

Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation basierend auf einem Digital Twin as a Service Konzept für die Aus- und Weiterbildung im Maschinenbau

Marc Schnierle¹, Jana Hönig¹, Timm von Bergen¹, Christopher Polak¹, Marc Hüttenberger¹, Thomas Fettahoglu¹ und Sascha Röck¹

Abstract: In diesem Beitrag wird die Mixed-Reality-in-the Loop Simulation (MRiLS) für die Aus- und Weiterbildung im Maschinenbau vorgestellt. Die MRiLS kombiniert Methoden der X-in-the-Loop Simulation mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality und ermöglicht so die Integration des Menschen und seines Verhaltens in den Simulationskreislauf. Für einen orts- und endgeräteunabhängigen Einsatz der MRiLS wird das Digital Twin as a Service Konzept präsentiert. Die Umsetzbarkeit der Methoden wird an ausgewählten Lernszenarien demonstriert.

Keywords: Mixed-Reality-in-the Loop Simulation; Digital Twin as a Service; Aus- und Weiterbildung; Maschinenbau

1 Motivation

In den letzten Jahren ist der Automatisierungs- und Vernetzungsgrad von Maschinen stetig gestiegen [Ve17]. Aufgrund der damit verbundenen Komplexitätssteigerung und im Kontext des Fachkräftemangels gewinnt die Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte zunehmend an Bedeutung. Zur Wissensvermittlung werden derzeit verschiedene Methoden eingesetzt, die sich entsprechend des Lernobjekts kategorisieren lassen [Ho21]:

- **Lernen an realen Maschinen:** Die Schulungsteilnehmenden lernen direkt an der realen Maschine und können das Wissen auf die spätere Aufgabe übertragen. Dabei sind jedoch nicht alle technischen Prozesse sichtbar, da diese meist im Inneren der Maschine stattfinden bzw. durch Umhausungen nicht einsehbar sind. Zudem können die Auswirkungen von Parametervariationen sowie das Verhalten in Gefahrensituationen aufgrund der potenziellen Gefährdung von Mensch und/oder Maschine nicht oder nur eingeschränkt explorativ erlernt werden. Hinzu kommt, dass aus Kosten- und Platzgründen meist nur eine Maschine und ein spezifischer Maschinentyp für mehrere Lernende zur Verfügung steht.
- **Lernen mit virtuellen Maschinen:** Die Lerninhalte werden durch Animationen oder Simulationen der Maschine auf einem zweidimensionalen Computermonitor visualisiert (z.B. in Webinaren), wobei der Lernende über Maus und Tastatur mit den Inhalten

¹ Virtual Automation Lab, Hochschule Esslingen, Kanalstraße 33, 73728 Esslingen, {marc.schnierle/jana.hoenig/timm.von-bergen/christopher.polak/marc.huettenger/thomas.fettahoglu/sascha.roeck}@hs-esslingen.de, <https://orcid.org/10000-0001-9035-0263>/ 0000-0003-1564-8742/ 0000-0002-3624-1856/ 0009-0003-9117-9746/ 0009-0005-5038-4916/ 0000-0002-6252-5836/ 0000-0003-3169-081X}

interagiert. Der Lerngegenstand ist orts- sowie teilweise zeitunabhängig verfügbar und kann flexibel skaliert werden. Jedoch limitieren die eingeschränkten Interaktions- und räumlichen Wahrnehmungsmöglichkeiten (durch Projektion von 3D-Objekten auf 2D-Monitoren) das explorative Lernen.

Durch die COVID-19-Pandemie (2020-2022) ist ein verstärkter Einsatz von virtuellen Lernobjekten zu beobachten. Im Maschinenbau können dazu detaillierte Modelle der X-in-the-Loop Simulation (XiLS) eingesetzt werden. Während das virtuelle Testen und die virtuelle Inbetriebnahme von Maschinensteuerungen auf zweidimensionalen Computermonitoren mit limitierter Interaktion über Maus und Tastatur i.d.R. gut funktionieren, lassen sich Lernszenarien, die eine stärkere Interaktion zwischen Lernendem und Lerninhalt erfordern, wie bspw. die Maschinenbedienung, nur unzureichend realisieren.

