

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

Schnierle, M.; Röck, S.

wt Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, 2018

<https://doi.org/10.37544/1436-4980-2018-09-59>

Digitale Fabrik, Industrie 4.0, Simulation

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

M. Schnierle, S. Röck

Augmented Reality (AR) und Mixed Reality (MR) bieten Potenzial für zahlreiche Anwendungen im Industrial Internet of Things (IIoT). Dieser Beitrag stellt einen Ansatz zur cloudbasierten (endgeräte- und standortunabhängigen) Erstellung und 3D-Visualisierung von realdatengetriebenen Augmented- und Mixed-Reality-Szenen sowie deren Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau vor.

Platform for the Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation - A contribution to Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation as an extension of the X-in-the-Loop-Methods

Augmented Reality (AR) and Mixed Reality (MR) offer the potential for numerous applications in the Industrial Internet of Things (IIoT). This paper presents an approach for a cloud-based (device- and location-independent) creation and the 3D visualization of real data driven Augmented and Mixed Reality scenes including their application in mechanical and plant engineering.

1 Einleitung

Die digitale Anreicherung der Realität mit virtuellen Inhalten erlaubt im industriellen Umfeld bereits heute vereinzelt Anwendungen. Beispiele sind der Remote Service mithilfe einer Datenbrille [1] oder die Prozessoptimierung durch Projektion von Planungsmodellen auf reale Anlagenbestände [2]. Die eingesetzten Methoden und Realisierungen werden unter der Bezeichnung Augmented Reality oder kurz AR subsumiert. Milgram bezeichnete bereits 1994 in seinem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum AR als Teilmenge der Mixed Reality (MR) [3], wobei unter MR die stufenlose Kombination aus virtuellen und realen Komponenten verstanden wird.

Marc Schnierle, M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Sascha Röck
Virtual Automation Lab (VAL) – Hochschule Esslingen
Kanalstr. 33, D-73728 Esslingen
Tel. +49 (0)711 / 397-3206
E-Mail: marc.schnierle@hs-esslingen.de
Internet: www.virtual-automation-lab.de

Dank

Die Autoren der Veröffentlichung danken dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg für die Förderung des kooperativen Promotionskollegs „Promise 4.0“ und dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg für die Förderung der Transferplattform BW Industrie 4.0.

* Bei den mit einem Stern gekennzeichneten Beiträgen handelt es sich um Fachaufsätze, die von Experten auf diesem Gebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben wurden (peer-reviewed).

Bisher ist kein breiter Einsatz dieser AR- oder MR-Konzepte im industriellen Umfeld zu verzeichnen [4]. Jedoch bleibt zu erwarten, dass mit dem Aufkommen des Industrial Internet of Things (IIoT) und der cyber-physischen Produktionssysteme (CPPS) der Flexibilitäts-, Autonomie- und Vernetzungsgrad von Produktionssystemen zunehmen wird. Diese Entwicklung führt zu wachsenden Anforderungen an die Planung, Entwicklung, Programmierung, Schulung, Inbetriebnahme und das Monitoring solcher Systeme.

Den steigenden Anforderungen wird im Maschinen- und Anlagenbau durch den Einsatz von Simulationsmethoden im mechatronischen Entwicklungsprozess begegnet. Etablierte entwicklungsunterstützende Simulationsmethoden sind die Model-in-the-Loop-Simulation (MiLS), die Software-in-the-Loop-Simulation (SiLS) und die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiLS), die unter dem Begriff „X-in-the-Loop-Simulation (XiLS)“ zusammengefasst werden können. Diese Methoden setzen virtuelle Anlagenkomponenten in Form von Simulationsmodellen zu Entwicklungs- oder Testzwecken, zur Absicherung oder zur virtuellen Inbetriebnahme technischer Systeme ein, bislang jedoch ohne das Potenzial von AR- und MR-Technologien auszuschöpfen. In diesem Beitrag wird eine systematische Erweiterung der XiLS-Methodenreihe um AR- und MR-Technologien zu einer Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation (MRiLS) vorgeschlagen.

2 Mixed Reality in the Loop (MRiL)

Die etablierten XiLS-Methoden bauen mit Bezug auf den Entwicklungsfortschritt eines Systems aufeinander auf: Von der MiL- über die SiL- bis hin zur HiL-Simulation (**Bild 1**).

Alle drei Simulationsmethoden sind grundsätzlich identisch im Systemaufbau. Sie sind gekennzeichnet durch die Kopplung einer Steuerungsausprägung mit einer virtuellen Anlagenkomponente, welche definierte Eigenschaften der realen Anlagenkomponente abbildet. Die Steuerungsausgänge wirken auf das virtuelle Modell, dessen Reaktion wiederum auf die Steuerungseingänge rückgekoppelt wird. Unterscheiden lassen sich die Simulationsmethoden durch Form und Detaillierungsgrad sowohl von der Steuerung als auch von der virtuellen Anlage.

Während bei der MiL-Simulation ein abstraktes Steuerungsmodell eingesetzt wird, kommt bei der SiL-Simulation die reale Steuerungssoftware zum Einsatz. Diese wird aber im Gegensatz zur HiL-Simulation nicht auf der realen Steuerungshardware ausgeführt. Bei der HiL-Simulation erfordert die Hardware eine Echtzeitkommunikation zwischen realer Steuerung und virtueller Anlagenkomponente und somit eine Echtzeitsimulation des Anlagenmodells im Kommunikationstakt des Feldbusses [5]. Das Einsatzgebiet dieser XiLS-Methoden beschränkt sich bisher auf den Entwicklungsprozess bis zur virtuellen Inbetriebnahme. Während des Betriebs der Anlage kommen die erstellten virtuellen Anlagenmodelle nicht zum Einsatz.

