and future industrial challenges: demographic change and measures for elderly workers in industry 4.0, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara 16.1 (2018) S. 67–76
- [3] Ozkan-Ozen, Y.D.; Kazancoglu, Y.: Analysing workforce development challenges in the Industry 4.0, IJM 43 (2022) pp. 310–333. <https://doi.org/10.1108/IJM-03-2021-0167>
- [4] Doherty, O.; Stephens, S.: The skill needs of the manufacturing industry: can higher education keep up?, ET 63 (2021) S. 632–646. <https://doi.org/10.1108/ET-05-2020-0134>
- [5] Prinz, C.; Morlock, F.; Freith, S.; Kreggenfeld, N.; Kreimeier, D.; Kuhlenkötter, B.: Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0, Procedia CIRP 54 (2016) S. 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.105>
- [6] Kofer, D.; Bergner, C.; Deuerlein, C.; Schmidt-Vollus, R.; Heß, P.: Human–robot-collaboration: Innovative processes, from research to series standard, Procedia CIRP 97 (2021) S. 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.185>
- [7] Rückert, P.; Meiners, F.; Tracht, K.: Augmented Reality for teaching collaborative robots based on a physical simulation, in: Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, pp. 41–48
- [8] Smith, J.W.; Salmon, J.L.: Development and analysis of virtual reality technician-training platform and methods., Proceedings of the Inter-service/Industry Training, Simulation and Education Conference (I/IT-SEC) (2017)
- [9] Pérez, L.; Diez, E.; Usamentiaga, R.; García, D.F.: Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces, Computers in Industry 109 (2019) S. 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.05.001>
- [10] Matsas, E.; Vosniakos, G.-C.; Batras, D.: Modelling simple human–robot collaborative manufacturing tasks in interactive virtual environments. In: Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference, ACM, New York, NY, USA, 2016
- [11] Sievers, T.S.; Neumann, F.; Tracht, K.: Augmented Virtuality in a Digital Learning Factory for Collaborative Robotics, Proceedings of the Conference on Learning Factories (CLF) (2021). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3858350>
- [12] Moro, C.; Stromberga, Z.; Stirling, A.: Virtualisation devices for student learning: Comparison between desktop-based (Oculus Rift) and mobile-based (Gear VR) virtual reality in medical and health science education, AJET 33 (2017). <https://doi.org/10.14742/ajet.3840>
- [13] Birt, J.; Stromberga, Z.; Cowling, M.; Moro, C.: Mobile Mixed Reality for Experiential Learning and Simulation in Medical and Health Sciences Education, Information 9 (2018) 31. <https://doi.org/10.3390/infor9020031>
- [14] Smith, E.; McRae, K.; Semple, G.; Welsh, H.; Evans, D.; Blackwell, P.: Enhancing Vocational Training in the Post-COVID Era through Mobile Mixed Reality, Sustainability 13 (2021) p. 6144. <https://doi.org/10.3390/su13116144>
- [15] Cheng, R.; Wu, N.; Varvello, M.; Chen, S.; Han, B.: Are we ready for metaverse?, In: C. Barakat, C. Pelser, T.A. Benson, D. Choffnes (Eds.), Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference, ACM, New York, NY, USA, 2022, pp. 504–518
- [16] Milgram, P.; Kishino, F.: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems E77-D (1994) pp. 1321–1329
- [17] Slater, M.; Usoski, M.; Steed, A.: Taking steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality, ACM Trans. Comput.-Hum. Interact. 2 (1995) pp. 201–219. <https://doi.org/10.1145/210079.210084>
- [18] Lai, Z.; Hu, C.Y.; Cui, Y.; Sun, L.; Dai, N.: Furion: Engineering high-quality immersive virtual reality on today's mobile devices, Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (2017) pp. 409–421
- [19] Sievers, T. S.; Schmitt, B.; Rückert, P.; Petersen, M.; Tracht, K.: Concept of a Mixed-Reality Learning Environment for Collaborative Robotics, Procedia Manufacturing 45 (2020) pp. 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.034>
- [20] Jones, B.; Goregaokar, M.; Cabanier, R.: WebXR Device API, 2022. Internet: www.w3.org/TR/webxr/. Zugriff am 18. November 2022
- [21] Jennings, C.; Bruaroey, J.-I.; Boström, H.: WebRTC 1.0: Real-Time Communication Between Browsers, 2021. Internet: www.w3.org/TR/webrtc/. Zugriff am 18. November 2022
- [22] Qian, J.; Ma, J.; Li, X.; Attal, B.; Lai, H.; Tompkin, J.; Hughes, J.F.; Huang, J.: Portal-ble: Intuitive Free-hand Manipulation in Unbounded

- Smartphone-based Augmented Reality. In: Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, New York, NY, USA, 2019
- [23] Jiang, H.; Wang, M.; Liu, D.; Zhou, S.: CTrack: Acoustic Device-Free and Collaborative Hands Motion Tracking on Smartphones, IEEE Internet Things J. 8 (2021) 14658–14671. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3071287>
- [24] Lugaresi, C.; Tang, J.; Nash, H.; McClanahan, C.; Uboweja, E.; Hays, M.; Zhang, F.; Chang, C.-L.; Yong, M.G.; Lee, J.; Chang, W.-T.; Hua, W.; Georg, M.; Grundmann, M.: MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines, arXiv, 2019
- [25] Zhang, F.; Bazarevsky, V.; Vakunov, A.; Tkachenko, A.; Sung, G.; Chang, C.-L.; Grundmann, M.: MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking, 2020
- [26] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, Usability and evaluation in industry (1996) pp. 189–194
- [27] Venkatesh, V.; Bala, H.: Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions, Decision Sciences 39 (2008) pp. 273–315. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x>
- [28] Hart, S.G.; Staveland, L.E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Advances in Psychology, Elsevier, 1988, pp. 139–183

Kenneth Rüstmann 

Foto: Autor

Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht 

Foto: Sabine Nollmann

Universität Bremen
bime | Bremer Institut für Strukturmechanik
und Produktionsanlagen
Badgasteiner Str. 1, 28359 Bremen
Tel. +49 421 / 218-64832
ruestmann@bime.de
www.bime.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatzt steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)