Um diese Barrieren zu überwinden, rücken Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality (MR) zunehmend in den Fokus. Durch die egozentrische Visualisierung und intuitive multimodale Interaktion werden neue Möglichkeiten für die Wissensvermittlung eröffnet (z.B. Blick in den Maschinen-Innenraum während dem Betrieb). Bisherige Anwendungen (z.B. [Bu21], [Ro19], [Ga21], [KW22]) sind meist geräte- und projektspezifisch implementiert, so dass die Erstellung Digitaler Zwillinge mit zugehörigen Lernszenarien und ein Wechsel zwischen verschiedenen Virtualitäts- und Interaktionsmodalitäten nur mit hohem manuellem Aufwand und speziellen IT-Kenntnissen möglich ist. Zudem werden meist keine industrielle Steuerungstechnik und Simulationstools integriert, was die Schulungstiefe einschränkt.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird die Methode der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation auf Basis eines Digital Twin as a Service Konzepts vorgestellt.

2 Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation

Als Erweiterung der XiLS-Methodenreihe des mechatronischen Entwicklungsprozesses verbindet die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) verschiedene Ausprägungen der XiLS wie Software- und Hardware-in-the-Loop Simulation (SiLS & HiLS) mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der MR (siehe Abb. 1), so dass der Digitale Zwilling der Anlage mit der realen Umgebung (z.B. Steuerungstechnik, Anlagenkomponenten, Nutzer) gekoppelt wird. Die egozentrische Visualisierung und multimodale Interaktion in Kombination mit dem realitätsnahen Abbild des Maschinenverhaltens ermöglicht dabei ein gefahrloses exploratives Lernen mit einer hohen Schulungstiefe.

Um diese Vorteile nutzen zu können, muss der Mensch und sein Verhalten in den Simulationskreislauf integriert und ein stufenloses Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum geschaffen werden. Dazu erfordert die MRiLS eine egozentrische Visualisierung sowie Schnittstellen für eine intuitive Mensch-Modell-Interaktion und eine Multiuser-Kollaboration [Ho23]. Aus der Erfüllung dieser Anforderungen ergibt sich eine Vielzahl

möglicher Kombinationen von Virtualitäts- und Interaktionsmodalitäten, die untereinander flexibel kombinierbar sein müssen. Um diese Komponenten ohne wiederkehrenden Anpassungs- und Modellierungsaufwand koppeln zu können und somit die Technologie-Hürde in der Lehre zu überwinden, wird im Folgenden das Digital Twin as a Service (DTaaS) Konzept für MRiLS-Anwendungen vorgestellt.

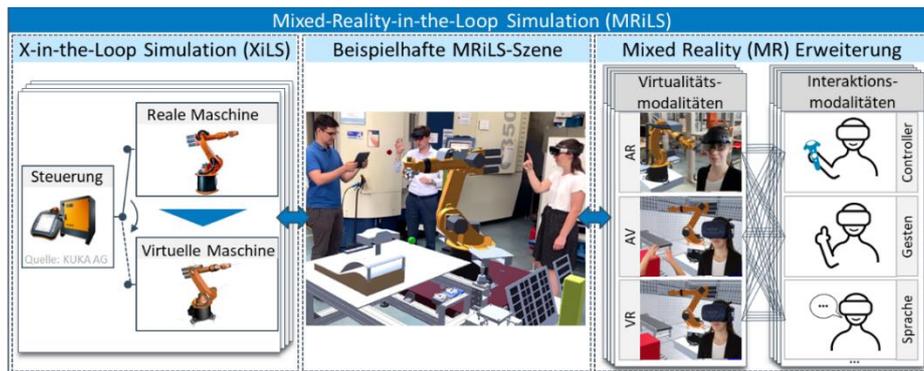


Abb. 1: Prinzip einer Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)