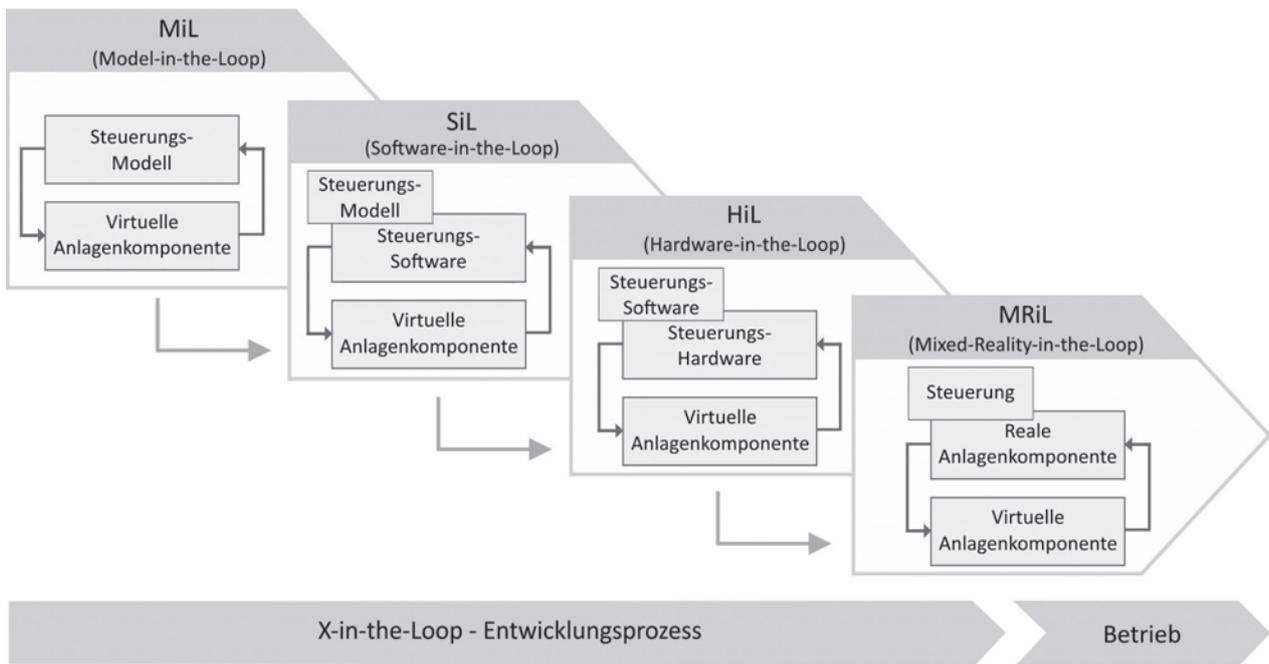


Bild 1. Einordnung der Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation

Mit der MRiL-Simulation soll die XiL-Systematik durch Einbeziehung der realen Umwelt erweitert werden (**Bild 2**). Somit werden reale Anlagenkomponenten auf visueller Ebene in die Simulation integriert und der Mensch als Betrachter wird Teil der Interaktion.

In Abgrenzung zu *Stöcklein*, der 2011 mit MRiL ein prototypenbasiertes Entwurfsvorgehen für MR-Anwendungen [6] beschrieb, wird in diesem Beitrag die MRiLS als Erweiterung der HiLS durch reale Anlagenkomponenten vorgeschlagen. Die Anreicherung der realen mit den virtuellen Anlagenkomponenten durch Mixed-Reality-Methoden ermöglicht dabei die Systemvalidierung über die Steuerungshardware hinaus, beispielsweise zum Systementwurf oder zur Kollisionsdetektion und Prozessoptimierung. Solche Validierungsszenarien können in der Mixed Reality realitätsnah dargestellt werden, während die mit Virtual-Reality-Methoden entwickelte Immersion keinen visuellen Bezug zur tatsächlichen Realität besitzt und deshalb eine vergleichsweise umfangreiche und aufwendig modellierte virtuelle Realität erfordert.

Die MRiLS kann sowohl im XiL-Entwicklungsprozess als auch während des Betriebes einer Anlage eingesetzt werden. In beiden Fällen kann die MRiLS die verschiedenen Steuerungsausprägungen und virtuellen Modelle aus den vorangehenden Entwicklungsschritten nutzen. Zur Veranschaulichung der MRiL-Simulation ist in Bild 2 beispielhaft ein automatisierter Handhabungsprozess skizziert. Virtuelle Komponenten integrieren sich dabei entsprechend ihrer modellierten Eigenschaften vollständig in das Gesamtsystem und treten mit realen Komponenten auf informationstechnischer Ebene in Interaktion. Die Kopplung zwischen den realen und den virtuellen Anlagenkomponenten erfolgt über Steuerungs- und Sensordaten der realen Komponenten (Realdaten). Die virtuellen Anlagenkomponenten werden dem Betrachter durch ein AR/MR-Device zugänglich. Dies lässt eine sehr realistische Interaktion zwischen Mensch, Steuerung und Maschine zu und eröffnet neuartige Formen der Systemintegration und Systemvalidierung sowie der Schulung und Präsentation.

