

Peer Review: 04.02.2019

# Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality ...

... auf Basis einer Digital-Twin-as-a-Service-Plattform

Marc Schnierle, Christopher Polak, Sascha Röck, Virtual Automation Lab (VAL) - Hochschule Esslingen

*Digitale Zwillinge für die Inbetriebnahme, Programmierung und Überwachung von Robotern finden im Maschinenbau immer breitere Anwendung. Bislang werden dafür kaum moderne Visualisierungstechnologien wie Augmented-, Mixed- oder Virtual-Reality-Methoden eingesetzt, obwohl damit neue Formen der Interaktion zwischen der Realität und dem Digitalen Zwilling möglich sind. Zurückzuführen ist dies unter anderem auf die plattform- und endgerätespezifische Entwicklung der Anwendungen sowie eine fehlende Vernetzung zwischen modernen Endgeräten, der Steuerungsebene und den Digitalen Zwillingen. Dieser Beitrag adressiert die beschriebenen Hemmnisse und schlägt als Lösung ein Konzept zur Modellierung, Ausführung und Bereitstellung von Digitalen Zwillingen in einer Digital-Twin-as-a-Service-Plattform vor. Die plattformunabhängige Interaktion zwischen Mensch und Simulationsmodell wird dabei durch eine Abstraktionsschicht sichergestellt. Das Konzept wird am Beispiel eines interaktiven, realdatengetriebenen Digitalen Zwillings eines kollaborativen Zweiarm-Roboters verifiziert.*

#Mensch-Roboter-Interaktion #mixed Reality #Digitaler Zwilling

## Human-robot interaction in mixed reality

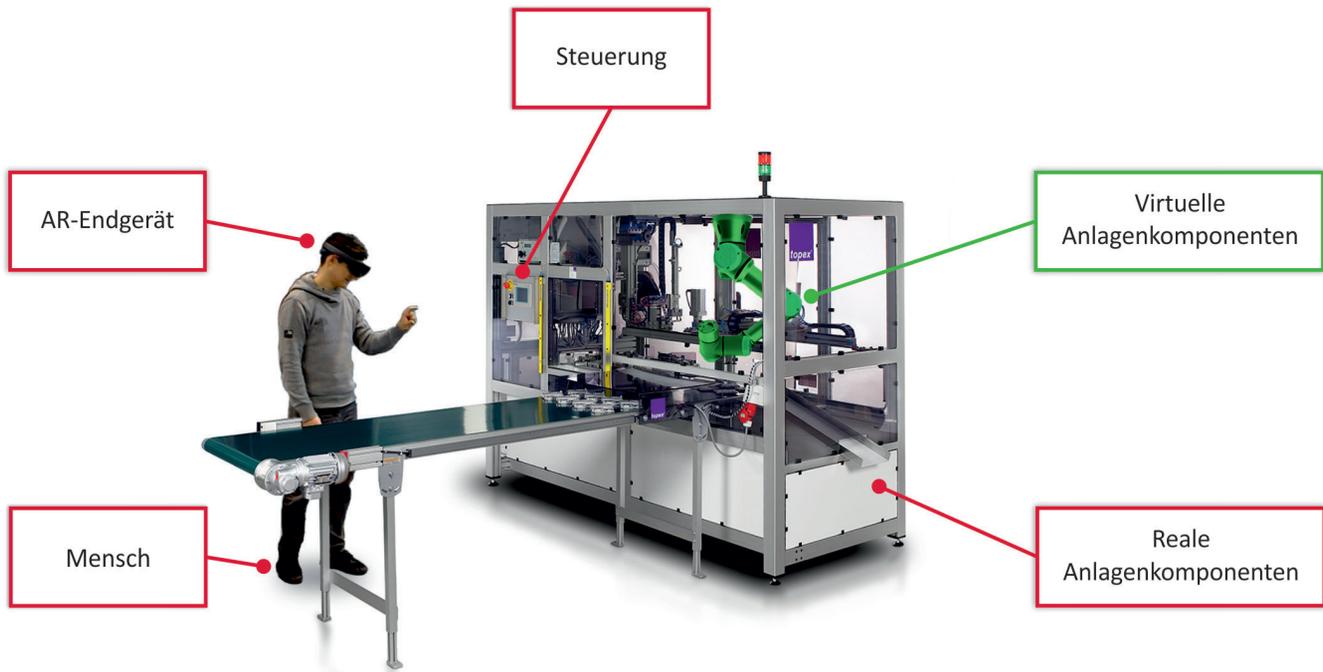
'Digital twin as a service' platform

*Digital twins are increasingly being used in mechanical engineering for the commissioning, programming and monitoring of robots. Although new forms of interaction between reality and the digital twin are possible, hardly any modern visualization technologies have been used, such as augmented, mixed or virtual reality methods. This is due in part to the platform- and device-specific development of the applications and the lack of networking between modern devices, the control level, and the digital twins. This paper proposes a solution for the modelling, execution and provision of digital twins in a 'Digital twin as a service' platform. The platform-independent interaction between humans and the simulation model is ensured by an abstraction layer. The concept is verified using the example of an interactive, real data driven digital twin of a collaborative two-arm robot.*

#human-robot interaction #mixed reality #digital twin

Prognosen der International Federation of Robotics sagen eine stark steigende Anzahl von Robotern in der Produktionstechnik voraus [1]. Insbesondere den kooperativen und kollaborativen Robotern wird eine wachsende Bedeutung zugesprochen. Gleichmaßen nimmt der Einsatz von Digitalen Zwillingen zur Programmierung oder zur virtuellen Inbetriebnahme solcher Systeme vermehrt zu [2], weil dadurch Steuerungssysteme ohne reale Roboter auf Basis von 3D-Simulationen ausgelegt und überprüft werden können. Da durch den Begriff *Digitaler Zwilling* der Umfang der digitalen Repräsentation des realen Systems nicht dokumentiert ist und dieser in der Regel auf das jeweilige Einsatzgebiet reduziert wird, soll in diesem Beitrag unter dem Begriff *Digitaler Zwilling* die digitale Repräsentation der Geometrie und des kinematischen Verhaltens auf Basis realer Steuerungs- und Sensordaten verstanden werden.