3 Digital Twin as a Service Konzept

Mit der zunehmenden Bereitstellung von IT-Diensten in Cloud-Infrastrukturen anstelle von lokalen Rechnern hat sich in den letzten Jahrzehnten der Everything as a Service (XaaS) Ansatz entwickelt. Dabei werden sowohl die Dienste für die Infrastruktur als auch die Hard- und Software als Service über die Cloud bereitgestellt. Basierend auf diesem allgemeinen Ansatz wurde am Virtual Automation Lab (VAL) das Digital Twin as a Service (DTaaS) Konzept entwickelt, bei dem aus digitalen Modellen in Kombination mit realen Maschinendaten und neuen Methoden Digitale Zwillinge als Mehrwertdienste erstellt werden. Durch den kombinierten Einsatz von Cloud- und Web-Technologien kann die erforderliche Flexibilität bei der Bereitstellung der MRiLS erreicht werden [Ho23].

Basierend auf dem DTaaS Konzept wurde am VAL im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte eine Digital Twin as a Service Plattform (DTaaS-SP) realisiert. Die DTaaS-SP ermöglicht eine flexible Kopplung von Digitalen Zwillingen mit Cloud- und Web-Technologien als Clients (z.B. MR-Endgeräte) und bindet Datenquellen (z.B. industrielle Steuerungssysteme, Programmiersysteme) als Assets an (siehe Abb. 2).

Die Modellierung eines Digitalen Zwillinges mit entsprechenden Lehr-/Lernszenarien erfolgt über das Web-Frontend **VAL 3D-Webstudio**. Das webbasierte Autorentool wird mit Standard-Webbrowsern genutzt und ermöglicht im ersten Schritt den Import von CAD-Daten der Maschine. Das kinematische und logische Verhalten des Maschinenmodells kann entweder über 3D-Szenefunktionalitäten und JavaScript-Programmierung im Webbrowser modelliert oder durch die Anbindung von Daten aus der Asset-Ebene (z.B.

Simulationstools) über Kommunikationsstandards wie TCP/UDP, OPC UA oder MQTT bereitgestellt werden. Die Modellierung der Interaktionen erfolgt abstrahiert und endgeräteunabhängig (siehe [Sc19]). Der Digitale Zwilling kann über die Interface-App **VAL HoloDesk** ohne Anpassungsaufwand auf verschiedenen MR-Endgeräten wie Augmented Reality-Brillen, Virtual Reality-Brillen oder Tablets/Smartphones mit unterschiedlichen multimodalen Ein- und Ausgabeoptionen eingesetzt werden. Alle Datenverbindungen zu den im VAL 3D-Webstudio erstellten Assets bleiben erhalten. Dies ermöglicht neben einer orts- und endgeräteunabhängigen steuerungsgesetzten Visualisierung einer virtuellen Maschine auch eine flexible Skalierbarkeit der MRiLS (z.B. gleichzeitige Nutzung durch eine Vielzahl von Anwendern von verschiedenen Standorten).

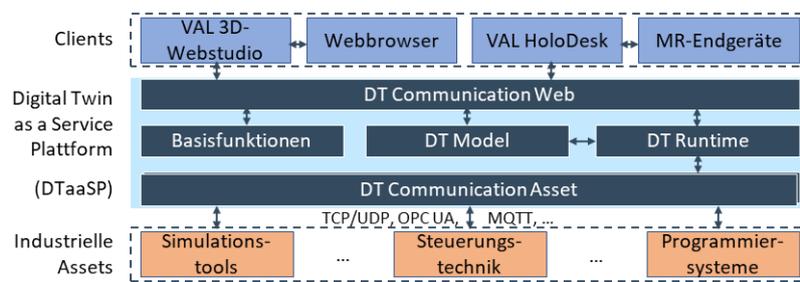


Abb. 2: Vereinfachte Architektur der Digital Twin as a Service Plattform

Darüber hinaus stellt die realisierte Microservice-Architektur die Daten des Digitalen Zwillings verschiedenen Mehrwertdiensten zur Kopplung und Weiterverarbeitung zur Verfügung. Nachfolgend werden ausgewählte Mehrwertdienste der DTaaS erläutert:

- **Multiuser-Service:** Durch diesen Mehrwertdienst können Nutzer von verschiedenen physischen Orten der Welt in die Szene beitreten und miteinander geräteübergreifend kollaborativ lernen. Der Lehrende kann bspw. eine Funktion vorführen, die die Lernenden im Anschluss an dem eigenen Digitalen Zwilling anwenden und explorativ erkunden (siehe [Ho21]).
- **Speech-Service:** Dieser Mehrwertdienst ermöglicht multilinguale Lehr-/Lernszenarien, so dass Lernende und Lehrende via Live-Übersetzung in ihrer Muttersprache miteinander kommunizieren sowie den Digitalen Zwilling per Sprachsteuerung manipulieren können. Der webbasierte und frei konfigurierbare Service dient dabei als Softwareschnittstelle, die Spracherkennungs-, Sprachsynthetisierungs- und Übersetzungsdienste mehrerer großer Cloudanbieter verknüpft und somit kombiniert und unabhängig von einzelnen Cloudanbietern genutzt werden kann (siehe [Ho21]).
- **Service für synthetische Trainingsdatengenerierung und Objekterkennung:** Mit diesem Mehrwertdienst können auf Basis von Geometriedaten des Digitalen Zwillings in der DTaaS synthetische Trainingsdaten für Deep Learning Algorithmen zur kamerabasierten Objekterkennung realer Objekte für MR-Anwendungen (z.B. zur Einblendung kontextsensitiver Informationen am erkannten Objekt) automatisiert generiert werden (siehe [Fe23]). Dies kann in Laborübungen bspw. genutzt werden, um

Datenblätter sowie aktuelle Maschinen-Parameter an der realen Anlage zu visualisieren oder den aktuellen Bearbeitungsschritt bei Montagearbeiten zu überprüfen.

Aktuelle Forschungsergebnisse (z.B. [SR23]) fließen permanent in die DTaaSP ein, so dass diese auch direkt für die Lehre verfügbar sind. Derzeit wird bspw. an einer Schnittstelle zu Chatbots wie zum Beispiel ChatGPT gearbeitet, so dass die Lernenden die Möglichkeiten haben per Textanweisung (und zukünftig auch per Sprachanweisung) automatisiert Szenendetails zu verändern oder zu generieren.

4 Evaluation anhand von Lernszenarien

Mit der DTaaSP wurde bereits eine Vielzahl verschiedener Digitaler Zwillinge mit entsprechenden Lehr-/Lernszenarien für den Sekundarbereich (z.B. Berufsschule), den Tertiärbereich (z.B. Universität) und den Quartärbereich (z.B. Weiterbildung) realisiert. Ausgehend von den Problemstellungen des jeweiligen Lernziels und den Defiziten bislang eingesetzter Methoden der Wissensvermittlung können Lehrende mit der DTaaSP die Lehr-/Lernszenarien flexibel um Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der MR erweitern. Abb. 3 zeigt Impressionen aus verschiedenen Lehr-/Lernszenarien.