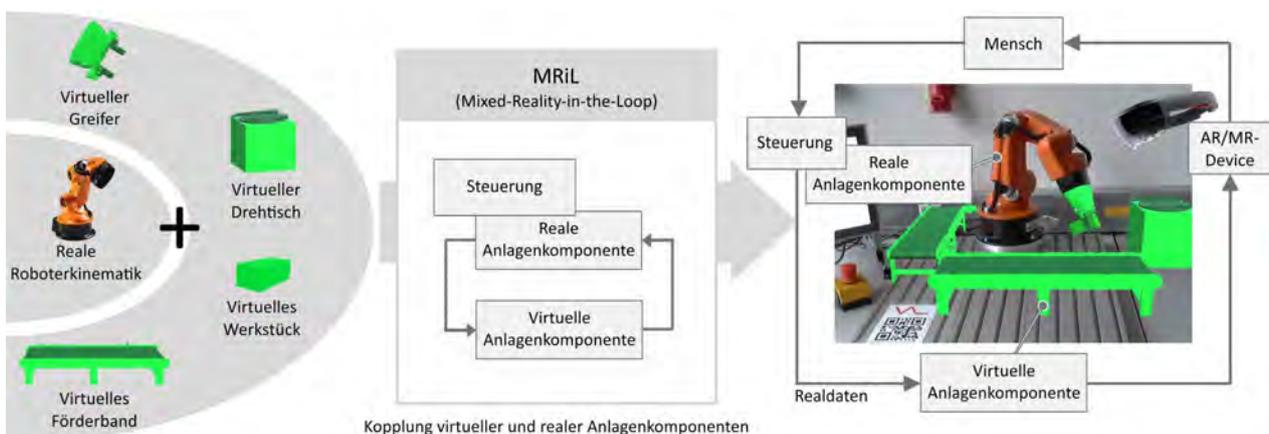


Bild 2. Anwendungsbeispiel der MRiL-Simulation

Es ergeben sich folgende Anforderungen an eine MRiL-Simulation:

- Anbindung an Realdaten: Um die Interaktion zwischen realen und virtuellen Anlagenkomponenten zu ermöglichen, müssen die Steuerungs- und Sensordaten (Realdaten) der realen Anlage echtzeitnah der MRiLS bereitgestellt werden.
- Netzwerkfähigkeit: Bei einer MRiLS kommunizieren mehrere verteilte Realdatenquellen (Sensoren, Steuerungen) mit mehreren kabellosen AR/MR-Devices (Datenbrillen, Tablets). Dazu muss die MRiLS alle einbezogenen Datenquellen und -senken unter Berücksichtigung netzwerkfähiger standardisierter Kommunikationsmechanismen zentralisieren können. Dies ist auch eine notwendige Bedingung für einen standortübergreifenden Einsatz der MRiLS, beispielsweise für das 3D-Monitoring.
- Position-Tracking: Um die virtuellen Komponenten richtig im Sichtfeld des Betrachters zu positionieren, muss die Position des AR/MR-Devices kontinuierlich erfasst werden. Außerdem müssen für eine realistische Verknüpfung zwischen Realität und Virtualität die virtuellen Anlagenkomponenten kontinuierlich in Relation zu den realen Anlagenkomponenten positioniert werden. Die MRiLS muss deshalb das Position-Tracking realer Objekte ermöglichen und die visuellen Präzisionsanforderungen der jeweiligen Problemstellung erfüllen.
- Visuelle Registrierung: Die virtuellen Anlagenkomponenten müssen sich realitätsgetreu in das reale Umfeld einfügen. Dazu muss die MRiLS die Verdeckung virtueller Objekte durch reale Anlagenkomponenten aus jeder Perspektive berücksichtigen.
- Endgeräteunabhängigkeit: Aufgrund der hohen Marktdynamik und der Vielfalt an zukünftigen AR/MR-Devices muss die MRiLS unabhängig vom eingesetzten AR/MR-Device sein.
- Engineering der MR-Szene: Die besonderen Anforderungen der MRiLS erfordern Erweiterungen der MR-Szene, beispielsweise für die datentechnische Verknüpfung der Realdaten mit den Geometriedaten in der Szene oder für das Position-Tracking sowie für die Interaktionslogik. Diese Erweiterungen sollen nicht anwendungsspezifisch entwickelt werden, sondern müssen über eine Engineering-Umgebung auf Basis der originalen CAD-Daten der Anlage modelliert werden können.

3 Stand der Forschung und Technik

Derzeitige Einsatzgebiete für AR- und MR-Technologien im Maschinen- und Anlagenbau sind die optimierte Darstellung technischer Vorgänge [7–9], die Wartung und Schulung [10–12] oder die Unterstützung bei Planungsaufgaben [13–15]. Dabei werden zur gerätetechnischen Umsetzung von AR/MR hauptsächlich Video-See-Through- und Optical-See-Through-Ansätze verfolgt. Bei der Video-See-Through-Methode werden virtuelle Inhalte in ein Kamerabild der Realität eingeblendet. Dagegen werden bei der Optical-See-Through-Methode die virtuellen Elemente in einem teiltransparenten Display über das reale Sichtfeld gelegt.

Lui, Cao, Tse et al. [7] stellen ein System für Werkzeugmaschinen vor, das zur Anreicherung eines realen Werkstücks mit Zusatzinformationen (etwa zukünftige Bearbeitungsbahnen) dient. Dazu werden in der realen Aufnahme eines stationären Kamerasystems die virtuellen Inhalte videobasiert eingeblendet (Video-See-Through-AR). Zur Registrierung im Kamerabild erfolgt eine initiale Kalibrierung des Kamerasystems und

die Anbindung der realen Steuerungsdaten. Die Überlagerung wird anschließend auf einem Monitor angezeigt.

