

## Neue Perspektiven und Interaktionen für Maschinen mit industriellen Steuerungen

# Erweiterte und virtuelle Realität in der Instandhaltung

N. Brandt, D. Littfinski, O. Riedel

**ZUSAMMENFASSUNG** Dieser Beitrag befasst sich mit der Integration von Mixed-Reality-Technologien in die industrielle Instandhaltung. Anhand von Anwendungsfällen werden die Vorteile der Bereitstellung von kontextsensitiven Instandhaltungsinformationen aufgezeigt. Abschließend wird ein Lösungskonzept für die Instandhaltung mittels Mixed Reality diskutiert. Ziel ist es, die Effizienz der Instandhaltung durch die Integration von Augmented-Reality- und Virtual-Reality-Technologien zu steigern.

### STICHWÖRTER

Digitalisierung, Instandhaltung, Virtual Reality

### Augmented and virtual reality in maintenance – New perspectives and interactions for machines with industrial control systems

**ABSTRACT** This article deals with the integration of mixed reality technologies in industrial maintenance. The advantages of AR in maintenance are demonstrated by use cases in which maintenance information can be provided in a context-sensitive manner. Finally, a method for AR-based maintenance software is discussed with the aim of increasing the efficiency of maintenance by integrating AR and VR technologies.

## 1 Einleitung

Die Einführung von Industrie 4.0 (I4.0) bringt Vorteile mit sich, wie bereichsübergreifende Effizienzsteigerung, effizientere Ressourcennutzung sowie die Möglichkeit zur Individualisierung der Fertigung und Herstellung maßgeschneiderter Produkte durch eine maschinenübergreifende Vernetzung. Studien zu den I4.0-Technologien zeigen, dass die beteiligten Unternehmen den Nutzen als hoch einschätzen [1, 2]. Das breite Spektrum an Technologien, wie etwa das Internet der Dinge (IoT), künstliche Intelligenz (KI), Simulationen und cyber-physische Systeme, erlaubt es Unternehmen, ihre Produktionsprozesse zu optimieren und neue Geschäftsmodelle zu entwickeln [3].

Vor allem kleine und mittlere Unternehmen wissen wenig über die Vorteile und Konzepte von I4.0 [2] und nutzen die neuen technologischen Ansätze nur vereinzelt oder gar nicht. Hinzu kommt der Fachkräftemangel in einigen Industriezweigen in Europa [4]. Dies führt besonders dort zu Problemen, wo Unternehmen auf hochspezialisierte Technologien und komplexe Systeme angewiesen sind. Ein tiefes Verständnis der Funktionsweise komplexer Systeme ist entscheidend für die Effizienz von Systemwartung und -support. Die Wartung muss in der Regel vor Ort durch geschultes Personal erfolgen. In einer global vernetzten Welt bedeutet dies Reisen, die aufgrund aktueller Ereignisse nicht immer möglich sind. So haben Reisebeschränkungen und Quarantänemaßnahmen weltweit zu Einschränkungen der Produktions- und Reisetätigkeit geführt [5]. Die Kombination aus Fachkräftemangel und notwendiger Präsenz vor Ort führt zu hohen Kosten, die durch geschickte Planung und durchdachte Modelle minimiert werden müssen [6]. Auf der anderen Seite erwartet

der Kunde eine schnelle, unkomplizierte und erfolgreiche Wartung oder Unterstützung.

Die Fernüberwachung eines Systems, auch Remote Monitoring genannt, ermöglicht es, aktuelle Daten des Systems an einen entfernten Standort zur Weiterverarbeitung zu senden [7]. Durch die Verknüpfung des virtuellen Systems mit der Fernüberwachung können die aktuellen Daten auch für die Wartung der Maschine mittels virtueller Realität genutzt werden [8]. Ein Experte hat somit sofort Zugriff auf alle relevanten Daten, wodurch zeitaufwendige Datenerfassungsprozesse entfallen. Die Fernüberwachung in Verbindung mit Mixed-Reality-Technologien könnte Unternehmen deutlich entlasten.

Eine wichtige Rolle bei der Fernwartung mit Simulationstechnik spielen die detaillierten Simulationsmodelle aus der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN). Bei der VIBN werden digitale Modelle genutzt, um Maschinen und Systeme in einer Simulationssoftware zu testen und zu simulieren, bevor sie physisch aufgebaut oder in Betrieb genommen werden. Zur Visualisierung der Modelle werden die während des Konstruktionsprozesses erzeugten CAD-Daten verwendet [9]. Zusammen mit weiteren Informationen, wie physikalischen Eigenschaften und Funktionsbeschreibungen, ermöglichen sie erste Analysen, beispielsweise, ob Kollisionen auftreten. Im weiteren Verlauf der Systementwicklung kann eine reale Steuerung mit dem digitalen Modell verknüpft werden, um das Verhalten einer realen Steuerung frühzeitig zu validieren. Nach der virtuellen Inbetriebnahme können die realen Systeme mit der Simulation verglichen und verifiziert werden [10]. Unerwartetes Verhalten kann so abgesichert oder Fehler im Nachhinein genauer analysiert werden.

Die erstellten Daten und Simulationsmodelle aus dem Engineering können auch für andere Zwecke genutzt werden. Zum Beispiel kann das System in eine virtuelle Realität, nach Milgram [11], integriert werden. Dadurch ist eine Begehung des Systems ohne eine physisch vorhandene Anlage möglich [8]. Dies erlaubt eine praxisnahe Ergonomieanalyse, die auf den Menschen zugeschnitten ist. Das virtuelle System kann auch für Schulungs- oder Instandhaltungszwecke genutzt werden.