Die Anwendungen werden dabei durch konventionelle Computergrafik-Technologien dominiert. Die Digitalen Zwillinge werden in einer dreidimensionalen, vom Betrachter unabhängigen (exozentrischen) Perspektive in einer zweidimensionalen Projektion auf Monitoren dargestellt [3]. Außerdem führt die zweidimensionale Eingabe mit Maus und Tastatur zu einer limitierten Interaktion ohne immersive Anteile. Ein weiteres Defizit der bestehenden Systeme ist der hohe Modellierungsaufwand, da für eine aussagekräftige Simulation des Robotersystems alle prozess- und kollisionsrelevanten Anlagenbaugruppen bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen. In vielen Fällen fehlen vorab detaillierte Informationen über die Roboterumgebung, was dazu führt, dass einige Fehler erst bei der Inbetriebnahme des Automatisierungssystems aufgedeckt werden können [4]. Neben dem hohen



**Bild 1:** Integration eines virtuellen Industrieroboters in der realen Umgebung durch den Einsatz von Augmented Reality (schematische Darstellung)

Modellierungsaufwand kommt erschwerend hinzu, dass der Mensch und dessen Interaktion mit dem Roboter nicht realitätsnah in klassische Visualisierungssysteme eingebettet werden können.

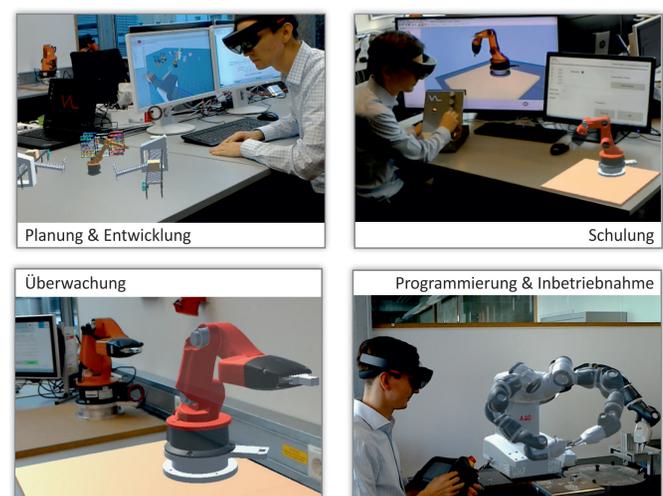
Demgegenüber erlauben moderne Visualisierungstechnologien wie Augmented Reality (AR) die immersive Verschmelzung von virtuellen und realen Inhalten. Die betrachterabhängige (egozentrische) Präsentation ermöglicht dabei die realistische Darstellung der virtuellen Inhalte mit Tiefenwirkung sowie intuitive Interaktionsformen, wie Gestensteuerung. Beispielsweise können, wie in Bild 1 schematisch dargestellt, virtuelle Robotermodelle für den Menschen mittels moderner AR-Endgeräte visualisiert und dadurch direkt in reale Anlagenumgebungen eingebettet werden.

Der Einsatz von modernen Visualisierungstechnologien in der Robotik bietet Potenzial für zahlreiche Anwendungen. Zum Beispiel können realistische Schulungen und Überwachungsaufgaben an virtuellen Robotern im realen Umfeld durchgeführt und Planungs- und Entwicklungstätigkeiten unterstützt werden (siehe Bild 2). Außerdem können Kollisionsbetrachtungen und Prozess-, Arbeitsraum- und Ergonomieoptimierungen im Gegensatz zu den klassischen Darstellungsverfahren an realen Anlagenkomponenten durchgeführt werden und damit die Aussagekraft der Untersuchungen gesteigert werden. Die Möglichkeiten einer intuitiven Mensch-Roboter-Interaktion erlauben des Weiteren neue Formen der Roboterprogrammierung. Insgesamt betrachtet kann neben der Verringerung des Modellierungsaufwands eine visuell verbesserte Systemintegration erreicht werden.

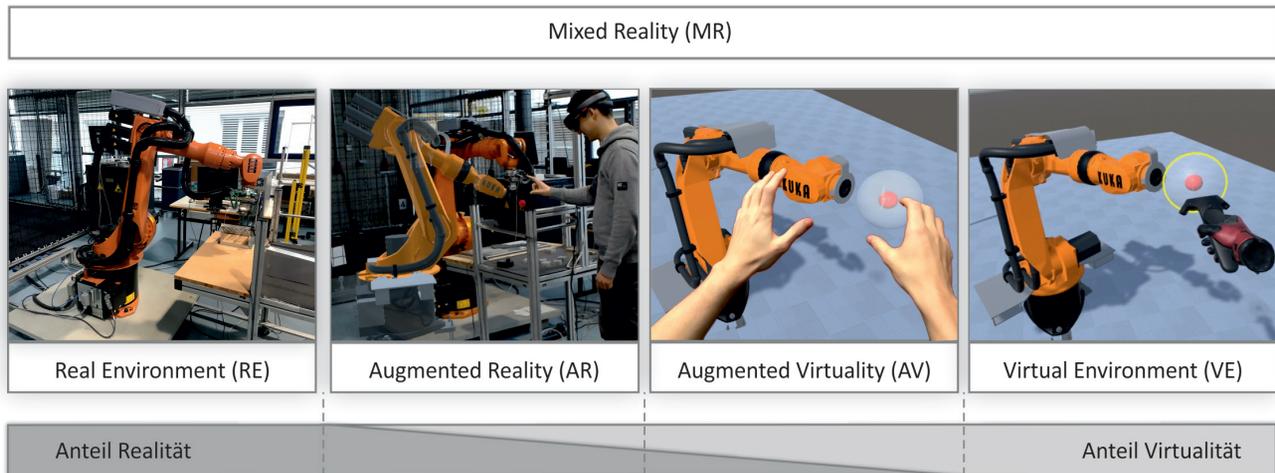
Die Realisierung einer Mensch-Roboter-Interaktion auf Basis moderner Visualisierungsmethoden beinhaltet verschiedenste technologische Herausforderungen. Deshalb wird im Folgenden ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und Technik gegeben, um daraus bestehende Defizite zu ermitteln und Handlungsalternativen ableiten zu können.