Für dasselbe Anwendungsfeld präsentieren Sommer & Verl [8] ein transparentes Maschinenfenster für Werkzeugmaschinen, welches die Visualisierung des Bearbeitungsvorgangs aufgrund schlechter Sichtverhältnisse unterstützt. Zur visuellen Anreicherung des Bearbeitungsraums wird ein stationäres Display eingesetzt, in das virtuelle Inhalte eingeblendet werden können. Zusätzlich wird ein Tracking der Kopf-Position des Betrachters mit einer Time-of-Flight Sensorik vorgeschlagen, um eine Registrierung in Abhängigkeit der Blickrichtung zu ermöglichen. In die Berechnung der Verdeckung im Arbeitsraum werden die realen Steuerungsdaten einbezogen.

Malý, Sedláček & Leitão [9] setzen ein Video-See-Through-AR-Konzept mit einem Consumer-Tablet am Beispiel eines Industrieroboters ein, das das virtuelle Einfärben von Maschinenachsen bei Wartungsaufgaben erlaubt. Als Tracking-Methode werden reale Markersysteme (wie etwa QR-/ArUco-Codes) an den bewegten Anlagenkomponenten angebracht, kontinuierlich durch bildverarbeitende Methoden erkannt und als Inertialsysteme für die virtuellen Inhalte genutzt.

Zur Inspektions- sowie Programmierunterstützung eines Industrieroboters schlagen Leutert & Schilling [10] ebenfalls ein Video-See-Through-AR-System vor, welches im Gegensatz zu [9] statt Tracking-Methoden die Realdaten zur Registrierung von virtuellen Inhalten verwendet. Dazu werden im Bild eines stationären kalibrierten Kamerasystems virtuelle Inhalte (wie Roboterposen, Bahnen) entsprechend der realen Steuerungsdaten angezeigt. Die Daten des Roboters lassen sich dabei über ein Netzwerk bereitstellen.

Im Bereich der Remote-Service-Unterstützung entwickeln Ong & Zhu [11] ein Architekturkonzept, das dynamische AR-Inhalte wie Montageanweisungen oder Text-Annotationen auf Basis einer zentralen Datenbank ermöglicht und markerbasiertes Tracking vorsieht. Auf Grundlage dieser Architektur stellen Erkoyuncu, del Amo, Mura et al. [12] ein desktopbasiertes Autorensystem für AR-Anwendungen im Bereich Wartung und Instandhaltung vor, das die Einblendung von Objekten ebenso wie von Realdaten in textueller Form erlaubt.

Das markerbasierte Tracking in Kombination mit Video-See-Through-AR wird von Pentenrieder, Bade, Doil et al. [13] ebenfalls für die Überlagerung und Ergänzung realer Produktionseinrichtungen mit virtuellen Planungsmodellen vorgeschlagen. Dieses Konzept erweitern Penna, Amaral, Espíndola et al. [14] um eine Middleware zur Anbindung von Realdaten.

Zum Positionieren von virtuellen Anlagenmodellen in realen Fabrikumgebungen werden von Bracht & Schlegel [15] die Einsatzmöglichkeiten des Time-of-Flight-Trackings anhand einer Optical-See-Through-AR-Brille mit Tiefensensorik dargestellt.

Für die Endgeräteunabhängigkeit der industriellen AR-Anwendungen schlagen Schneider & Stricker [4] den Einsatz von Remote Rendering vor. Dabei sendet der Client zyklisch seinen aktuellen Viewpoint an eine Server-Instanz, auf der die Szene gerendert wird. Das Rendering-Ergebnis wird anschließend auf Client-Geräten angezeigt.

Die vorgestellten Forschungsarbeiten sind in der **Tabelle** den Anforderungen an eine MRiLS gegenübergestellt. Für die Realisierung einer MRiLS ergeben sich folgende Defizite:

- Anbindung an Realdaten: Die Verknüpfung von Realdaten mit AR/MR-Anwendungen erfolgt meist durch anwendungsspezifische Schnittstellen. Ansätze zur Verwendung industrieller Kommunikationsstandards oder Middleware-Komponenten

Tabelle. Arbeitsfelder von Veröffentlichungen in Bezug zu MRiLS-Themenfeldern (x ≙ behandelt, Leerfeld ≙ nicht behandelt)

Themenfelder Veröffentlichungen	Anbindung an Realdaten	Netzwerk- fähigkeit	Position- Tracking	Visuelle Registrierung	Endgeräte- unabhängigkeit	Engineering
Lui, Cao, Tse et al. [7]	X					
Sommer & Verl [8]	X		X	X		
Malý, Sedláček, Leitão et al. [9]			X			
Leutert & Schilling [10]	X	X				
Ong & Zhu [11]		X	X			X
Erkoyuncu, del Amo, Mura et al. [12]	X	X	X			X
Pentenrieder, Bade, Doil et al. [13]			X			X
Penna, Amaral, Espíndola et al. [14]	X		X		X	X
Bracht & Schlegel [15]			X	X		
Schneider & Stricker [4]					X	

sind zwar vorhanden, aber nicht in eine durchgängige Systemarchitektur zur Anbindung beliebiger Assets (Realdatenquellen) und Endgeräte (AR/MR-Devices) eingebettet.