Der folgende Beitrag beschreibt, wie Remote Monitoring und Mixed-Reality-Technologien kombiniert werden können, um direktes Kontextwissen über Prozesse und Daten zu erhalten und gleichzeitig ortsunabhängiges Arbeiten zu ermöglichen. Zunächst wird der Stand der Technik dargestellt. Dabei werden Bereiche außerhalb der Instandhaltung betrachtet, um die Vorteile der eingesetzten Lösungen aufzuzeigen. Anschließend wird ein Konzept vorgestellt, das diese Vorteile vereint.

## 2 Stand der Technik

Im Folgenden wird ein Überblick über verschiedene Arbeiten gegeben, die vielversprechende Konzepte für Technologien enthalten, um eine Mixed-Reality (MR)-unterstützte Instandhaltung zu ermöglichen. Zunächst wird die Fernüberwachung und der Einsatz von Augmented Reality für das Instandhaltungspersonal erläutert. Anschließend wird der Vorteil der stärkeren Einbindung eines ortsfernen Experten in die Mixed Reality beschrieben. Schließlich wird das Konzept der Mixed Reality in the Loop Simulation (MRiLS) vorgestellt.

### 2.1 Augmented Reality in der Instandhaltung

Der Einsatz von Augmented Reality (AR) in der Instandhaltung wurde in der Forschung bereits erörtert. In [8] wird vorgeschlagen, Instandhaltungsinformationen automatisch und kontextsensitiv durch AR-Software anzuzeigen. Diese Arbeit beschäftigt sich auch mit dem Einsatz von Augmented Reality und Virtual Reality (VR) in anderen Bereichen. Auch die Fernwartung ist ein Einsatzgebiet. Hier wählt ein Experte, der sich nicht am selben Ort wie der Instandhaltungstechniker befindet, die anzuzeigenden Informationen aus. Vor allem in diesem Bereich wird der Einsatz von AR gesehen. Allerdings geht dies bereits in Richtung der Bereiche Kollaboration und virtuelle Meetings, bei denen auch VR zum Einsatz kommt. In den meisten Überlegungen zu diesen Anwendungsfällen werden externe Experten nicht in AR oder VR eingebunden. Stattdessen wird ihnen die Möglichkeit gegeben, über einen Desktop, also ein 2- oder 2,5-dimensionales Bild, mit dem AR-Nutzer zu kommunizieren. Dabei können Informationsmarker und Zusatzinformationen eingeblendet werden. Die Bereiche Training und Ausbildung, Prototyping und Anwendungstests werden dagegen in VR umgesetzt. Der Vorteil ist, dass kein reales System verwendet werden muss. Es muss also kein System für Schulungszwecke aufgebaut oder bereitgestellt werden. Zudem können Szenarien getestet werden, die in der Realität katastrophale Folgen für Mitarbeiter oder Systeme hätten. Die Vermittlung von Informationen über bestimmte Komponenten eines Systems ist einfacher, da die Komponenten gekennzeichnet werden können und keine umständlichen Beschreibungen erforderlich sind.

In [12] wurden anhand eines realen Fallbeispiels zwei Szenarien für die Fernwartung einer Stromerzeugungsanlage analysiert.

Dabei wurden die Wartungsvorgänge sowohl mit als auch ohne Einsatz von AR simuliert. Es wurde validiert, dass diese Technologie Zeit sparen und die Genauigkeit erhöhen kann. Im ersten Szenario musste das lokale Wartungspersonal ohne AR-Unterstützung Fragen zur Anlagennummer und zu Fehlerindikatoren beantworten, um professionelle Hilfe zu erhalten. Dieser Prozess ist fehleranfällig und ungenau. Erst Stunden später kam Hilfe in Form eines Experten, der die Anlage kennt. Der Notbetrieb der Anlage konnte dann in wenigen Minuten sichergestellt werden. Die Reparatur kostete den Techniker erneut Reisezeit, um ein passendes Ersatzteil zu organisieren. Der Gesamtaufwand für die Aufgabe wurde auf 20 Stunden geschätzt, wobei 80 % der Zeit auf die Reisezeit des Experten entfielen. Die effektive Arbeitszeit wurde auf 15 Minuten geschätzt.

Im zweiten Szenario wurde AR eingesetzt, um die vorliegende Anlage schnell und präzise zu identifizieren und sofort eine Verbindung zum zuständigen Experten herzustellen. Über Kameras in der AR-Brille konnten dem Experten Fehleranzeichen zur Verfügung gestellt werden. Unter fachkundiger Anleitung konnte der Notbetrieb in wenigen Minuten erreicht werden. Mehrfache Anfahrten eines Experten zur Reparatur entfielen, da das austauschende Teil aus der Ferne identifiziert werden konnte. Dies spart nicht nur Kosten, sondern setzt auch Kapazitäten des Experten für andere Arbeiten frei.

In [12] wird vorgeschlagen, dem Wartungspersonal über die Verbindung zum Experten mit der AR-Brille zusätzliche Daten zur Verfügung zu stellen, um die Fehlersuche effizienter zu gestalten. Der Experte kann das visuelle Bild des Wartungspersonals nutzen, um die nötigen Maßnahmen grafisch zu erläutern. Es wird jedoch nicht spezifiziert, wie die Daten dem Experten angezeigt werden. Die in der praktischen Arbeit festgestellten Defizite sind ebenfalls in der Arbeit aufgeführt. Sie betreffen alle die Darstellung von Hologrammen in AR und die Interaktion mit ihnen.