## 1. Stand der Forschung und Technik

Unter Augmented Reality versteht man eine rechnerbasierte Methode, mit der die Realität durch digitale (virtuelle) Inhalte erweitert wird. Mittlerweile gibt es zahlreiche Ausbaustufen dieser Technologie, weswegen eine Klassifikation über den Begriff Mixed Reality (gemischte Realität) als sinnvoll erscheint. Milgram postulierte in seinem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum die Mixed Reality als stufenlose Kombination virtueller und realer Komponenten [5]. Entsprechend dem Anteil virtueller Komponenten können vier Hauptgruppen unterschieden werden. In den Extremfällen wird entweder nur die reale Umgebung oder aber die rein virtuelle Umgebung betrachtet. Kombinationen, bei denen die realen Komponenten den maßgeblichen Systemanteil einnehmen, werden unter Augmented Reality eingruppiert. Darstellungen mit umgekehrtem Verhältnis, bei denen die virtuellen Komponenten überwiegen, werden unter Augmented Virtuality klassifiziert (siehe Bild 3).



**Bild 2:** Anwendungsbeispiele von Augmented Reality in der Robotik

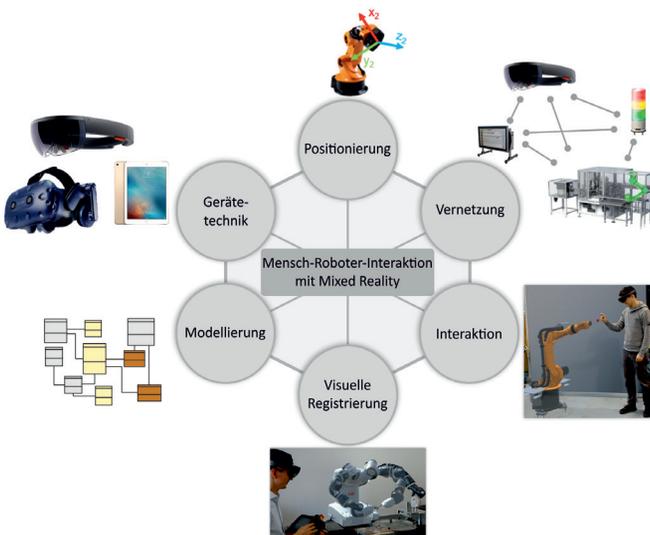


**Bild 3:** Der Übergang von Realität zu Virtualität im Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum

Nach Azuma [6] ist die Kombination von virtuellen und realen Komponenten jedoch noch nicht hinreichend für ein AR-System. Neben der räumlichen Positionierung und Visualisierung von virtuellen Inhalten in eine reale Umgebung gehören die echtzeitfähige Interaktion zwischen Mensch und Modell und die sogenannte dreidimensionale Registrierung zur perspektivisch korrekten Darstellung und Berücksichtigung von Verdeckungen der virtuellen Inhalte ebenfalls dazu. Darüber hinaus muss eine domänenübergreifende Vernetzung geschaffen werden, die unterschiedlichste Teilnehmer vom industriellen Sensor über das Simulationsmodell bis zum mobilen Endgerät einschließt. Weitere Anforderungen lassen sich in der Modellierung des heterogenen Systems und der gerätetechnischen Umsetzung für das industrielle Umfeld feststellen. In Bild 4 sind die Anforderungen an ein Mixed-Reality-System zusammengefasst.

Verschiedene Forschungsarbeiten haben sich mit der Lösung einzelner dieser Anforderungsfelder für den Einsatz von Mixed Reality in der Robotik befasst. So stellen Blankemeyer, Wiemann, Posniak et al. [8] ein AR-System zur Roboterprogrammierung für die Montageunterstützung vor. Dabei

kann ein virtuelles Bauteil per Gestensteuerung bewegt werden. Die neue Bauteilposition wird durch eine Peer-to-Peer-Verbindung vom Endgerät an den Roboter übertragen. Die Geometriedaten und die Interaktionslogik sind in der Endgeräteanwendung eingebettet. Ni, Yew, Ong et al. [9] präsentieren ein Konzept zur haptischen und visuellen Interaktion für Schweißroboter. Zur Kommunikation wird eine direkte Peer-to-Peer-Verbindung zum Roboter hergestellt. Das Verhaltensmodell und die Interaktionslogik sind direkt in der Anwendung verankert. Das System von Malý, Sedláček & Leitao [10] dient zur Wartungsunterstützung durch visuelle Überlagerung von Achsen eines Industrieroboters. Dazu werden Realdaten des Roboters über eine Client-Server-Architektur ausgetauscht. Eine Interaktion ist durch eine Touch- und Controller-Interaktion in der Endanwendung implementiert. Lambrecht [11] schlägt ein AR-System für die Industrieroboterprogrammierung vor. Hierfür wird eine Endgeräte-Applikation bereitgestellt, die sich durch einen übergeordneten Server an den realen Roboter anbindet. Die Geometrieinformationen, die Interaktionslogik und das Verhaltensmodell sind dagegen in der Endgeräteanwendung abgebildet. Der Autor weist in seinem Ausblick auf das Potenzial eines Programmiersystems als vernetztes cyber-physisches System und die damit verbundenen Vorteile einer gemeinsamen Datenbasis aller Endgeräte hin. Den Nutzen einer virtuell erweiterten Programmierumgebung für Industrieroboter in Kombination mit einer intuitiven Eingabemöglichkeit einer Roboterpose stellen Gaschler, Springer, Rickert et al. [12] in ihrer Nutzerstudie dar. Zusammengefasst lässt sich für die bestehenden Ansätze und Forschungsarbeiten feststellen, dass sowohl Geometrie-, Verhaltens- und Interaktionsmodelle sowie Schnittstellen endgerätespezifisch in Applikationen eingebettet werden und damit keine Trennung zwischen Inhalt und Geräteanwendung vorgenommen werden kann. Deshalb werden die MR-Anwendungen bislang als solitäre Softwaremodule entwickelt. Die Folge sind langsame Entwicklungsprozesse, steigende Komplexitäten und nur prototypische Einsätze dieser Technologien [7]. Die *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0* [13] sieht deswegen die Entwicklung von Engineeringkonzepten für AR-Anwendungen und deren Integration in den digitalen Entwicklungsprozess als wichtigen Baustein für den breiten



**Bild 4:** Anforderungen bei der Integration von Mixed-Reality-Technologien in die Mensch-Roboter-Interaktion

industriellen Einsatz der Visualisierungstechnologie an. Die plattformunabhängige Beschreibung und Bereitstellung des Digitalen Zwillinges und die flexible Vernetzung zwischen industrieller Steuerungstechnik, Digitalen Zwillingen und modernen Endgeräten ist in diesem Kontext eine zentrale Bedingung.

