

Wer und was ist wo? – Synchronisation von Virtueller und Erweiterter Realität

Alexander Kögel¹

¹TU Chemnitz – Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement

Zusammenfassung

Virtual- und Augmented Reality (VR / AR) werden in der Industrie bislang meist als alleinstehende Systeme genutzt. Damit AR-Anwendende im Feld sich von Experten bzw. Expertinnen, die sich an einem entfernten Ort in einer VR befinden, unterstützen lassen können, müssen beide Welten kontinuierlich synchronisiert werden. Dafür sind verschiedene Konzepte nutzbar.

1 Einleitung

Die VR- und AR-Technologien erfuhren in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte: Immer schnellere und dabei zunehmend mobile und energieeffiziente Rechnerhardware erlaubte deutliche Steigerungen hinsichtlich der Auflösung, Anzahl der darstellbaren Polygone und der erzielbaren Bildwiederholraten. Auch Eingabe- und Interaktionsmethoden wurden stetig verbessert – etwa durch das Inside-Out Tracking ohne externe Sensoren, spezielle Marker und das automatische Erfassen von Hand- und Fingerpositionen. Dies erlaubt es, Gesten und Bewegungen des menschlichen Körpers – bis hin zur Mimik der Nutzenden – ohne störende Zusatzhardware wie Datenhandschuhe oder in den Händen getragene Controller zu erfassen. VR- und AR-Systeme können heute mobil und autark, ohne Anbindung an ortsfeste Rechnersysteme betrieben werden. Gleichzeitig stieg die Verbreitung solcher Systeme durch immer erschwinglichere, auch für den Consumer erhältliche, Produkte.

Im industriellen Kontext eignet sich VR insbesondere für Aufgaben im Engineering; AR ist für Anwendungen im Feld (z. B. Bei der Wartung oder Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen) prädestiniert.

2 VR/AR-Kopplung zur Fernunterstützung

Für die Fernunterstützung von Personen, die im Feld z. B. eine Wartung an einer Maschine ausführen, durch Expertinnen oder Experten, die an einem entfernten Standort über Wissen und digitale Daten zu der Maschine sowie eine VR-Umgebung verfügen, bietet es sich an, VR- und AR-Systeme miteinander zu koppeln. Das ermöglicht eine gemeinsame Interaktion in einer hybriden Umgebung. Dabei können Avatare eine entscheidende Rolle spielen, da sie es den Nutzenden erlauben, sich gegenseitig so wahrzunehmen und miteinander zu interagieren, als wären sie physisch im selben.