Die Vorteile von AR im Zusammenhang mit Inbetriebnahme- und Instandhaltungsprozessen werden zunehmend auch in der Industrie erkannt. So werden Softwarelösungen für den praktischen Einsatz von AR entwickelt. Ein Beispiel ist „Kuka.Mixed-Reality“ [13]. Diese Software wird von der Kuka AG für die Inbetriebnahme von Robotern angeboten. In Verbindung mit einer Robotersteuerung können Arbeitsräume in AR auf einem mobilen Endgerät wie Smartphone oder Tablet dargestellt werden.

Ein weiteres Beispiel ist das Projekt der Rud. Prey GmbH & Co. KG. Dort wurde eine AR-Anwendung zur Fernwartung von Fördertechnik entwickelt [14]. Die Anwendung ermöglicht es dem Instandhaltungspersonal an der Förderanlage mit einem entfernten Experten zu kommunizieren. Auch hier können Texte, Videos, Farbmarkierungen oder Konstruktionszeichnungen in Form von Bildern dargestellt werden. Der Experte befindet sich hinter einem zweidimensionalen Bildschirm. Mithilfe einer AR-Brille können technische Informationen angezeigt werden, die von einem Experten aufbereitet wurden. In der Regel handelt es sich um Kreise oder Rahmen, die bestimmte Bereiche markieren und in Echtzeit auf der AR-Brille des Instandhaltungspersonals angezeigt werden.

### 2.2 Kooperative Augmented-Reality-Anwendung

Die oben genannten Beispiele ermöglichen den Austausch von Fachwissen in bestimmten Situationen. Da der Experte aber nicht

vor Ort ist, kann er dem Instandhaltungspersonal die Prozesse nicht zeigen. Stattdessen muss er dem Instandhaltungspersonal durch Sprache und Bilder in der AR-Brille erklären, was zu tun ist. Wäre der Experte im selben Raum, könnte er eingreifen und Abläufe demonstrieren. Dadurch kann das Instandhaltungspersonal auch komplizierte Aufgaben nachvollziehen und selbst ausprobieren. Abhilfe wird durch die Möglichkeit geschaffen, den Experten in eine virtuelle Umgebung zu versetzen.

In [15] wird ein Konzept für diesen Schritt vorgestellt. Es enthält ein Trainingsszenario, in dem ein Experte in einer virtuellen Umgebung Informationen und notwendige Arbeitsanweisungen an das Instandhaltungspersonal übermitteln kann. Verschiedene Vorgehensweisen zur Demonstration von Abläufen werden anschließend in einer Nutzerstudie evaluiert. Es wird davon ausgegangen, dass die realen Objekte als 3D-Modelle vorliegen. Auf Seite des Experten werden immer zwei Versionen der Objekte angezeigt. Es gibt ein Objekt (Proxy), das die physische Komponente in ihrem räumlichen Kontext zeigt, sowie eine virtuelle Kopie des Objekts (Replica), mit der der Experte arbeiten kann.

Die erste Vorgehensweise „Sketch2D“ basiert auf den üblichen Interaktionsmöglichkeiten. Über ein Tablet können Anmerkungen und Skizzen eingegeben werden, die dann auf einen Proxy projiziert werden. Dadurch entfällt das zeitaufwendige Positionieren der Informationen im Raum. Bei der zweiten Vorgehensweise „Point3D“ hat der Experte die Möglichkeit, Marker auf dem Proxy und der Replica zu platzieren. Die Marker sind farb- und formkodiert, um eine eindeutige Zuordnung der markierten Punkte beider Objekte zu ermöglichen. Die räumliche Anordnung ist somit eindeutig. Die dritte Vorgehensweise „Demo3D“ erlaubt es dem Experten, die Nachbildung direkt zu manipulieren, um die Handhabung für das Instandhaltungspersonal zu visualisieren. Um unerwünschte Effekte zu vermeiden, die in der virtuellen Darstellung auftreten können, wie etwa die Durchdringung von Objekten, arbeitet [15] mit definierten Simulationsbedingungen. Diese erlauben die Feinjustierung zweier Objekte zueinander. Die zuvor eingeführten Marker helfen dem Instandhaltungspersonal auch hier, die räumliche Ausrichtung leichter zu bestimmen. Gemäß der Anwenderstudie führte Demo3D zu den schnellsten Testdurchführungen und wurde von den Anwendern als bevorzugte Methode genannt.

Zusätzlich zu den kodierten Markern könnte eine farbliche Kennzeichnung der zu inspizierenden Objekte erfolgen, um dem Instandhaltungspersonal die Orientierung in komplexen Baugruppen zu erleichtern. Dieser Ansatz hat das Potenzial, die Effizienz und Genauigkeit von Instandhaltungsprozessen zu verbessern und die Reaktionszeit bei Problemen zu verkürzen.

## 2.3 Anbindung von Augmented Reality an eine Maschinensteuerung

In der Steuerungstechnik wurde ein Konzept zur Generierung von Testfällen mittels Mixed Reality entwickelt [16]. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit, über eine MR-Erweiterung des Simulationsmodells mit einer Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiLS) direkt zu interagieren. Hierbei wird die reale Steuerung über einen Feldbus mit einer Simulation gekoppelt. Bei der klassischen HiLS erfolgt die Interaktion mit der realen Steuerung über das VIBN-Simulationsmodell auf einem Simulationsrechner. Die Abstraktion des Produktionssystems im VIBN-Simulationsmodell führt zu einem erhöhten Aufwand bei der Erstellung von

Testfällen. Kontextwissen geht verloren und komplexe Systeme können eine Vielzahl von Signalkombinationen aus einer Anlage zulassen. Daher werden die Tests von Experten durchgeführt.