## 2. Digital-Twin-as-a-Service-Plattform

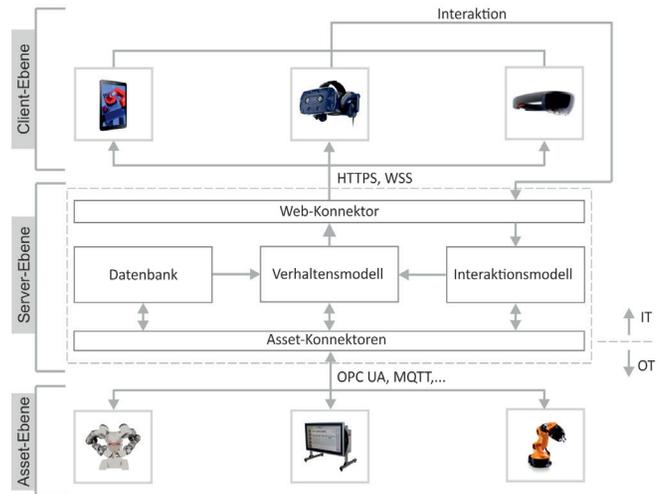
Als Lösung für die fehlende domänenübergreifende Vernetzung wird in diesem Beitrag der Einsatz von Cloud- und Web-Technologien vorgestellt. In Anlehnung an das Everything-as-a-Service-Paradigma der Public-Cloud-Entwicklung wird vorgeschlagen, die Digitalen Zwillinge in einer *Digital-Twin-as-a-Service-Plattform* (DTaaS-Plattform) auf einer maschinennahen Edge-Cloud bereitzustellen. Im Sinne des Servicegedankens werden dabei Digitale Zwillinge schnittstellenbasiert an Endgeräte ausgeliefert.

Das vorgeschlagene Grundkonzept für eine DTaaS-Plattform ist in Bild 5 dargestellt. Mittelpunkt der Plattform ist eine Server-Ebene, welche die mit Sensoren und Aktoren ausgestatteten Maschinen und Anlagen als Datenquellen (OT: operational technology) mit den webfähigen Endgeräten (Smartphone, Tablet, Laptop, ...) und AR/VR-Brillen als Datensinken (IT: information technology) verbindet. Dazu werden reale Anlagen und Maschinen (im Folgenden auch Assets genannt) über einen Asset-Konnektor an die Server-Ebene angebunden und die industrielle Kommunikation (beispielsweise über OPC UA oder MQTT) auf Webtechnologien (HTTPS, WSS) umgesetzt. In der Server-Ebene werden die Verhaltens- und Interaktionsmodelle des Digitalen Zwillinges ausgeführt. Außerdem werden alle zugehörigen Projektinformationen über eine Datenbank zentral bereitgestellt und gespeichert. Beliebige webfähige Endgeräte können sich über den Web-Konnektor anbinden und in der Server-Ebene die Prozesse des Digitalen Zwillinges instanziiieren. Auf den Endgeräten werden nur das Rendering der 3D-Szene und die Benutzereingaben (Interaktionseingaben) verarbeitet. Die Benutzereingaben wirken über ein event-basiertes Interaktionsmodell auf das zyklisch ausgeführte Verhaltensmodell des Digitalen Zwillinges zurück. Weiterführende Beschreibungen der technologischen Grundkonzepte können [14] entnommen werden.

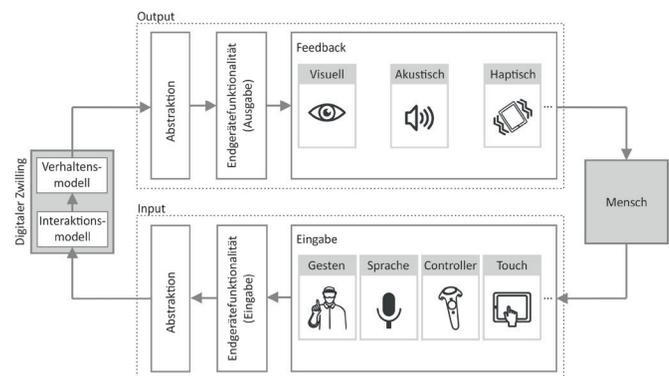
Die beschriebene Plattform kommt auf einer maschinennahen lokalen Edge-Cloud zum Einsatz, um eine latenzarme Bereitstellung von Digitalen Zwillingen, hohe Übertragungsraten und die Kontrolle über die Verwendung der gespeicherten Daten sicherzustellen. Die lokale Edge-Cloud vereint dabei die Vorteile von lokalen Serverinfrastrukturen und modularen Softwarekonzepten der Public-Cloud-Technologie.