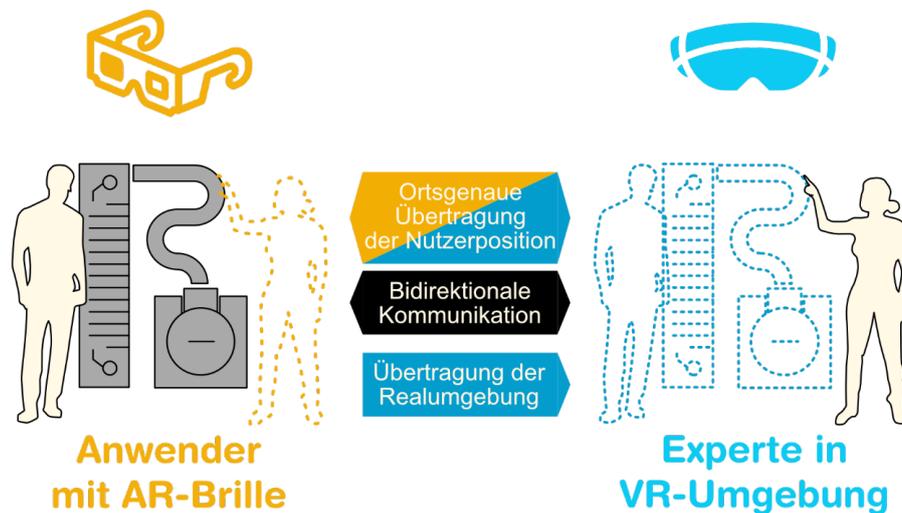


Abbildung 1: Konzept der VR-AR-Kopplung im Projekt TeleInteraction-XR

Die Person im Feld sieht dabei die reale Umgebung, in welcher das Abbild der Person aus der VR als virtueller Avatar dargestellt ist. Die Person, die das VR-System nutzt, sieht sowohl die Person im Feld als auch deren Umgebung (bzw. den für die Unterstützung notwendigen Teil dieser Umgebung) als virtuelle Abbilder. Die Positionierung der Personen untereinander, als auch relativ zur Realumgebung, wird dabei erfasst und bidirektional übertragen. So können sich beide Personen zielgerichtet bestimmten Orten (Points of Interest, POI) zuwenden, etwa einem Bedienpanel einer Anlage, und dort mittels Gesten auf ein Objekt zeigen. Das jeweilige Gegenüber kann lage- und ausrichtungsrichtig das Ziel der Geste wahrnehmen.

3 Eigenschaften von VR, AR und Avataren

Systeme der **Virtuelle Realität (VR)** umgeben den Nutzer vollständig mit einer digitalen Umgebung und schotten ihn von der realen physischen Welt ab. Sie zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

Virtualität: VR erzeugt eine umfassend computergenerierte Umgebung, in die Nutzende vollständig eintauchen kann (Immersion). Diese virtuelle Welt kann reale oder fiktive Szenarien darstellen und bietet eine hohe Gestaltungsfreiheit. Die Virtualität erlaubt es, beliebige Szenarien zu kreieren, sei es die Nachbildung realer Orte oder fantastischer Welten, was eine hohe Erlebnisvielfalt ermöglicht.

Interaktion: Nutzende können mit der virtuellen Umgebung und den darin befindlichen Objekten interagieren. Diese Interaktionen sind essenziell für das Gefühl der Präsenz in der virtuellen Welt. Die virtuelle Umgebung reagiert dabei dynamisch auf die Handlungen der Nutzenden, wodurch eine wechselseitige Beeinflussung zwischen Nutzenden und Umgebung entsteht.

Echtzeit: Für ein immersives VR-Erlebnis ist es notwendig, dass alle Interaktionen und Bewegungen in Echtzeit verarbeitet und dargestellt werden. Verzögerungen (Latenzen) können das Gefühl der Präsenz erheblich beeinträchtigen. Moderne VR-Systeme streben Latenzzeiten unter 20 Millisekunden an, um eine flüssige und realistische Darstellung zu gewährleisten.

Stereoskopie: VR nutzt stereoskopische Techniken, um dem Nutzer ein dreidimensionales Seherlebnis zu bieten. Durch die Darstellung leicht unterschiedlicher Bilder für jedes Auge wird ein Tiefeneindruck erzeugt, der zur Immersion beiträgt: Die Stereoskopie verstärkt das Gefühl, tatsächlich in der virtuellen Umgebung anwesend zu sein, und verbessert die räumliche Wahrnehmung.

Maßstabstreue: Eine maßstabsgetreue Darstellung ist notwendig, um die Proportionen der virtuellen Umgebung und der darin enthaltenen Objekte korrekt wiederzugeben. Dies hilft dem Nutzenden, Entfernungen und Größenverhältnisse realistisch einzuschätzen. Maßstabstreue ist besonders wichtig für Anwendungen wie Architekturvisualisierungen und Simulationen, bei denen eine präzise Darstellung essenziell ist.

Augmented Reality (AR) ergänzt die reale Welt durch digitale Informationen und Objekte, ohne die Nutzenden von ihrer Umgebung abzuschotten.

Charakteristische Eigenschaften von AR sind:

Überlagerung der realen Welt: AR-Systeme überlagern die reale Welt mit digitalen Informationen. Diese Überlagerungen können sowohl visuelle als auch

auditive Informationen umfassen und dienen dazu, die Wahrnehmung der Realität zu erweitern. AR kann kontextabhängige Informationen liefern, die Nutzenden in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden.

Interaktive Ergänzungen: AR ermöglicht interaktive Ergänzungen zur realen Umgebung. Nutzende können mit den eingeblendeten Informationen und Objekten interagieren, was neue Möglichkeiten für Anwendungen wie Navigation, Bildung und Unterhaltung eröffnet. Beispielsweise können Nutzende mit virtuellen Anleitungen interagieren, die über reale Objekte gelegt werden.