Die Anbindung an eine Testfallgenerierungsumgebung in VR soll sicherstellen, dass die Tests intuitiv durchgeführt werden können. Die Interaktion soll über das virtuelle System erfolgen und nicht mehr über aufwendig abstrahierte Mensch-Maschine-Schnittstellen. Das neue Interaktionskonzept ermöglicht es, Testfälle von verschiedenen Nutzergruppen für das Produktionssystem zu erstellen und durchzuführen. So kann unterschiedliches Expertenwissen in die Testfallerstellung integriert und berücksichtigt werden. Außerdem kann der individuelle Faktor der menschlichen Interaktion besser abgebildet werden als mit bisher definierten und möglicherweise unvollständigen Interaktionsszenarien. Die Anwendung kann von mehreren Personen gleichzeitig und ortsunabhängig genutzt werden. Das Konzept ist in [17] beschrieben und in **Bild 1** skizziert.

Um sicherzustellen, dass alle Benutzer denselben Zustand sehen, werden die einzelnen Visualisierungsgeräte der Benutzer über eine Middleware miteinander sowie mit der Steuerung und weiteren Datenquellen verbunden. Die implementierte Anwendung kommuniziert mit den einzelnen Visualisierungsgeräten über etablierte Webprotokolle und mit der realen Steuerung über OPC UA. Die Anwendung wird für die Inbetriebnahme und Schulung an einer automatisierten Förderanlage eingesetzt.

In [17] wird auch die Instandhaltung als möglicher Anwendungsfall identifiziert. Dabei können Experten das System in einem interaktiven virtuellen Raum erkunden. Der aktuelle Zustand des Systems kann durch die Anbindung an einen OPC-UA-Server visualisiert werden. Zudem können durch die Anbindung an ein MES aktuelle Prozessparameter überprüft werden. Durch die Anbindung an ein ERP-System ist der Zugriff auf historische Instandhaltungsdaten möglich. Dadurch können Entscheidungen präziser und fundierter getroffen und der Instandhaltungsprozess effizienter gestaltet werden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen MRI LS für Schulungszwecke und einer Anwendung für die Instandhaltung ist, dass es sich bei der Instandhaltung um eine vollkommen reale Anlage handelt. Eine Anwendung muss daher in der Lage sein, die Anlage zu erkennen und anderen Teilnehmern virtuell zugänglich zu machen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die reale Anlage auf Eingriffe in die Steuerung reagieren kann. Die Absicherung des Systems ist daher von größter Bedeutung, um zu verhindern, dass Personen oder Material zu Schaden kommen, wenn eine entfernte Person Anweisungen an die Steuerung sendet. Für die Nutzung von MRI LS zu Fernwartungszwecken müssen ähnliche Ziele für die Applikation formuliert werden. Die folgenden Ziele wurden aus [16] übernommen:

- Konsistentes Datenmodell
- Intuitive dreidimensionale Interaktionsmöglichkeiten
- Datenaustausch zur Laufzeit

Weitere Ziele ergeben sich aus dem Instandhaltungsfall:

- Anlagenerkennung
- Umschalten zwischen realer und virtueller Steuerung
- Anbindung historischer Instandhaltungsdaten über ERP
- Anbindung von Produktionsdaten über MES
- Genaue Bestimmung der Position des Workers unter AR
- Darstellung des realen Bildes in VR zur Überprüfung der Korrektheit des Systems

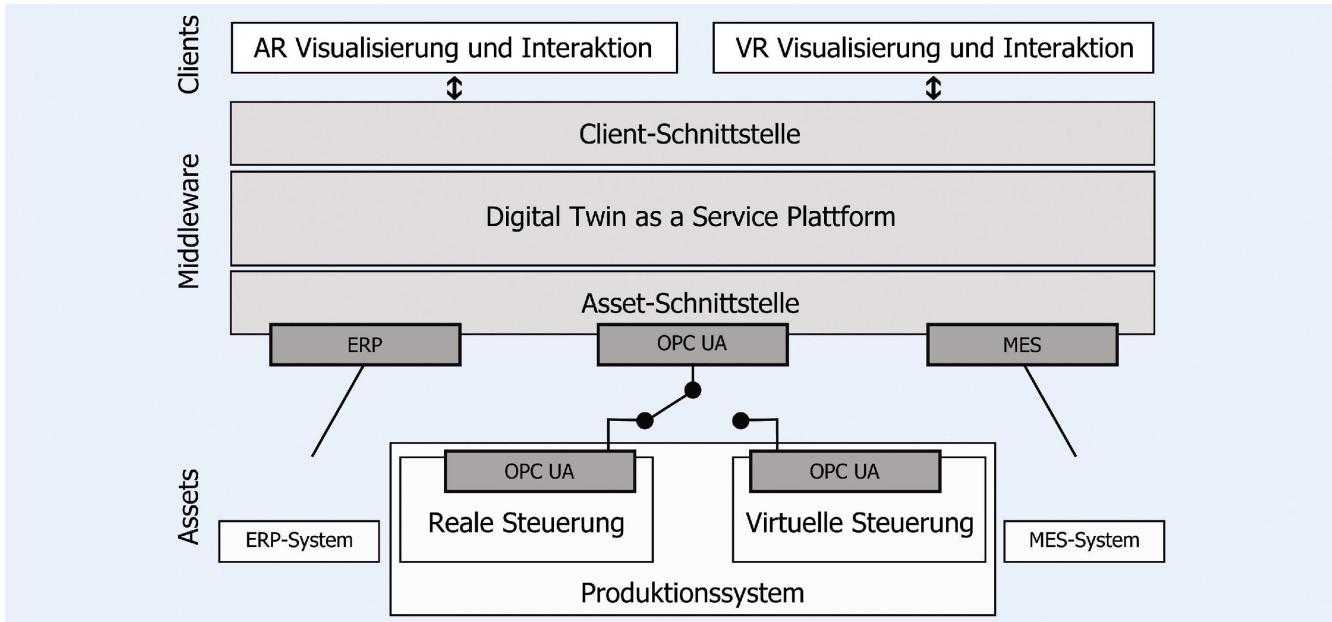


Bild 1. Für die Instandhaltung adaptierte MRiLS (Mixed Reality in the Loop Simulation)-Architektur. Grafik: ISW