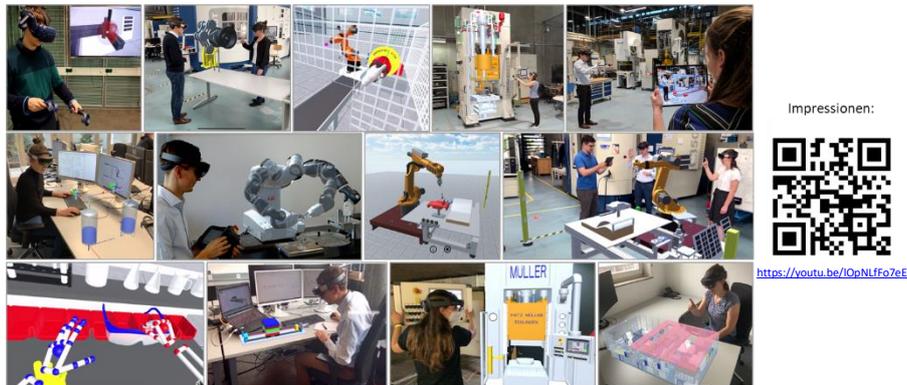


Abb. 3: Impressionen verschiedener Lehr-/Lernszenarien mit der DTaaSP

Die vorgestellten Methoden werden bspw. in dem Modul „Roboter-Digitalisierung und Simulation“ des Masterstudiengangs „Ressourceneffizienz im Maschinenbau“ an der Hochschule Esslingen eingesetzt. Ziel dieser Vorlesung ist, dass die Studierenden die Modellierung Digitaler Zwillinge für Robotersysteme durchführen sowie die Grundlagen moderner MR-Technologien inklusive deren Vernetzung mit Cloud- und Web-Technologien verstehen und anwenden können. Die theoretischen Grundlagen werden in einer umfangreichen Laborübung angewendet. Abb. 4 zeigt das didaktische Design der Vorlesung inkl. der begleitenden Laborübung. Parallel zur Vorlesung erstellen die Studierenden nach einem initialen Workshop in Gruppenarbeit einen Digitalen Zwilling einer vorgegebenen Roboterapplikation. Dazu erstellen die Studierenden die Robotergeometrie und -kinematik mittels CAD-Konstruktion und importieren das Modell

in die DTaaSP. Im Autorentool (VAL 3D-Webstudio) wird die Szene einschließlich der Roboterbewegung und -interaktion modelliert. Die Studierenden können dabei standortunabhängig auf die DTaaSP zugreifen und zu jedem Zeitpunkt den Digitalen Zwilling auf einem beliebigen MR-Endgerät (z.B. auf dem eigenen Smartphone) visualisieren und mögliche Fehler explorativ erkunden. In dieser produktiven Lernphase werden die Studierenden unter anderem durch gezielte Treffen nach zuvor festgelegten Meilensteinen unterstützt. Zum Abschluss präsentieren die Studierenden ihren Digitalen Zwilling in Form einer Live-Demonstration. Das Lernszenario wird bereits seit einigen Jahren durchgeführt und über die zentrale Lehrevaluation der Hochschule Esslingen evaluiert. Das Feedback der Studierenden ist durchweg positiv. In der Evaluation werden insbesondere die Anschaulichkeit der theoretischen Inhalte, der standortunabhängige Zugriff und die Explorationsmöglichkeiten hervorgehoben. Neben der Evaluation des Lernszenarios wird im Rahmen der Laborübung die Erfahrungen der Studierenden mit verschiedenen Endgeräten und Interaktionsmöglichkeiten mit Hilfe von Fragebögen untersucht.

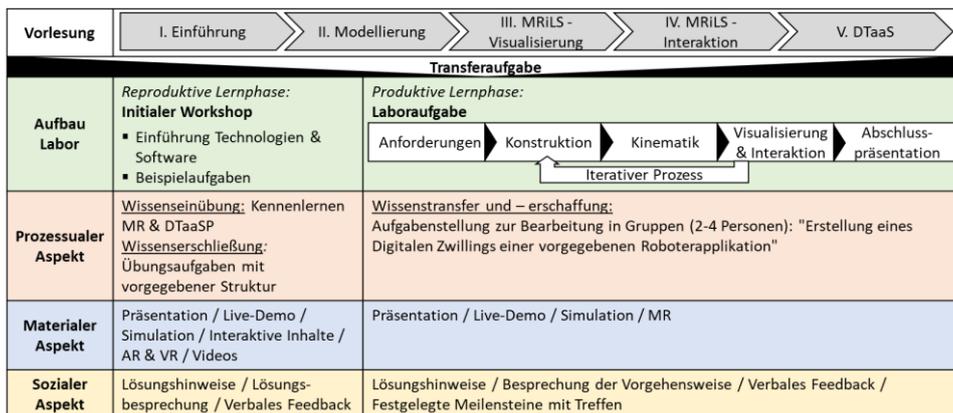


Abb. 4: Didaktisches Design der Vorlesung "Roboter-Digitalisierung und Simulation"