Mobilität: AR-Anwendungen sind in der Regel für mobile Geräte wie Smartphones und Tablets vorgesehen. Dies ermöglicht eine flexible und ortsunabhängige Nutzung. Tragbare AR-Brillen und Headsets bieten zudem eine freihändige und immersive Nutzungserfahrung.

Echtzeit-Rendering: Wie bei VR ist auch bei AR eine Echtzeit-Verarbeitung notwendig, um die digitalen Überlagerungen nahtlos in die reale Umgebung zu integrieren. Verzögerungen würden die Erfahrung der Nutzenden negativ beeinflussen. Echtzeit-Rendering ist entscheidend für Anwendungen, bei denen präzise und sofortige Reaktionen erforderlich sind, wie in der industriellen Wartung oder der Chirurgie.

AR ist besonders nützlich für Aufgaben, bei denen aus der realen Welt heraus der Zugriff auf zusätzliche Informationen und Anweisungen in Echtzeit erforderlich ist. AR ist ideal für Anwendungen im Feld, da es ihnen ermöglicht, relevante Daten und Anweisungen direkt in ihrem Sichtfeld zu erhalten, ohne ihre Arbeit unterbrechen zu müssen. Beispiele hierfür sind Wartungstechniker, die Reparaturanweisungen direkt auf Maschinen projiziert bekommen, oder medizinisches Personal, das während einer Operation zusätzliche Informationen erhält. Reize aus der Umgebung, welche beispielsweise zum Erkennen von Gefahren notwendig sind, werden nicht systembedingt ausgeblendet. Schlecht designte audiovisuelle Inhalte, welche über das AR-System präsentiert werden, können aber dennoch die Sicht blockieren, akustische Signale übertönen und generell die Aufmerksamkeit von Nutzenden von seiner Umgebung ablenken, was bei der Gestaltung der Inhalte beachtet werden muss.

Avatare in der Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) sind digitale Darstellung von Nutzenden, die als deren Stellvertretende in der virtuellen oder erweiterten Umgebung fungieren. Diese Darstellung kann in Form eines realistischen 3D-Modells, einer abstrahierten Darstellung oder, im einfachsten Fall, durch ein beliebiges grafisches Symbol erfolgen.

Im Rahmen des Konzepts der Mensch-Computer-Interaktion ist ein Avatar eine wahrnehmbare digitale Darstellung, deren Verhaltensweisen die Verhaltensweisen eines bestimmten Menschen widerspiegeln.[1]

Die Entwicklung von Avataren hat ihren Ursprung in den frühen Computerspielen und Online-Communities der 1980er Jahre. „Der Begriff und das Konzept tauchten tatsächlich bereits 1984 in Online-Multiuser-Dungeons oder MUDs (Rollenspielumgebungen) auf, und das Konzept, wenn auch nicht der Begriff, erscheint in fiktiven Werken, die bis Mitte der 1970er Jahre zurückreichen“ [1]. Die zunehmende Rechenleistung ermöglicht immer realistischere und immersivere Avatar-Darstellungen. Zur Vermittlung von spezifischen Inhalten und für eine hinreichende Präsenz-Erfahrung – gerade bei der Anwendung für Instruktionen und Schulungen – haben sich jedoch auch einfachere, nur auf den Oberkörper, Kopf und die Hände beschränkte Darstellungen als sinnvoll erweisen [2].

4 Datensynchronisierung

4.1 Identifizierung relevanter Daten

Ausgehend von dem oben beschriebenen Konzept der VR-AR-Kopplung im Projekt TeleInteraction-XR (vgl. Abbildung 1), wurden drei Gruppen von zu übertragenden Daten identifiziert:

Übertragung der Nutzerposition: Darunter fallen alle Daten, welche benötigt werden, um die Avatare des Gesprächspartners in ihrer Lage und Ausrichtung korrekt darzustellen.

Bidirektionale audiovisuelle Kommunikation: Neben dem gesprochenen Wort, welches essenziell zur Kommunikation zwischen Personen im Feld und der aus der Ferne unterstützenden Person ist, sind auch Videodaten zu übertragen. Diese können Detail-Informationen vermitteln, welche sich nur schwer verbal beschreiben oder nicht hinreichend gut als virtuelles Modell abbilden lassen.