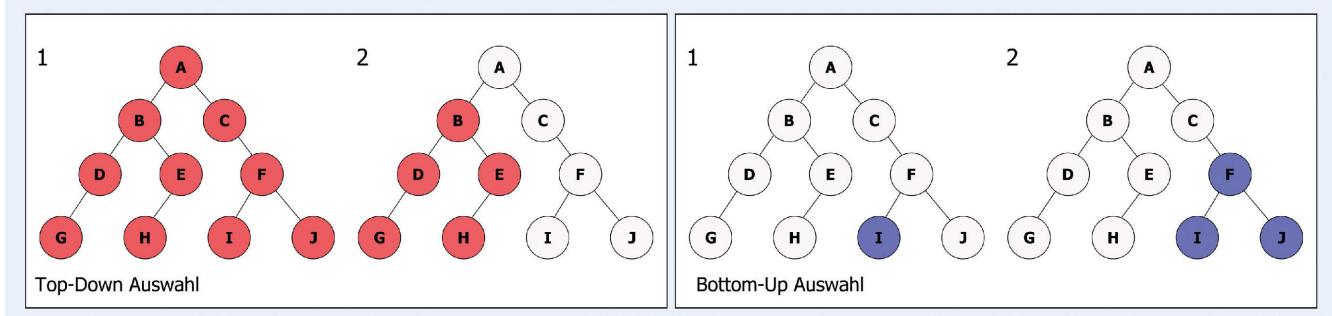


Bild 2. Auswahlmöglichkeiten einer hierarchischen Struktur in MR (Mixed Reality). Grafik: ISW

### 3 Konzept für eine MR-unterstützte Instandhaltung

Das folgende Konzept erweitert das MRiLS-Konzept. Das konsistente Datenmodell wird im Instandhaltungsfall benötigt, um sicherzustellen, dass die reale Anlage in der VR-Umgebung korrekt und voll funktionsfähig dargestellt wird. Eine intuitive dreidimensionale Interaktionsmöglichkeit umfasst nicht nur die Interaktion mit einem einzelnen Objekt, als wäre es physisch vorhanden, sondern auch die Benutzerführung. Im Gegensatz zu MRiLS wird hier nicht mehr ausschließlich mit Interaktionsobjekten wie Schaltflächen gearbeitet, sondern mit einer erweiterten Simulationsinteraktion im Bereich eines hierarchisch strukturierten Modells. Das Ziel besteht darin, einzelne Bauteile sowie Baugruppen auszuwählen, zu markieren und zu verschieben.

Zur Auswahl virtueller Bauteile oder Baugruppen können Konzepte genutzt werden, die in gängigen CAD-Programmen verwendet werden. Hierbei kann die Anlagenstruktur über eine textbasierte Hierarchie in Form einer Baumstruktur ausgewählt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine Komponente direkt im Viewer eines CAD-Programms auszuwählen. Während in der Baumstruktur ein übergeordneter Knoten ausgewählt werden kann, um eine Baugruppe direkt auszuwählen, erfolgt die Auswahl im Viewer entweder nach der Top-Down-Methode oder

nach der Bottom-Up-Methode. Bei der Top-Down-Methode werden die Wurzel der Hierarchie und alle untergeordneten Knoten ausgewählt und markiert (Bild 2, links 1).

Wenn die gewünschte Komponente oder Baugruppe erneut ausgewählt wird, wird der nächste Knoten unterhalb der Wurzel ausgewählt, dessen Kinder die gewünschte Komponente enthalten. Die Markierung der Wurzel und aller Knoten, in denen die ausgewählte Komponente nicht enthalten ist, wird aufgehoben (Bild 2, links 2). Dieser Vorgang kann rekursiv durchgeführt werden, bis die gewünschte Baugruppe ausgewählt ist. Dies steht im Gegensatz zur Bottom-Up-Auswahl, bei der der Knoten der ausgewählten Komponente in der Hierarchie ausgewählt wird (Bild 2, rechts 1). Durch erneutes Auswählen werden der übergeordnete Knoten und alle seine Kinder ausgewählt (Bild 2, rechts 2). Dieser Vorgang kann auch rekursiv wiederholt werden, bis die gewünschte Baugruppe selektiert und markiert ist.

Bei einer flachen Hierarchie empfiehlt sich die Top-Down-Auswahl, da sie einen schnellen Zugriff auf eine komplette Baugruppe ermöglicht. Bei einer tiefen Hierarchie hingegen ist es oft notwendig, die Komponenten rekursiv auszuwählen, was zu Verzögerungen im Prozess führen kann. In diesem Fall ist die Bottom-Up-Auswahl vorzuziehen. Allerdings ergibt sich dann ein Problem bei der Auswahl verdeckter Teile. In Bezug auf die Instandhaltung der realen Anlage kann dieses Problem jedoch ver-

nachlässt werden, da Teile wie etwa Maschinenverkleidungen in der Regel demontiert werden müssen, um an verdeckte Teile zu gelangen und diese auszutauschen. Es wurde eine erste, nicht repräsentative Nutzerbefragung durchgeführt, um dieses Verfahren zu testen. Die Testpersonen wurden gebeten, bestimmte Komponenten aus virtuellen Maschinen so schnell wie möglich zu entfernen, was der Instandhaltung entspricht. Die Nutzerbefragung ergab, dass die Nutzer einer VR-Anwendung eine Bottom-up-Auswahl zu bevorzugen scheinen. Es zeigte sich auch, dass Testpersonen möglicherweise direkt mit den virtuellen Komponenten arbeiten möchten, anstatt eine Auswahl über eine textuelle Hierarchie zu treffen.