- **Netzwerkfähigkeit:** Die übergreifende Bereitstellung der Daten wird überwiegend durch zentralisierte Datenbank-Architekturen realisiert. Sie ermöglichen keine flexible Anbindung von Assets (Realdatenquellen) oder Endgeräten (AR/MR-Devices).
- **Position-Tracking:** Zum Positionieren der virtuellen Objekte werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Dabei findet das markerbasierte Tracking signifikant häufiger Verwendung als das markerlose Tracking (etwa Time of Flight). Zum Zwecke des Trackings werden Realdaten ausschließlich für stationäre Kamerasysteme eingesetzt. Anwendungen mit bewegten Kamerasystemen beziehen Realdaten nicht in das Tracking ein. Sie stützen sich auf eine aufwendige Anbringung von Markersystemen oder verwenden zusätzliche Sensorik, die aber bislang nur einem Teil der AR/MR-Devices zur Verfügung steht.
- **Visuelle Registrierung:** Lösungsansätze, die Tiefensensorik für die Verdeckungsrechnung einsetzen, schränken die Auswahl der einsetzbaren AR/MR-Devices stark ein. Andere Vorschläge, die zur Verdeckungsrechnung Realdaten verwenden, beziehen sich bislang nur auf stationäre Kamerasysteme.
- **Endgeräteunabhängigkeit:** AR/MR-Applikationen werden überwiegend anwendungs- sowie gerätespezifisch entwickelt [4]. Deshalb beschränkt sich der Einsatz der AR-Technologie im industriellen Umfeld derzeit auf prototypische Implementierungen. Der Lösungsansatz des Remote Renderings birgt durch die Abhängigkeit von Client- und Server-Instanzen systembedingte Nachteile, welche einen Einsatz in der MRiLS behindern. So erhöhen sowohl das Position-Tracking und die Komprimierung der Bilddaten auf dem Server als auch die

Übertragungslatenz des Netzwerks die Reaktionszeit der Systeme. Zur plattformübergreifenden Entwicklung werden auch Softwareumgebungen der Spieleentwicklung (Game-Engines genannt) eingesetzt, die aber tiefgreifende Systemkenntnisse und zeitaufwendige Änderungs- und Kompilierprozesse bedingen.

- **Engineering:** Die Entwicklung der AR-Anwendungen sowie deren Einbettung in das reale Umfeld werden bislang methodisch wenig unterstützt. Veröffentlichte Architekturkonzepte für Autorenplattformen sowie spezialisierte kommerzielle Werkzeuge (wie Amazon Sumerian, PTC ThingWorx Studio oder RE'flect) bieten zwar Unterstützung beim Erstellen von AR-Anwendungen mit teils dynamischen Inhalten, sind aber nicht für die Bereitstellung von realdatengetriebenen MR-Szenen nutzbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass verschiedene Forschungsarbeiten die Anbindung von Realdaten an AR/MR-Anwendungen behandeln. Allerdings sind dabei überwiegend anwendungsspezifische Schnittstellen zu beobachten und die Bereitstellung der Daten in Netzwerken wird nur exemplarisch dargestellt. Das Position-Tracking wird überwiegend durch lokale markerbasierte Methoden dominiert. Sowohl die visuelle Registrierung als auch die Endgeräteunabhängigkeit werden im industriellen Umfeld bislang nur punktuell betrachtet. Außerdem ist festzuhalten, dass zwar Ansätze zum Engineering von AR/MR-Szenen vorgestellt werden, diese aber nicht als Engineeringkonzept für eine MRiLS geeignet sind.

4 Realisierung einer MRiL-Simulationsumgebung

Der nachfolgende Abschnitt geht anhand der Realisierung einer MRiL-Simulationsumgebung auf Lösungsansätze für die Anbindung der Realdaten, die Netzwerkfähigkeit sowie die End-