Übertragung der Realumgebung: Zumindest die im Fokus der Fernunterstützung stehenden Objekte, wie Maschinen oder Maschinenteile, müssen in die VR-Umgebung des Experten übertragen werden.

Im letzten Punkt lag eines der Kernziele des Projekts TeleInteraction-XR. In drei aufeinander aufbauenden Umsetzungsvarianten wurden verschiedene Techniken zur Übertragung bzw. Bereitstellung von Daten zur Realumgebung erstellt und getestet.

In der *Basisvariante* kommen vormodellierte, dreidimensionale Modelle von Maschinen und Anlagen zum Einsatz. Dies ist die bisher weit verbreitete Vorgehensweise zur Erstellung von AR- und VR-Szenarien. Dabei werden alle

Objekte, die in der virtuellen Umgebung zu sehen sein sollen, im Vorfeld als dreidimensionale Computergrafik bereitgestellt. Dies kann anhand von Bildvorlagen, Zeichnungen, Beschreibungen oder auf Basis bestehender CAD-Modelle erfolgen. Auch letztere müssen in die für VR- und AR-Anwendungen eingesetzten, Vertex-basierten polygonalen Modelle transferiert werden.

Vorteil dieser Basisvariante ist, dass jedes benötigte Detail für eine erfolgreiche Fernunterstützung in entsprechender Qualität ausmodelliert und in der VR-Umgebung zur Verfügung gestellt werden kann. Nachteile sind die benötigte Vorlaufzeit und die durch Modellierung oder Konvertierung entstehenden Kosten. Auch kann diese Technik nicht bei hochdynamischen Objekten und Umgebungen angewandt werden.

In Fokus der *zweiten Umsetzungsvariante* stehen 2D- und stereoskopische bzw. 360°-Videostreams zur Übertragung der Umgebung des AR-Nutzenden in die virtuelle Welt des VR-Nutzenden. Übertragen werden dabei nicht allein die Objekte, die direkter Gegenstand der Fernunterstützung sind, sondern auch die erweiterte räumliche Umgebung. Dadurch sollen VR-Nutzenden den räumlichen Kontext – etwa bauliche Gegebenheiten sowie die Ver- und Entsorgungsinfrastruktur – erfassen können.

Durch das Streaming können auch dynamische oder bezüglich Größe und Detailvielfalt nur schwer als 3D-Modell umsetzbare Umgebungen schnell und kostengünstig in die VR übertragen werden. Limitierend wirkt sich die bei einfachen 360°-Aufnahmen fehlende oder nur aufwändig zu erfassende Tiefeninformation aus. Änderungen der Position von VR-Nutzenden erfordern eine identische Änderung der Position der aufzeichnenden Kameras, um die korrekte Perspektivendarstellung zu erreichen.

In der *dritten Variante* werden die Tiefensensoren der AR-Brille genutzt. Die so aus der Umgebung gewonnenen Daten werden dynamisch in die VR-Umgebung übertragen und dort in Quasi-Echtzeit abgebildet. Der Vorteil dieser Variante besteht in der schnellen, dreidimensionalen Erfassung und Übertragung der Realumgebung mit in der AR-Brille integrierter Technik. Limitierend sind die schnelle steigende Datenmenge und die nach aktuellem Stand der Technik eingeschränkte Detailgenauigkeit, da AR-Brillen mit den Tiefensensoren erfassten Daten ursprünglich nur zu Navigationszwecken erfassten.