Die Zusammenarbeit erfordert den Austausch von Daten, damit alle Beteiligten auf dieselbe Datenbasis zurückgreifen können. Es ist wichtig, dass die Daten regelmäßig aktualisiert werden, da sie sich während der Instandhaltung ändern können. Dafür kann die Struktur des MRiLS genutzt werden. Der in MRiLS verwendete OPC-UA-Server wird auch in diesem Konzept verwendet, um aktuelle Daten aus einem System auszulesen. Zusätzlich kann es vorteilhaft sein, eine Anbindung an ein MES für Produktionsdaten und an ein ERP-System für historische Instandhaltungsdaten zu haben (vergleiche Bild 1). Die Integration eines MES kann die Analyse weiterer Prozessparameter ermöglichen, um fehlerhafte Einstellungen zu identifizieren.

Die Idee der ERP-Integration besteht darin, historische Instandhaltungsinformationen für die aktuelle Instandhaltung zu nutzen. Wenn ein Fehlermuster bereits in der Vergangenheit aufgetreten ist, können die gesammelten Erfahrungen genutzt werden. Das ERP-System kann entweder das des Anlagenbetreibers sein, der die Instandhaltung möglicherweise ohne den Spezialisten durchgeführt hat, oder das des Herstellers. Wenn der Hersteller baugleiche Anlagen an anderen Standorten hat, kann auch auf deren Instandhaltungshistorie zugegriffen werden. Dadurch wird der Wissenspool vergrößert. Mithilfe des Model-Based Systems Engineering [18] kann die Komplexität der zu erwartenden Daten bewältigt werden.

Die Identifikation der zu wartenden Anlage ist notwendig, um den richtigen Experten zu kontaktieren und die passende Anlage in die VR zu laden. Die Identifikation kann markerbasiert oder markerlos erfolgen. Bei der markerbasierten Identifikation kann beispielsweise ein QR-Code an der Anlage angebracht werden, der auf die entsprechenden Modelldaten und den zugehörigen Experten verweist. Diese Daten können automatisch in die VR-Brille des Experten geladen werden. Besondere Merkmale einer Anlage, auch als Features bezeichnet, können mithilfe einer Software für markerlose Objekterkennung direkt auf der AR-Brille erkannt werden. Sind die Objekte erkannt, müssen sie noch mit dem Modell verglichen werden, da es sein kann, dass an der Anlage Veränderungen vorgenommen wurden oder Schäden auftreten sind, die nicht in das digitale Modell übertragen wurden. Methoden wie die Photogrammetrie oder NeRF-Algorithmen erlauben die automatische Integration bisher unbekannter Komponenten einer Anlage in das digitale Modell. Um dem Experten die Möglichkeit zu geben, die reale und die virtuelle Anlage zu vergleichen, ist das Verfahren zum Umschalten und Einfrieren von Ansichten, beschrieben in [15], vorgesehen.

Eine Softwareanwendung stellt die Verbindung zu einer Anlage über einen OPC-UA-Server her. Der OPC-UA-Server kommuniziert regelmäßig mit einer realen oder virtuellen Steuerung. Die reale Steuerung ist entweder mit einem realen System oder

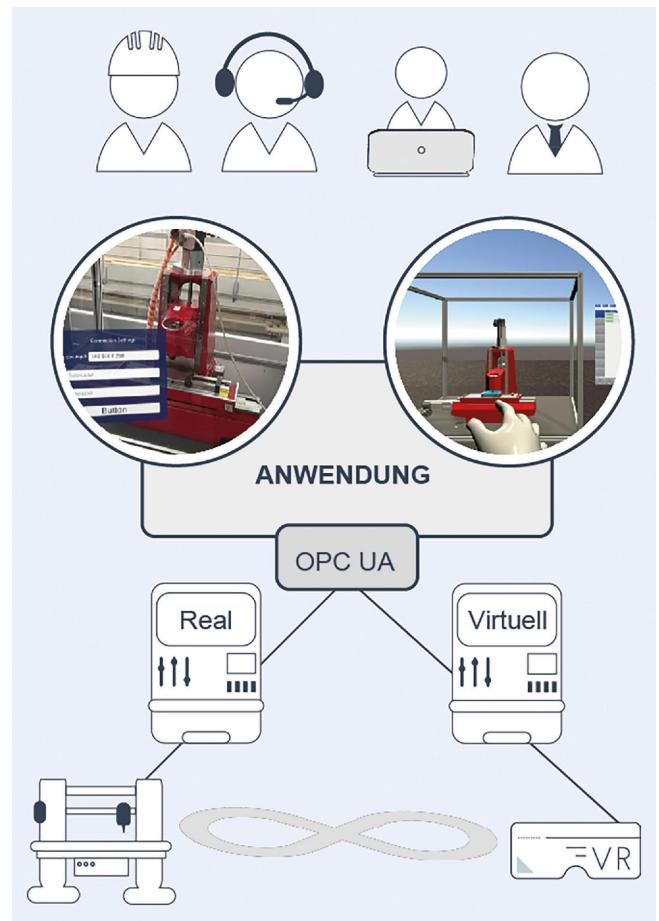


Bild 3. Anwenderzugriff auf reale und virtuelle Steuerungen. Grafik: ISW

einem virtuellen System verbunden, das während des Betriebs läuft. Die virtuelle Steuerung dagegen ist nur mit einem virtuellen System verbunden. Werker greifen meist nur auf das reale System zu, während Entwicklungsingenieure hauptsächlich das virtuelle System nutzen. Ein Servicetechniker sollte jedoch die Möglichkeit haben, zwischen dem realen und virtuellen System zu wechseln. Zu diesem Zweck wird der aktuelle Zustand eines realen Systems betriebsbegleitend erfasst und an das virtuelle System weitergeleitet. Dies ist in Bild 3 dargestellt.