## 3. Interaktionsabstraktion

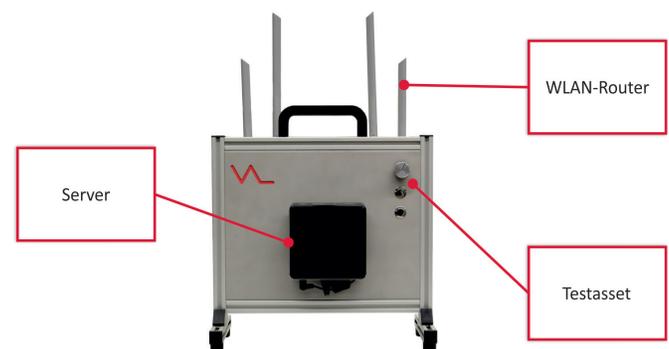
Um das Potenzial der Mixed-Reality-Methoden für die Mensch-Roboter-Interaktion plattformunabhängig nutzbar zu machen, wird in diesem Beitrag die Abstraktion der Interaktionen zwischen dem Digitalen Zwilling und dem Menschen vorgeschlagen. In Bild 6 ist aufbauend auf dem allgemeinen Interaktionsframework nach Dix [15] das Abstraktionskonzept dargestellt. Die Ausgabe eines servicebasierten Digitalen Zwillinges wird durch eine Abstraktionsschicht in eine Endgerätefunktionalität



**Bild 5:** Vorgeschlagene Architektur einer *Digital-Twin-as-a-Service-Plattform*

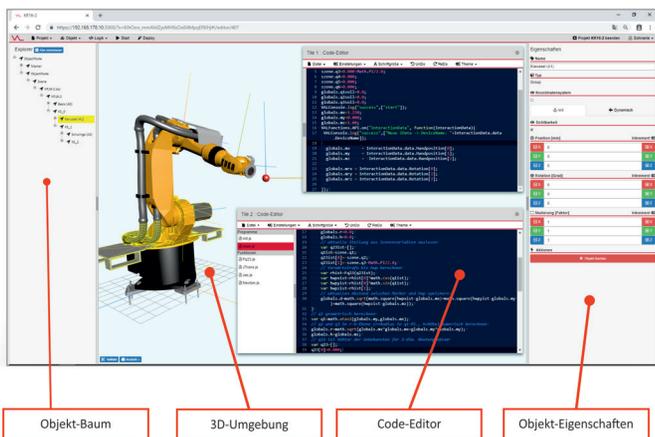


**Bild 6:** Interaktionskreislauf zwischen dem Digitalen Zwilling und dem Menschen durch Interaktionsabstraktion

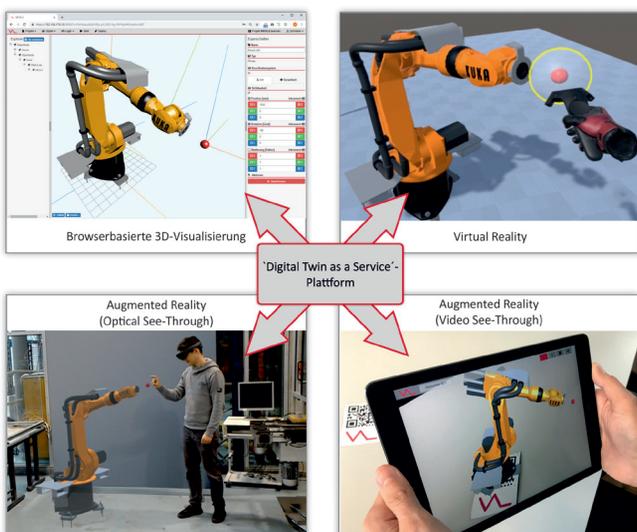


**Bild 7:** Mobile *Digital-Twin-as-a-Service-Plattform* des Virtual Automation Lab

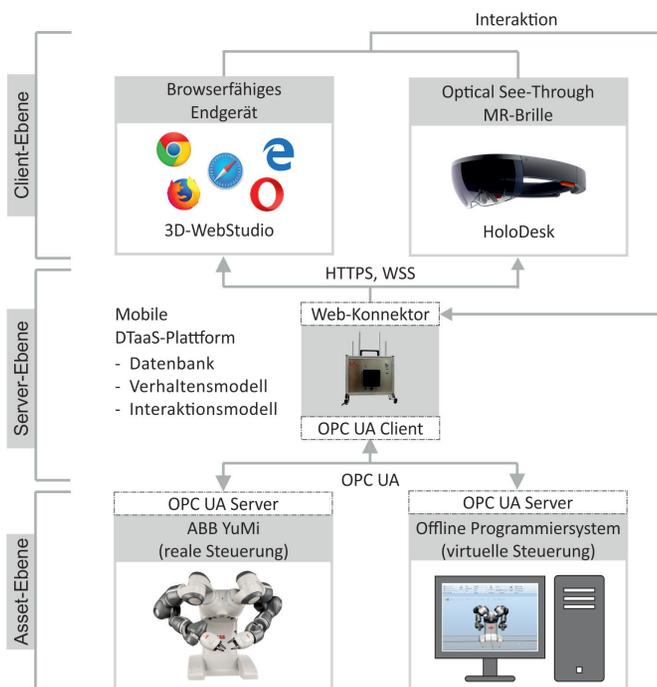
umgewandelt, die ein entsprechend multimodales Feedback hervorruft und damit verschiedene menschliche Sinne anspricht. Als Beispiele sind visuelle Darstellungen, Audiosignale oder Vibrationen zu nennen, die vom Endgerät wiedergegeben werden können. Dieses Feedback nimmt der Mensch durch seine Sinneswahrnehmung auf und reagiert durch Interaktionseingabe (beispielsweise durch Gesten, Sprachkommandos, Bewegung oder Betätigungen eines Controllers). Diese Eingaben werden durch das Endgerät spezifisch verarbeitet und durch eine Abstraktionsschicht wieder an den Digitalen Zwilling zurückgeleitet. Das Interaktionsmodell des Digitalen



**Bild 8:** Oberfläche des 3D-Webstudio im Webbrowser zur Modellierung in der Digital-Twin-as-a-Service-Plattform



**Bild 9:** Endgeräteunabhängige Visualisierung mit Hilfe der Digital-Twin-as-a-Service-Plattform



**Bild 10:** Systemüberblick zum Anwendungsbeispiel Mixed-Reality-basierte Online- und Offline-Roboter-Programmierung

Zwillingen wirkt daraufhin entsprechend auf das Verhaltensmodell ein und löst daraufhin gegebenenfalls ein weiteres Feedback aus.

Durch diese Vorgehensweise können unterschiedliche Ein- und Ausgabegeräte auf Basis einer gemeinsamen Interaktionsmodellierung des Digitalen Zwillinges eingesetzt werden. Die Interaktionsarten werden als Objekteigenschaften im Digitalen Zwilling hinterlegt und auf den Endgeräten entsprechend ihrer Fähigkeiten instanziiert. Anzustreben ist, dass die abstrahierten Interaktionen von der Mehrheit der Endgeräte ausgeführt werden können. Bei mangelnder Funktionalität des Endgeräts können in der Abstraktionsebene Rückfallroutinen modelliert werden. Zum Beispiel ermöglichen gängige AR/VR-Brillen die dreidimensionale Manipulation eines Geometrieelements, während auf einem Tablet nur eine zweidimensionale Abbildung durch Touch-Bedienung realisierbar ist.