4.2 Herausforderungen bei der Datensynchronisation

Hintergrund: Eine computergenerierte dreidimensionale Umgebung, wie sie in AR- und VR-Systemen zum Einsatz kommt, basiert auf polygonalen Modellen aus einer Anzahl Flächen, deren Ecken durch Scheitelpunkte (Vertices)

definiert sind. Diese Punkte sind die grundlegende visuelle Einheit im 3D-Raum. Sie besitzen keine Größe, sondern nur eine Position im Raum. [3]

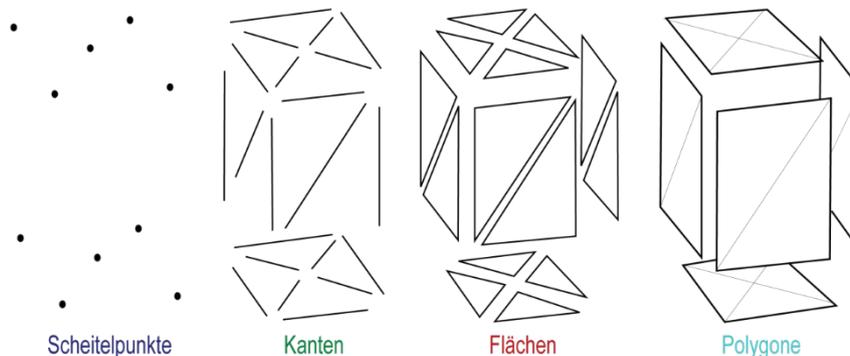


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Scheitelpunkten, Kanten, Flächen und Polygonen [3]

Für die Lagebestimmung der Scheitelpunkte kommen verschiedene Koordinatensysteme zum Einsatz. Die sogenannten Weltkoordinaten (World Space) ist das dreidimensionale Koordinatensystem für die gesamte Szene. Sein Ursprung (Origin) liegt in der Mitte der Szene. Die Achsen des World Space werden in der Regel mit x, y und z bezeichnet, wobei z meist die nach oben zeigender Achse darstellt. Der Objektraum (Object Space) ist das Koordinatensystem aus der Sicht eines Objekts. Die Position der Vertices eines Objektes werden im Koordinatensystem des Objektraum definiert. Der Ursprung des Objektraums besitzt eine Positionskomponente (x/y/z-Komponente) und Rotationskomponente (dargestellt als Eulerwinkel oder Quaternion) im World Space. Der Ursprung eines Objektraums ist somit auch Drehpunkt des Objekts im World Space. Der lokale Raum (Local Space) ist dem Objektraum ähnlich, verwendet jedoch den Ursprung und die Achsen des übergeordneten Knotens des Objekts in einer Gruppe von miteinander verknüpften Objekten. Dies ist nützlich, wenn ein Objekt nicht einzeln, sondern mit der übergeordneten Objektgruppe bewegt oder rotiert werden soll. [4]

Modellbereitstellung: Bevor die Lage von Objekten oder Avataren zwischen der AR- und der VR-Seite abgeglichen und synchronisiert werden kann, müssen die Daten zur Darstellung dieser Objekte zur Verfügung gestellt werden. Hierbei stehen grundsätzlich drei Ansätze zur Auswahl: die dynamische Übertragung, ein manueller Austausch oder die feste Hinterlegung von Daten im System selbst.

Eine *dynamische Übertragung zur Laufzeit*, also während der Nutzung des AR-/VR-Systems, ist sinnvoll, wenn bei jedem Einsatz unterschiedliche oder

stark dynamische Objekte dargestellt werden. Ein Beispiel für die dynamische Übertragung zur Laufzeit ist das oben genannte dynamisches Streaming von dreidimensionalen Modelldaten, die von den raumerfassenden Navigations-sensoren einer AR-Brille (HoloLens2) erzeugt werden.

Ein *manueller Abgleich* ist eine technisch weniger aufwändige Methode und eignet sich für Objekte, die nur selten verändert werden, wie beispielsweise Maschinen und Anlagen, die nur in längeren Abständen umgebaut oder modernisiert werden.

Die *feste Integration* in den Datenbestand einer Software ist für unveränderliche oder generische Daten möglich. Diese stehen dann in jeder Anwendungssession unverändert zur Verfügung. Für die Erprobungen im Projekt TeleInteraction-XR wurde dieser Ansatz für statischen Maschinen- und Anlagenbestandteile und die Avatar-Darstellung gewählt.

Abgleich der globalen Positionierung: AR- und VR-Systeme nutzen ihre jeweils eigenen Weltkoordinaten. Für die korrekte räumliche Positionierung von Objekten aus der AR-Umgebung im VR-System – und umgekehrt – ist daher eine initiale Kalibrierung der Lage von VR- und AR-Koordinaten notwendig. Hierzu haben sich verschiedene Methoden etabliert.