Für den Experten kann es erforderlich sein, direkten Zugriff auf die reale Steuerung zu haben. In diesem Fall muss von der Simulation während des Betriebs auf die reale Anlage unter VR umgeschaltet werden. Hierfür ist das Konzept der hybriden Inbetriebnahme vorgesehen [19]. So kann der Experte spezielle Testprogramme auf der Steuerung ausführen und Fehler weiter eingrenzen.

Allerdings ist unbedingt sicherzustellen, dass an der realen Anlage keine Person in eine gefährliche Situation gerät. Unerwartete Befehle an die reale Steuerung können zu gefährlichen Situationen für das Instandhaltungspersonal führen. Daher ist es wichtig, dass die Position des Instandhaltungspersonals bekannt ist. Auch hier können die AR-Brillen des Instandhaltungspersonals eingesetzt werden. Zum einen kann mithilfe der AR-Brille die Position des Instandhaltungspersonals anhand der beschriebenen Objekterkennung geschätzt werden. Zur Unterstützung des Experten wird die geschätzte Position des Instandhaltungspersonals als Phantom in VR dargestellt. Andererseits kann das Kamerabild der

AR-Brille mit dem VR-Bild des Experten auf Basis eines Bildtransfers überlagert werden. Der Experte kann das Instandhaltungspersonal zu sicheren Positionen führen und überprüfen, ob eine potenzielle Gefahr für andere Personen besteht.

## 4 Beispielszenario

Die Ausgangssituation für das Szenario ist, dass das Instandhaltungspersonal eine Instandhaltung an einer realen Anlage durchführt und Unterstützung benötigt. Über eine Anwendung auf der AR-Brille wird ein externer Experte kontaktiert. Die Verbindung kann über die MRiLS-Infrastruktur hergestellt werden. Eine automatische Erkennung, entweder markerbasiert oder markerlos, stellt sicher, dass der Experte die richtige Anlage vor sich sieht. Die unterschiedlichen Ansichten von Instandhaltungspersonal, welches eine AR-Brille trägt, und Experten, die sich in einer VR-Umgebung befinden, sind ebenfalls in Bild 3 dargestellt.

Das aktualisierte Modell wird dem Experten in der VR angezeigt. Abweichungen zum vorherigen Modell werden hervorgehoben. Dabei ist festzustellen, ob sich die Anlage in der Realität von der in der virtuellen Realität unterscheidet, beispielsweise durch nachträgliche Veränderungen oder offensichtliche Beschädigungen. Wenn eine markerlose Erkennung der Anlage realisiert wird, kann dieser letzte Schritt entfallen. Über eine OPC-UA-Verbindung werden die aktuellen Werte der Steuerung ausgelesen, um alle relevanten Daten zu erhalten. Dieser Snapshot dient als Grundlage für eine Simulation im laufenden Betrieb. Die VR-Darstellung des Experten wird mit der Simulation im laufenden Betrieb abgeglichen. So erhält er den aktuellen Anlagenzustand und kann eine erste Fehlerdiagnose durchführen. Ist diese nicht schlüssig, kann ein vorhandenes MES eingebunden werden. Mit diesem Verfahren können weitere Prozessparameter analysiert werden, um fehlerhafte Einstellungen zu identifizieren.

Wenn ein Fehler durch visuelle Inspektion, historische Instandhaltungsdaten, Prozessdaten oder Testprogramme identifiziert wird, kann der Experte die sofortige Behebung veranlassen. Dies kann durch Anpassung der Software oder der Prozessparameter erfolgen. Wenn ein defektes Bauteil vorliegt, kann der Experte das Instandhaltungspersonal vor Ort beim fachgerechten Austausch unterstützen. Dazu schaltet der Experte während des Betriebs zurück in die Simulation. Die Anwendung ermöglicht es, einzelne virtuelle Bauteile oder Baugruppen zu markieren und zu verschieben. Die Markierungen und Bewegungen werden dem Instandhaltungspersonal auf der AR-Brille angezeigt, sodass die notwendigen Arbeiten zeitgleich an der realen Anlage durchgeführt werden können. Die durchgeföhrten Arbeitsschritte können erfasst und zur Dokumentation der durchgeföhrten Instandhaltungsarbeiten verwendet werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die zahlreichen Möglichkeiten von Industrie 4.0 können kombiniert werden, um interessante Lösungen zu schaffen. Das vorgestellte Konzept für eine MR-unterstützte Instandhaltung baut auf dem bestehenden MRiLS-Konzept auf und erlaubt eine intuitive und effiziente Instandhaltung von Anlagen. Es bietet die Möglichkeit einer dreidimensionale Interaktion, die über herkömmliche Methoden hinausgeht. Benutzer können einzelne Bauteile sowie Baugruppen auswählen, markieren und verschieben. Die Neuheit dieses Ansatzes besteht darin, dass für eine ver-

besserte und flexiblere Zusammenarbeit zwischen dem Instandhaltungspersonal vor Ort und einem ortsfernen Experten der Letztere in eine virtuelle Realität versetzt wird. Dort kann er die zu instandhaltende Anlage begutachten. Bisher befand sich der Experte mit eingeschränkten Möglichkeiten vor einem Desktop. Diese Änderung ermöglicht es, die Vorteile realer Schulungen zu nutzen, indem durchzuführende Arbeiten vorgeführt und analysiert werden können. Für die Integration wird das bestehende MRiLS-Konzept genutzt. Die Integration von ERP- und MES-Systemen ermöglicht die Nutzung historischer Daten für die Instandhaltung und die Analyse weiterer Prozessparameter.