## 4. Realisierung

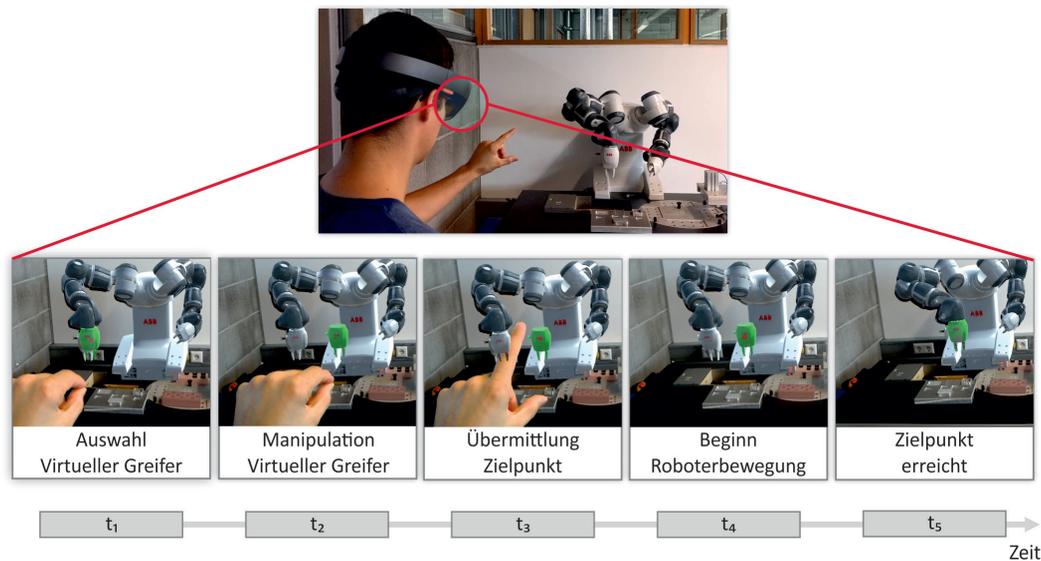
Die in Kapitel 2 und 3 vorgestellten Konzepte wurden am Virtual Automation Lab ([www.virtual-automation-lab.de](http://www.virtual-automation-lab.de)) prototypisch umgesetzt. Im Folgenden werden die prototypische Realisierung einer *Digital-Twin-as-a-Service-Plattform* und ein Anwendungsbeispiel für die kollaborative Robotik vorgestellt.

### 4.1 Portable Digital-Twin-as-a-Service-Plattform

Für die *Digital-Twin-as-a-Service-Plattform* wird eine portable Server Hardware eingesetzt (siehe Bild 7). Neben einem Mini-PC (Intel NUC, i3 2.4 GHz, 8 GB RAM) mit Linux-Betriebssystem (CentOS) zur Ausführung der Server-Software ist ein WLAN/LAN-Router zur Bereitstellung eines Netzwerkes installiert. Damit ist für den Betrieb der DTaaS-Plattform keine Installation auf einem Server im Firmennetzwerk notwendig und zudem ein mobiler Einsatz für beispielsweise den Vertrieb oder Schulungen möglich. Die im Netzwerk angemeldeten Assets (beispielsweise Maschinen-/Robotersteuerungen) können durch einen OPC-UA-Konnektor an die Plattform angebunden werden. Über ein Web-Frontend können Assets, Benutzer und Projekte über einen Standard-Webbrowser von jedem beliebigen im Netzwerk angemeldeten Endgerät verwaltet werden. Ein zusätzlich installiertes Testasset in Form eines Encoders und zweier Taster ermöglicht erste Realdatentests ohne eine reale Maschine ins Netzwerk integrieren zu müssen.

#### 4.1.1 Modellierung im Webbrowser

Aufbauend auf den Kernfunktionen werden auf der DTaaS-Plattform Mehrwertdienste ausgeführt, die von jedem netzwerkfähigen Endgerät über einen Standard-Webbrowser aufgerufen und genutzt werden können. Ein solcher Mehrwertdienst ist das *3D-WebStudio* (siehe Bild 8), welches die Modellierung von Digitalen Zwillingen im Webbrowser ermöglicht. Nach dem Import von CAD-Daten können Objekteigenschaften und Objektrelationen konfiguriert und Verhaltens- und Interaktionsmodelle über einen JavaScript-Editor frei programmiert werden. Die Verhaltens- und Interaktionsmodelle werden beim Aufruf des Digitalen Zwillinges auf der Server-Ebene ausgeführt und mit dem verbundenen Endgerät gekoppelt. Realdaten aus den Asset-Konnektoren können dabei durch eine einfache Konfiguration in das Modell einbezogen werden. Dies ermöglicht eine



**Bild 11:** Schrittfolge bei der gestenbasierten Steuerung eines Zweiarm-Roboters mit Mixed-Reality-Technologien

durch Realdaten angetriebene 3D-Szene im Webbrowser eines beliebigen Endgerätes (3D-Maschinenmonitoring).