Für die prototypische Umsetzung im Projekt TeleInteraction-XR wurde auf eine manuelle Kalibrierung gesetzt. Das als Szenenursprung der VR-Seite dienende Maschinenmodell wurde manuell in der AR-Umgebung verschoben und manuell „über“ dem realen Objekt positioniert, so dass die Koordinaten von AR- und VR-Seite synchron liegen. Nach dieser initialen Kalibrierung war Positionsabgleich dann von dem Selbstverortungssystem der eingesetzten HoloLens2 abhängig. Bei längerer Nutzungsdauer zeigte sich in den Tests ein deutlicher Versatz zwischen realer und virtueller Welt. Daher war ein mehrfaches Nachkalibrieren erforderlich. Ein Versatz trat auch dann auf, wenn die internen Sensoren der HoloLens2 ihr räumliches Tracking verloren, etwa wenn der Raum keine deutlichen Kontraste aufwies.

Deshalb scheint für einen späteren kommerziellen Einsatz der AR-/VR-Kopplung der Einsatz von Markern sinnvoll. Die Marker werden auf vordefinierte Positionen in der realen Welt – beispielsweise an Außenflächen von Maschinen – angebracht, können vom AR-System erkannt und zur kontinuierlichen Verfolgung der relativen Lage der AR-Brille genutzt werden. Auf diese Weise können auch leichte Drifts der Koordinatensysteme kontinuierlich ausgeglichen werden.

Übertragung von Positionsdaten (Transforms): Neben den Weltkoordinaten sind auch die Positions- und Rotationsdaten aller darzustellenden Objekte zu synchronisieren. Dies betrifft die visuellen Modelle, aber auch die Position

und Lage der Avatare der AR- und VR-Nutzenden. Sollen Objekte in ihrer Form manipulier- oder änderbar sein, müssen auch die entsprechenden Koordinaten ihrer Vertices in den lokalen Koordinatensystemen der Objekte zwischen AR- und VR-System synchronisiert werden. Dabei sind unterschiedlich ausgerichtete Koordinatensysteme (linkshändig, rechtshändig, Lage der Z-Achse etc.) der eingesetzten Systeme zu beachten und bei Bedarf zu transformieren.

Avatar-Bewegung: Avatare unterscheiden sich von anderen Objekten nur dadurch, dass die Positionsdaten nicht nur durch eine Interaktion der Nutzenden verändert werden, sondern dass die AR- und VR-Systeme ihre jeweilige Sensorik nutzen, um Lage- und Positionsänderungen kontinuierlich zu erfassen. Je nach Ausprägung der Avatare müssen nur eigenständige 3D-Objekte für Rumpf, Hände und Kopf verändert werden, oder – bei realistischeren Darstellungen – auch die lokalen Koordinaten der Scheitelpunkte, die die dreidimensionale Form des Avatars definieren.

Interaktionsdaten: In Echtzeit zu synchronisieren sind auch Daten zu Interaktionen der Nutzenden mit der virtuellen und erweiterten Umgebung. Dazu zählen das Hinzufügen, Verändern und Löschen von Annotationen, das Einblenden von Verpixelungen oder Verwisch-Effekten – etwa um den Schutz von Persönlichkeitsrechten zu gewähren – sowie Material- und Beleuchtungsinformationen von Objekten, wenn diese optisch hervorgehoben oder ausgeblendet werden sollen.

Audio- und Kommunikationsdaten: Für ein starkes Telepräsenzepfinden müssen auch Audiodaten (Sprache und Umgebungsgeräusche) in Echtzeit übertragen und synchronisiert werden. Dies umfasst bestenfalls auch die räumliche Verortung der Audioquellen.

Umgebungsdaten: Um eine konsistente Darstellung der hybriden Umgebung zu gewährleisten, müssen Daten zur virtuellen (VR-System) und realen Umgebung (AR-System) synchronisiert werden. Dies umfasst auch Informationen zu Änderungen und Anpassungen in beiden Umgebungen.