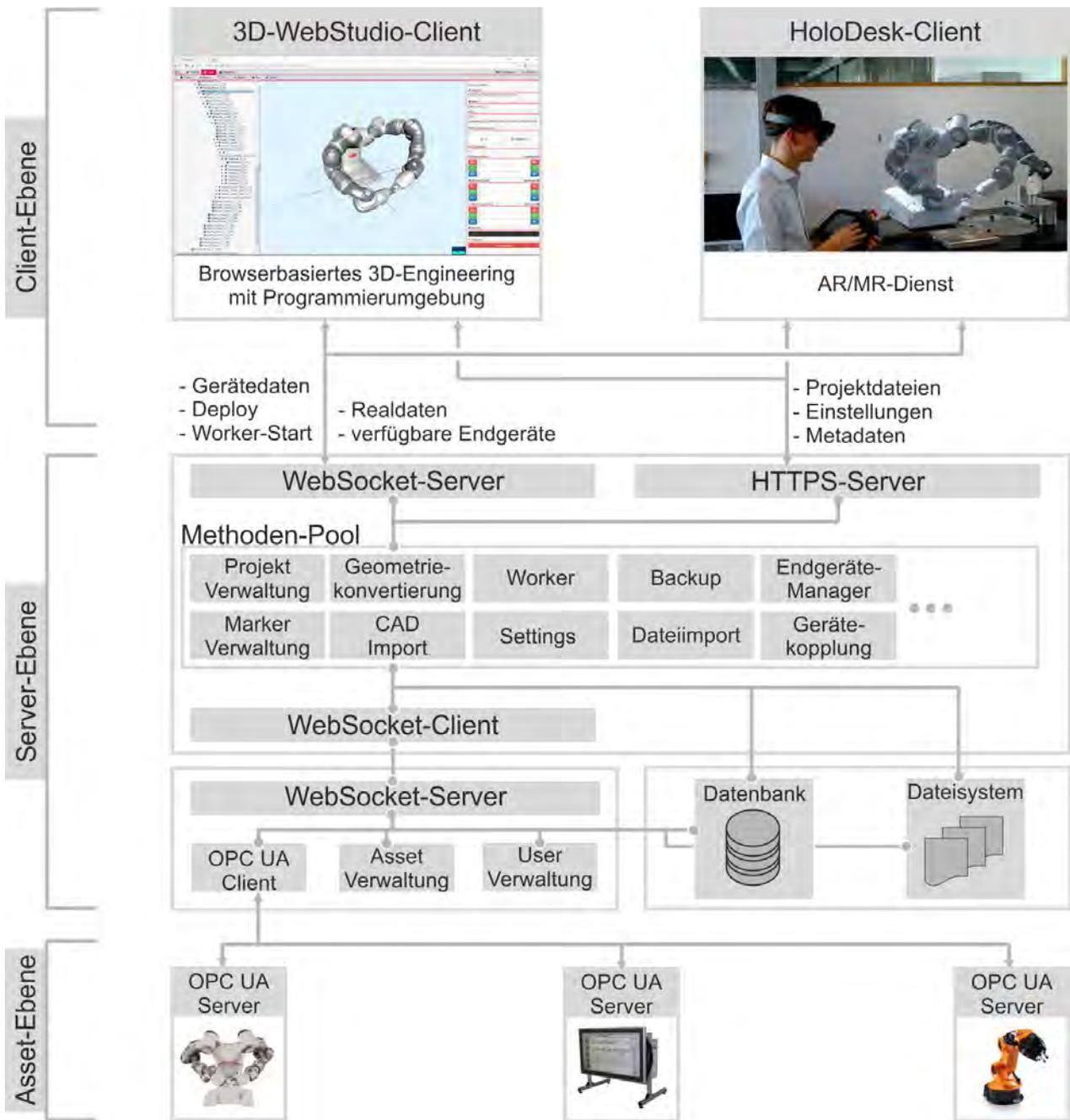


Bild 3. Architekturüberblick der am VAL (Virtual Automation Lab) entwickelten MRiLS-Plattform

geräteunabhängigkeit und das Engineering von MRiL-Simulationen ein.

Am Virtual Automation Lab (VAL) wird eine Software-Plattform zur webbasierten Modellierung und Visualisierung von 3D-Szenen für die MRiLS entwickelt, welche die oben beschriebenen Anforderungen erfüllen soll.

4.1 Architektur einer MRiL-Plattform

Als Lösungsansatz für die Vernetzung der Realdatenquellen (Sensoren und Steuerungen) und der Endgeräte (zum Beispiel Smartphones, Tablets, PCs, AR/MR-Brillen) wird die Verbindung der Operational Technology (Maschinenebene) mit der Information Technology (Geräteebene) durch Einsatz von Cloud-Technologien vorgeschlagen.

Die Systemarchitektur in **Bild 3** lässt sich in drei Ebenen gliedern: die Asset-, die Server- sowie die Client-Ebene.

4.1.1 Asset-Ebene

In der Asset-Ebene werden die Realdatenquellen (Assets) über den industriellen Kommunikationsstandard OPC UA bereitgestellt. Diese Schnittstelle erlaubt die standardisierte Anbindung von Datenquellen. Damit können sowohl reale Produktions- und Steuerungssysteme als auch Simulations- sowie Berechnungswerkzeuge Daten an die überlagerte Server-Ebene bereitstellen.