#### 4.1.2 Automatisierte Generierung der Mixed-Reality-Szene

Für den Einsatz des Digitalen Zwillings in einer Mixed-Reality-Umgebung kann das dafür eingesetzte Mixed-Reality-Endgerät über die gleichen Schnittstellen wie der Webbrowser auf die Server-Ebene zugreifen. Dazu wird auf den Mixed-Reality-Endgeräten die Schnittstellenanwendung *HoloDesk* ausgeführt, die neben der Kommunikation mit dem Server und der Instanziierung des Digitalen Zwillings auch die Interaktionsabstraktion des entsprechenden Endgeräts beinhaltet. Durch die Bereitstellung von Geometrie-, Verhaltens-, und Interaktionsmodellen des Servers sind damit keine endgerätespezifischen Programmierkenntnisse bei der Modellierung des Digitalen Zwillings notwendig. Der Methodenpool der Server-Ebene und die gemeinsame Datenbasis ermöglichen die automatisierte Generierung der Mixed-Reality-Szene, um die modellierten Digitalen Zwillinge auf beliebige Endgeräte zu übertragen (siehe Bild 9). Auch Veränderungen, beispielsweise durch neue Interaktionselemente, sind direkt auf die Endgeräte übertragbar. Außerdem können die Endgeräte über den gemeinsamen Digitalen Zwilling in der DTaaS-Plattform gekoppelt werden. Dies ermöglicht die Kombination von Interaktionen mehrerer Endgeräte. Beispielsweise kann eine AR-Brille zur Visualisierung eingesetzt werden, während gleichzeitig die Eingabeinteraktion über ein Tablet erfolgt.

#### 4.1.3 Anwendungsbeispiel Mixed-Reality-basierte Roboter-Programmierung

In Bild 10 ist der schematische Aufbau des Anwendungsbeispiels für einen kollaborativen Roboter dargestellt, mit dem die vorgestellten Konzepte und die realisierte DTaaS-Plattform verifiziert werden soll. Ziel ist die Online- und Offline-Programmierung des Zweiarm-Roboters ABB YuMi durch eine gestenbasierte Mensch-Roboter-Interaktion in einer Mixed-Reality-Umgebung unter Einsatz der Mixed-Reality-Brille Microsoft HoloLens. Der reale Roboter und das Offline-Programmiersystem ABB RobotStudio werden über OPC UA an die DTaaS-Plattform

angebunden. Für das im *3D-WebStudio* erstellte Modell des Roboters wird ein zweiter Greifer als Interaktionsobjekt konfiguriert (in Bild 11 grün dargestellt). Die Interaktion wird entsprechend der Abstraktionsschicht erst im *HoloDesk* in eine endgerätespezifische Methode übersetzt, welche die Manipulation des Objekts über Gesteneingabe erlaubt. Die Koordinaten des über Gesteneingabe manipulierten virtuellen Greifers werden im Interaktionsmodell in der DTaaS-Plattform zu einem neuen Zielpunkt verarbeitet und von dort auf das Offline-Programmiersystem übertragen. Der simulierte Digitale Zwilling verfährt in die Zielposition. Während der Roboterbewegung werden die simulierten Gelenkwinkel des Offline-Programmiersystems über OPC UA an die DTaaS-Plattform übertragen und über das *HoloDesk* auf der Mixed-Reality-Brille zur Anzeige gebracht. Nach visueller Prüfung der simulierten Bewegung kann die reale Roboterbewegung über eine weitere Geste ausgelöst werden. Der Nutzer ist damit in der Lage, mit dem Roboter im realen Umfeld über den Digitalen Zwilling in Form eines Hologramms räumlich zu interagieren.

### Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz moderner Visualisierungstechnologien wie der 3D-Visualisierung im Web-Browser oder in Mixed-Reality-Umgebungen findet bislang noch keine breite Anwendung für Digitale Zwillinge in der Robotik. Als Barrieren können unter anderem die plattform- und endgerätespezifische Entwicklung der Anwendungen sowie die mangelnde domänenübergreifende Vernetzung zwischen mobilen Endgeräten, industrieller Steuerungstechnik und den Digitalen Zwillingen angesehen werden. In diesem Beitrag wird eine *Digital-Twin-as-a-Service*-Plattform vorgestellt, die es ermöglicht, industrielle Prozessdaten auf eine webbasierte Kommunikation abzubilden und mit einem Digitalen Zwilling in Web-Browsern und in Mixed-Reality-Umgebungen zu verknüpfen.

Als Mehrwertdienst schlägt dieser Beitrag die Modellierung im Webbrowser und die serverbasierte Ausführung und Bereitstellung der Digitalen Zwillinge vor. Durch die strikte Trennung von Verhaltensmodell und Daten des Digitalen Zwillings von der

plattformabhängigen Visualisierung und Interaktion kann eine gemeinsame Datenbasis für alle Visualisierungsformen geschaffen werden. Eine Abstraktion der Interaktion ermöglicht darüber hinaus die Interaktionsmodellierung unabhängig vom Endgerät als Teil der Verhaltensmodellierung eines Digitalen Zwillinges. Eine prototypische Realisierung des Gesamtkonzepts wird auf Basis einer mobilen Server-Plattform präsentiert. Schließlich weist ein Anwendungsbeispiel zur Mixed-Reality-basierten Programmierung eines kollaborativen 2-Arm-Roboters die Funktionsfähigkeit des vorgeschlagenen Ansatzes nach. Das Anwendungsbeispiel stellt die visuelle Interaktion zwischen Mensch und Digitalem Zwilling mit Mixed-Reality-Methoden vor. In Zukunft gilt es, neben der visuellen Interaktion auch weitere Interaktionsformen in das System einzubetten. Ausgewählte Beispiele sind die akustische Interaktion durch Audioausgaben und Spracherkennung oder die haptische Interaktion durch Datenhandschuhe. Die Kombination der Interaktionsformen hat das Potenzial, die Immersion der virtuellen Inhalte weiter zu verstärken.

## Danksagung

Die Autoren der Veröffentlichung danken dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg für die Förderung des kooperativen Promotionskollegs

In weiterführenden Arbeiten werden die Einflussgrößen auf die Visualisierung der Digitalen Zwillinge und deren Interaktion in Mixed Reality Umgebungen messtechnisch untersucht. Betrachtete Einflussgrößen sind die Latenz und die Abtastrate der industriellen Kommunikation, Modellfehler sowie statische und dynamische Positionierungsfehler der virtuellen Inhalte.

Die Synchronisation der Eingabe- und Ausgabegeräte durch einen gemeinsamen Prozess in der *Digital-Twin-as-a-Service*-Plattform wird in Zukunft auch die Grundlage für eine sogenannte *Shared Experience* bilden. Dabei werden in der Plattform nicht nur virtuelle Inhalte, Realdaten und Simulationsergebnisse ausgetauscht, sondern auch Tracking-Informationen. Lokale Interaktionen wie die Manipulation von Hologrammen im realen Umfeld können dann zur Laufzeit auf andere Endgeräte übertragen werden. Damit werden mehrere Menschen in einem gemeinsamen Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum mit Digitalen Zwillingen zusammenarbeiten können.