Alle übertragenen Daten müssen konsistent und fehlerfrei sein, um eine korrekte Darstellung zu ermöglichen. Mechanismen zur Fehlererkennung und -korrektur sind hierbei entscheidend. Da personenbezogene und andere sensible Daten übertragen werden, müssen robuste Sicherheitsmechanismen implementiert werden. Eine der größten Herausforderungen besteht darin, die Latenzen bei der Datenübertragung so gering wie möglich zu halten, um ein flüssiges und immersives Erlebnis zu gewährleisten.

5 Fazit

Für die AR/VR-Kollaboration für eine telepräsenste Fernunterstützung ist es essenziell, die verschiedenen zu synchronisierenden Daten bereits im Vorfeld zu identifizieren und Herausforderungen bei der Übertragung zu erkennen.

Zentral ist der räumliche Abgleich der unterschiedlichen Koordinatensysteme, mit denen beide Seiten der Kommunikation (VR und AR) ihre 3D-Daten verwalten und darstellen. Für die Übertragung der Daten stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, die sich nach Anwendungsspezifik (statische vs. dynamische Daten), eingesetzten Technologien (sensorische Objekterkennung vs. Vormodellierung) und Aufwand unterscheiden. Für das Empfinden von Telepräsenz und für die Kommunikation ist weiterhin die Übertragung von Audio- und Interaktionsdaten notwendig bzw. förderlich.

Auf Basis der identifizierten Bedarfe und Herausforderungen bei der Datensynchronisation wurden im Projekt TeleInteraction-XR eine Demonstrator-Lösungen entwickelt und in verschiedenen Anwendungsfällen erprobt. Die Details der Entwicklung werden in [5, 6, 7] und die Erprobung in [8] beschrieben.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Fachprogramm „Zukunft der Wertschöpfung“ und der Fördermaßnahme „Innovative Arbeitswelten im Mittelstand“ im Projekt TeleInteraction-XR (Förderkennzeichen 02L21B550-4) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Bailenson, J.N. & Blascovich, Jim. (2014). Encyclopedia of Human-Computer Interaction. Avatars. 64. 64-68.
- [2] Brade, Jennifer & Kögel, Alexander & Fuchs, Christian & Klimant, Philipp. (2020). Impact of First Person Avatar Representation in Assembly Simulations on Perceived Presence and Acceptance. In Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2020) - Volume 1: GRAPP, pages 17-24 DOI: 10.5220/0008878700170024.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mes
- [4] Nischwitz, A., Fischer, M., Haberäcker, P., & Socher, G. (2012). Computergrafik und Bildverarbeitung. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8323-0>

- [5] Kiesel, M., Kögel, A. (2025). Ich habe etwas vorbereitet – 3D-Modell-basierte AR-/VR-Kopplung. In: Bullinger-Hoffmann, A.C. (2025). Telepräsenste Fernunterstützung in der Industrie. aw&I – Wissenschaft und Praxis.
- [6] Wulf-Misaki, D. (2025). Kamera, Licht, Action! - Videostream-basierte AR/VR Kollaboration. In: Bullinger-Hoffmann, A.C. (2025). Telepräsenste Fernunterstützung in der Industrie. aw&I – Wissenschaft und Praxis.
- [7] Kiesel, M., Wulf-Misaki, D. (2025). Mehr als oberflächlich! – Live Volumetric Streamings für die AR/VR-Kollaboration. In: Bullinger-Hoffmann, A.C. (2025). Telepräsenste Fernunterstützung in der Industrie. aw&I – Wissenschaft und Praxis.
- [8] Berger, M., Holz, N., Ruffert, D., Kögel, A., (2025). TeleInterACTION! – VR/AR-Kopplung im Praxistest. In: Bullinger-Hoffmann, A.C. (2025). Telepräsenste Fernunterstützung in der Industrie. aw&I – Wissenschaft und Praxis.

Autor



Kögel, Alexander

Alexander Kögel studierte Medientechnik (B.Eng.) und Medienmanagement (M.Eng) an der HTWK Leipzig. Seit 2017 ist er an der TU Chemnitz als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Schwerpunkte sind VR-Anwendungen, das Präsenz-Empfinden in virtuellen Umgebungen und der Erschließung der Potenziale der Digitalisierung, Vernetzung und Industrie 4.0.