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart plant die Erprobung dieses Konzepts. Es soll validiert werden, ob es effektiv, benutzerfreundlich und in realen Szenarien anwendbar ist. Dabei sollen potenzielle Schwachstellen identifiziert und Verbesserungen vorgenommen werden, um das Konzept für den praktischen Einsatz zu optimieren.

### L iteratur

- [1] Masood, T.; Sonntag, P.: Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry* 121 (2020), #103261
- [2] Zheng, T.; Ardolino, M.; Bacchetti, A. et al.: The impacts of Industry 4.0: a descriptive survey in the Italian manufacturing sector. *Journal of Manufacturing Technology Management* 31 (2020) 5, pp. 1085–1115
- [3] Guertler, M. R.; Schneider, D.; Heitfeld, J. et al.: Analysing Industry 4.0 technology-solution dependencies: a support framework for successful Industry 4.0 adoption in the product generation process. *Research in Engineering Design* 35 (2023), pp. 115–136
- [4] Peichl, A.; Sauer, S.; Wohlrabe, K.: Fachkräftemangel in Deutschland und Europa – Historie, Status quo und was getan werden muss. *ifo Schnelldienst* 75 (2022) 10, S. 70–75
- [5] Deb, P.; Furceri, D.; Ostry, J. D. et al.: The Economic Effects of COVID-19 Containment Measures. *Open Economies Review* 33 (2022) 1, pp. 1–32
- [6] Si, G.; Xia, T.; Zhang, K. et al.: Technician Collaboration and Routing Optimization in Global Maintenance Scheduling for Multi-Center Service Networks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 19 (2022) 3, pp. 1542–1554
- [7] Hao, Y.; Helo, P.; Gunasekaran, A.: Cloud platforms for remote monitoring system: a comparative case study. *Production Planning & Control* 31 (2020) 2–3, pp. 186–202
- [8] Grothus, A.; Thesing, T.; Feldmann, C.: Mixed Reality: Anwendungsbeziehe, Prozess zur AR-/VR-Anwendung, Nutzen und Grenzen. In: Grothus, A.; Thesing, T.; Feldmann, C. (Hrsg.): *Digitale Geschäftsmodell-Innovation mit Augmented Reality und Virtual Reality*. Heidelberg: Springer 2021, S. 7–42
- [9] Illmer, B.: Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2022
- [10] Deubert, D.; Klingel, L.; Selig, A.: Online simulation at machine level: a systematic review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 131 (2024), pp. 977–998
- [11] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A. et al.: *Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum*. Photonics for Industrial Applications, Telemanipulator and Telepresence Technologies, Boston, MA, 1995, pp. 282–292
- [12] Brumm, D.; Waldner, Y.; Kupsky, M.: Servicetechniker in der Industrie 4.0. In: Orsolits, H.; Lackner, M. (Hrsg.): *Virtual Reality und Augmented Reality in der Digitalen Produktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2020, S. 99–126
- [13] Import, M. V.: Kuka vereinfacht Roboter-Inbetriebnahme mit Augmented Reality. Stand: 30.01.2024. Internet: [automationspraxis.industrie.de/news/kuka-ver einfacht-roboter-inbetriebnahme-mit-augmented-reality/](http://automationspraxis.industrie.de/news/kuka-ver einfacht-roboter-inbetriebnahme-mit-augmented-reality/). Zugriff am 10.06.2024
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (Hrsg.): *Remote Work – Themenheft Mittelstand-Digital*. Stand: November 2022. Internet: [www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/remote-work.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/remote-work.pdf?__blob=publicationFile&v=1). Zugriff am 10.06.2024

- [15] Oda, O.; Elvezio, C.; Sukan, M. et al.: Virtual Replicas for Remote Assistance in Virtual and Augmented Reality. UIST '15: The 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Charlotte NC USA, 2015, pp. 405–415
- [16] Höning, J.; Schnierle, M.; Röck, S. et al.: Konzept zur Testfallgenerierung mittels Mixed Reality/Concept for test case generation using Mixed Reality. wt Werkstattstechnik online 113 (2023) 5, S. 200–206
- [17] Schnierle, M.; Höning, J.; Röck, S.: Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation. In: Verl, A.; Röck, S.; Scheifele, C. (Hrsg.): Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung. Heidelberg: Springer 2024, S. 271–303
- [18] Masić, J.; Schneider, B.; Kürümüoğlu, M. et al.: Beyond Model-Based Systems Engineering towards Managing Complexity. Procedia CIRP 91 (2020), pp. 325–329
- [19] Fur, S.; Riedel, O.; Verl, A.: Hybrid Commissioning of Production Plants. 2021 IEEE 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Västerås, Sweden, 2021, pp. 1–6

**Nico Brandt, M.Sc.**

Foto: ISW

nico.brandt@isw.uni-stuttgart.de

Tel. +49 711 / 685-82393

**Daniel Littfinski, M.Sc.****Prof. Dr. Oliver Riedel**

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)

Universität Stuttgart

Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart

www.isw.uni-stuttgart.de

**LIZENZ**

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