,PROMISE 4.0' und dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg für die Förderung der Transferplattform BW Industrie 4.0.

## Referenzen

- [1] International Federation of Robotics, Robots and the Workplace of the Future, Positioning Paper. 2018. Abgerufen am 24.04.2019 von: [https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Robots\\_and\\_the\\_Workplace\\_of\\_the\\_Future\\_Positioning\\_Paper.pdf](https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Robots_and_the_Workplace_of_the_Future_Positioning_Paper.pdf)
- [2] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA). IT-Report Simulation und Visualisierung. 2017
- [3] Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P et al. : Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Springer Vieweg. 2013
- [4] VDI-Richtlinie 3693 Blatt 2 - Virtuelle Inbetriebnahme - Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen
- [5] Milgram, P.: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, Telemanipulator and Telepresence Technologies. 1994
- [6] Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6. No. 4. 1997
- [7] Schneider, M.; Stricker, D.: AR-Unterstützung durch Steuerungshersteller, wt-online. Springer-VDI-Verlag. 2017
- [8] Blankemeyer, S. ; Wiemann, R.; Posniak, L. et al. : Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality, 7th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. 2018
- [9] Ni, D.; Yew, A.; Ong, S. et al. : Haptic and visual augmented reality interface for programming welding robots. Advances in Manufacturing. 2017
- [10] Malý, I.; Sedláček, D. ; Leitao, P.: Augmented Reality Experiments with Industrial Robot in Industry 4.0 Environment, IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics. 2016
- [11] Lambrecht, J.: Natürlich-räumliche Industrieroboterprogrammierung auf Basis markerloser Gestenerkennung und mobiler Augmented Reality, Dissertation. 2014
- [12] Gaschler, A. ; Springer, M. ; Rickert, M. et al.: Intuitive robot tasks with augmented reality and virtual obstacles. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2014.
- [13] Plattform Industrie 4.0: Umsetzungsstrategie Industrie 4.0, 2015. Abgerufen am 24.04.2019 von: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/I/industrie-40-verbaendeplattform-bericht.pdf>
- [14] Schnierle, M.; Röck, S.: "Plattform für die Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation – Ein Beitrag zur Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation als Erweiterung der X-in-the-Loop-Methodenreihe", wt-online. Springer-VDI-Verlag. 2018
- [15] Dix, A. ; Finlay, J. ; Abowd, G.D. et al. : Human Computer Interaction. Harlow, UK: Pearson Education Limited. 2004



## Ihr Kontakt zur Redaktion

Jonas Völker

Telefon +49 201 820 02 50

E-Mail: [j.voelker@vulkan-verlag.de](mailto:j.voelker@vulkan-verlag.de)

**atp**  
magazin

## AUTOREN

Marc Schnierle, M.Sc. (geb. 1992) hat Maschinenbau an der Universität Stuttgart in den Spezialisierungen Energiesysteme und Steuerungstechnik studiert. Seit 2016 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Virtual Automation Lab (VAL) der Hochschule Esslingen. Zu seinen Arbeitsfeldern gehören die browserbasierte 3D-Visualisierung von Maschinen, der industrielle Einsatz von Augmented und Mixed Reality sowie Cloud- und Web-Technologien. In seiner Doktorarbeit befasst er sich mit der ‚Mixed Reality in the Loop‘-Simulation von Produktionssystemen. Im Rahmen der Transferplattform BW Industrie 4.0 am Standort Esslingen ist er als Leiter für Transferprojekte am Virtual Automation Lab tätig.

**Marc Schnierle**

Virtual Automation Lab (VAL)  
Hochschule Esslingen  
Kanalstraße 33  
73728 Esslingen  
☎ +49 (0) 711 397 32 06  
@ marc.schnierle@hs-esslingen.de

Christopher Polak, B.Eng. (geb. 1993) hat Maschinenbau an der Hochschule Esslingen studiert und absolvierte seine Abschlussarbeit am Virtual Automation Lab (VAL) zum Thema ‚Mensch-Roboter-Kollaboration und -Interaktion mit Hilfe eines Head-Mounted Displays‘. Seit 2018 arbeitet er im Rahmen der Transferplattform BW Industrie 4.0 als Forschungsingenieur am Virtual Automation Lab an der Hochschule Esslingen. Sein Haupttätigkeitsfeld ist die endgeräteübergreifende Entwicklung von Augmented- und Virtual-Reality-Lösungen für Digitale Zwillinge in der Robotik.

**Christopher Polak**

Prof. Dr.-Ing. Sascha Röck (geb. 1970) ist seit 2014 Professor an der Hochschule Esslingen und vertritt die Fächer Regelungstechnik, Automatisierung und Robotik in der Fakultät Maschinenbau. Er beschäftigt sich seit über 20 Jahren mit der Simulation von Maschinen und Anlagen und hat mit seiner Doktorarbeit wichtige wissenschaftliche Grundlagen für den industriellen Einsatz der ‚Hardware in the Loop‘-Simulation im Maschinenbau gelegt. Als Entwicklungsleiter bei der ‚Industrielle Steuerungstechnik GmbH‘ war er federführend für den Transfer der Forschungsergebnisse in kommerzielle Softwarelösungen verantwortlich. Nach seiner Zeit als Juniorprofessor am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen an der Universität Stuttgart folgte er 2011 einem Ruf an die Hochschule Aalen bis er 2014 an die Hochschule Esslingen wechselte. Als Gründer des Virtual Automation Lab (VAL) im Jahr 2016 an der Hochschule Esslingen legt er seine Forschungsschwerpunkte auf Smart Factory Data und Simulation, virtuelle Inbetriebnahme, Einsatz von AR/MR-Methoden in der Produktion, Edge-Cloud Computing und Indoor-Flugrobotik. Er ist Sprecher des kooperativen Promotionskollegs PROMISE 4.0 und leitet die Transferplattform BW Industrie 4.0 am Standort Esslingen.

**Prof. Dr.-Ing. Sascha Röck**