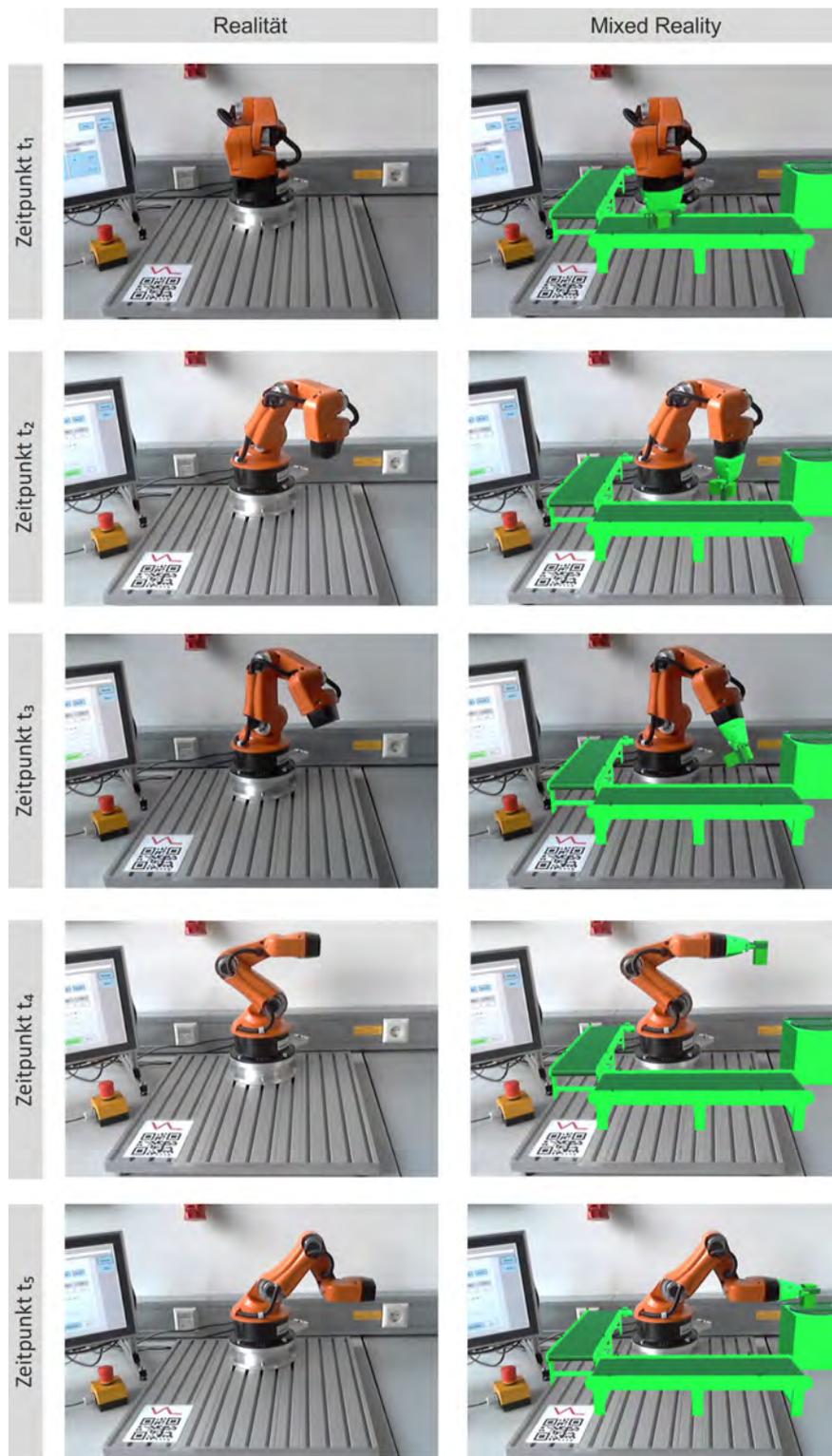


Bild 4. MRIL-Simulation eines 5-Achsroboters mit datenbasiertem Tracking (realisiert mit der MRILS-Plattform des VAL, zur Veranschaulichung sind alle virtuellen Anlagenkomponenten grün eingefärbt)

4.1.2 Server-Ebene

Die Server-Ebene setzt die industrielle Kommunikation (über OPC UA) für den internen Datenaustausch und die nachgelagerte Client-Ebene auf Web-Technologien um. Diese modernen Technologien erlauben die endgeräteunabhängige und netz-

werkfähige Kommunikation (siehe [16]). Neben einer bidirektionalen Kommunikation zu den Endgeräten und dem Austausch zyklischer Daten (über WebSockets) können zudem statische Client-Dateien (über HTTPS) ausgeliefert und ein Methoden-Pool des Servers zugänglich gemacht werden. Dieser besteht aus modularen und kombinierbaren Funktionen und steht allen

Endgeräten zur Verfügung. Exemplarische Funktionen sind die Konvertierung unterschiedlicher Geometrieformate, die Projektverwaltung oder die zyklische Ausführung einer Anwendungslogik. Durch diesen modularen Ansatz können verschiedene Client-Instanzen an eine Server-Instanz angekoppelt werden.

4.1.2 Client-Ebene

In der Client-Ebene können grundsätzlich beliebig viele Applikationen in Form von Diensten bereitgestellt werden. Für die MRiLS sind zwei Dienste erforderlich:

- **3D-WebStudio**, Dienst für das browserbasierte Engineering einer MRiLS: Dieser Dienst erlaubt das Engineering einer MRiL-Szene auf Basis von CAD-Konstruktionsdaten im Standardwebbrowser. Die Engineeringumgebung kann von jedem browserfähigen Client im Netzwerk aufgerufen werden. Der Dienst erlaubt die Verknüpfung von Realdaten mit Szenendaten, um Geometrielemente in Abhängigkeit der Realdaten beispielsweise zu positionieren oder einzufärben. Außerdem können spezifische Anwendungs- und Interaktionslogiken browserbasiert modelliert werden. Diese Logikfunktionen, die Realdaten mit anwendungsspezifischer Programmlogik verknüpfen, werden auf dem Server instanziiert und zyklisch ausgeführt. Die Szeneninformationen und Konfigurationsdaten werden benutzerspezifisch in einer Datenbank in der Server-Ebene abgelegt. Diese Daten sind von jedem Netzwerkknoten aus standortübergreifend und endgeräteunabhängig verfügbar. Der browserbasierte Client erlaubt außerdem die Verwaltung aller im Netzwerk befindlichen Endgeräte. Dies umfasst beispielsweise die automatisierte Bereitstellung von konfigurierten MRiL-Szenen für AR/MR-Devices. Dieses Konzept ermöglicht so zum einen den Einsatz moderner Browser-Technologien für das Engineering und zum anderen die direkte Anbindung von AR/MR-Diensten.
- **HoloDesk**, Dienst für die Mixed Reality Visualisierung: Dieser Dienst dient zur Visualisierung der im 3D-WebStudio modellierten MR-Szene auf einem AR/MR-Device. Die Szene wird per „Knopfdruck“ auf das AR/MR-Device geladen. Sowohl die Geometriedaten als auch die Verknüpfungen mit den Realdaten werden dem Dienst durch die Anbindung an die Server-Ebene zur Verfügung gestellt. Dabei bindet sich das HoloDesk gleichermaßen wie das 3D-WebStudio an die Server-Ebene an, obwohl gerätespezifische Implementierungen zum Tracking oder zur Gesten- oder Spracherkennung integriert sind. Um eine durchgängige Endgeräteunabhängigkeit zu erreichen, werden clientübergreifende Prozesse auf dem Server ausgeführt. Als Beispiel kann die zyklische Ausführung einer Anwendungs- oder Interaktionslogik in der MRiL-Szene unabhängig vom MR-Device angeführt werden.