5 Einsatzempfehlung

Methoden der MRiLS und DTaaS verbinden ein orts- und zeitunabhängiges Lernen mit einer hohen Schultiefe und nutzen dabei modernste digitale Technologien, wodurch ein zeitgemäßes Werkzeug mit hohem Innovationspotenzial sowohl für die Lernenden als auch die Lehrenden zur Verfügung steht. Die Praxistauglichkeit des vorgestellten Ansatzes wurde durch die Umsetzung verschiedener Lehr-/Lernszenarien für unterschiedliche Zielgruppen (z.B. sekundäre, tertiäre und quartäre Bildung) überprüft. Dabei ermöglicht insbesondere die Endgeräteunabhängigkeit einen sehr flexiblen Zugang zum Lerngegenstand für jeden Lernenden. Durch die Anbindung bislang bereits in der Lehre eingesetzter Simulationstools können bestehende Formen der Wissensvermittlung flexibel um MR-Methoden erweitert werden. Die DTaaSP wirkt mit ihrem allgemeingültigen

Ansatz als Multiplikator für den Einsatz von Digitalen Zwillingen und Methoden der MR und bietet vielfältige Potenziale in der Aus- und Weiterbildung im Maschinenbau – sowie über diese Domäne hinaus.

6 Danksagung

Die Autoren danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus BW für die Förderung des Projekts "Transferplattform BW Industrie 4.0" und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Projekts "MRiLS" (16SV8348).

7 Literaturverzeichnis

- [Bu20] Burghardt, A.: Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins, *Applied Sciences*, 10, 486, 2020. doi: 10.3390/app10020486
- [Fe23] Fettahoglu, T. et al.: Synthetische Trainingsdatengenerierung und Objekterkennung mit Deep Learning für Mixed Reality-Anwendungen mit Digitalen Zwillingen, Tagungsband AALE 2023. doi: 10.33968/2023.29.
- [Ga21] Garg, G. et al.: Digital Twin for FANUC Robots: Industrial Robot Programming and Simulation Using Virtual Reality, *Sustainability*, 13, 10336, 2021. doi: 10.3390/su131810336
- [Ho21] Hönig, J. et al.: Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation für Schulungen im Maschinen- und Anlagenbau, *Proceedings of DELFI Workshops 2021*, pp. 9-22, HS Ruhr West, 2021. ISBN 978-3-946757-03-0
- [Ho23] Hönig, J. et al.: Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation based on a Digital Twin as a Service concept for Learning Factories. 13th Conference on Learning Factories, CLF 2023. doi: 10.2139/ssrn.4427603
- [KW22] Kostov, G., Wolfartsberger, J.: Designing a Framework for Collaborative Mixed Reality Training, *Procedia Computer Science*, Volume 200, pp. 896-903, 2022. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.287
- [Ro19] Roldán Gómez, J. et al.: A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 305-316, 2019. doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.004
- [Sc19] Schnierle, M. et al.: Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer "Digital Twin as a Service"-Plattform, *atp magazin 5/2019*, Robotik und Digital Twin in der Smart Factory, Vulkan-Verlag, 2019.
- [SR23] Schnierle, M., Röck, S: Latency and sampling compensation in mixed-reality-in-the-loop simulations of production systems, *Prod. Eng. Res. Devel.* 17, 341–353, 2023. doi: 10.1007/s11740-022-01175-2
- [Ve17] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.: IT-Report "Simulation im Maschinenbau", 2017.