4.2 Beispielanwendung

Zur beispielhaften Veranschaulichung der MRiLS-Plattform dient ein Handhabungsprozess (**Bild 4**). Eine reale Roboterkinematik wird dabei um einen virtuellen Greifer und virtuelle Förderbänder sowie einen virtuellen Drehtisch ergänzt, um den Handhabungsprozess visuell realistisch abzubilden.

Die virtuellen Komponenten werden über die realen Steuerungsdaten angetrieben, die von der Asset-Ebene über die Server-Ebene an die Client-Ebene ausgeliefert werden. Für das Positionieren des Greifers werden die aktuellen Achspositionen über die Encoder herangezogen. Daraus wird in einem

Server-Prozess über ein Kinematikmodell des Roboters die Endeffektorposition berechnet.

Über einen Inertialmarker (QR-Code-Marker jeweils unten links in Bild 4) können die virtuellen Komponenten in Relation zur Realität gebracht werden. Die Zusammenführung der Asset-Daten und die damit einhergehende Netzwerkfähigkeit ermöglicht damit im Gegensatz zu rein markerbasierten Verfahren die Einbeziehung von Realdaten in das Tracking. Das hybride datenbasierte Verfahren ermöglicht mit einem Inertialmarker die virtuelle Überlagerung oder Ergänzung aller Anlagenkomponenten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Erweiterung der im mechatronischen Engineeringprozess etablierten X-in-the-Loop-Simulationen (XiLS) um die Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation (MRiLS) vorgeschlagen. Diese ermöglicht die Anreicherung realer Anlagenkomponenten mit virtuellen Anlagenkomponenten auf Basis einer steuerungsgekoppelten Simulation. Die MRiLS erlaubt neue Formen der Systemintegration und Systemvalidierung sowie der Schulung und Präsentation. Auf Basis einer Anforderungsanalyse für eine MRiLS wird die Realisierung einer MRiL-Simulationsumgebung vorgestellt. Das präsentierte Konzept basiert auf einer Server- und Client-Architektur und baut auf modernen Cloud- und Web-Technologien auf. Die vorgestellte Plattform ermöglicht die endgeräteunabhängige und standortübergreifende Entwicklung und Bereitstellung von realdatengetriebenen digitalen Zwillingen für die MRiLS.

In weiterführenden Arbeiten wird das vorgeschlagene hybride marker- und datenbasierte Position-Tracking einer Genauigkeitsanalyse unterzogen, um es mit anderen Trackingverfahren wie etwa den lokalen Markersystemen zu vergleichen und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Außerdem sollen Methoden für die Registrierung der virtuellen Objekte untersucht werden, mit welchen 3D-Modelle der realen Anlagen für die Verdeckungsrechnung nutzbar gemacht werden können.

Literatur

- [1] Nee, A.; Ong, S.; Chryssolouris, G. et al.: Augmented reality applications in design and manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61 (2012) 2, pp. 657–679
- [2] Bauernhansl, T.; Siegert, J.; Böck, J. et al.: Fabrikoptimierung mit Kamera und Beamer. wt-online 102 (2012) 3, S. 94–97. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [3] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A. et al.: Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. SPIE Proceedings volume 2351: Telem manipulator and Telepresence Technologies (1994), pp. 282–292
- [4] Schneider, M.; Stricker, D.: AR-Unterstützung durch Steuerungshersteller. wt-online 107 (2017) 3, S. 108–112. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [5] Pritschow, G.; Röck, S.: Hardware in the Loop. Simulation of Machine Tools. CIRP Annals – Manufacturing Technology 53 (2004) 1, pp. 295–298
- [6] Stöcklein, J.: Mixed reality in the loop. Dissertation, Universität Paderborn, 2011

[7] Lui, C.; Cao, S.; Tse, W. et al.: Augmented Reality-assisted Intelligent Window for Cyber-Physical Machine Tools. *Journal of Manufacturing Systems* 44 (2017) 2, pp. 280–286

[8] Sommer, P.; Verl, A.: View-dependent Virtual and Augmented Reality for Machine Tools. *European Modelling Symposium (EMS)*, Pisa/Italy, 2016

[9] Malý, I.; Sedláček, D.; Leitão, P.: Augmented Reality Experiments with Industrial Robot in Industry 4.0 Environment. *IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics*, 2016

[10] Leutert, F.; Schilling, K.: Augmented Reality for Tele-maintenance and -inspection in Force-sensitive Industrial Robot Applications. *Poitiers/France*, 2015

[11] Ong, S.; Zhu, J.: A novel maintenance system for equipment serviceability improvement. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 62 (2013) 1, pp. 39–42

[12] Erkoyuncu, J.; del Amo, I.; Mura, M. et al.: Improving efficiency of industrial maintenance with context aware adaptive

authoring in augmented reality. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 66 (2017) 1, pp. 465–468

[13] Pentenrieder, K.; Bade, C.; Doil, F. et al.: Augmented Reality-based factory planning – an application tailored to industrial needs. *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Nara/Japan, 2007

[14] Penna, R.; Amaral, M.; Espíndola, D. et al.: Visualization tool for cyber-physical maintenance systems. *12th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Porto Alegre/Brazil, 2014

[15] Bracht, U.; Schlegel, M.: AR- und VR-Brillen in der Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 4, S. 251–256. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag

[16] Friedrich, T.; Hupf, M.; Schnierle, M. et al.: Augmented Reality und Flugrobotik – neue Technologien für die Smart Factory. *Tagungsband 15. Fachkonferenz AALE Köln*, 2018