

Plattform FOREL

---

# Soziotechnische Systeme - Symbiose von Mensch & Maschine

Online-Content zum interaktiven Whitepaper KORESIL

Autoren: Tekkaya, A. E.<sup>1</sup>; Grodotzki, J.<sup>1</sup>; Müller, B. T.<sup>1</sup>; Gude, M<sup>2</sup>; Weck, D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Umformtechnik und Leichtbau, TU Dortmund

<sup>2</sup> Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden



Dieses Whitepaper ist ein Ergebnis des Verbundvorhabens KORESIL. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 02P20Z000 – 02P20Z004) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
Karlsruher Institut für Technologie

---

# Inhalt

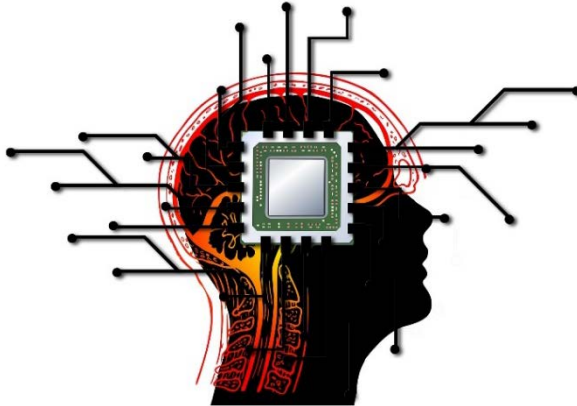
---

Soziotechnische Systeme.....	1
Augmented Reality und ihre Einsatzgebiete .....	4
Ergonomie in Augmented Reality Anwendungen.....	9
KORESIL-Anwendungsforschung zu Augmented Reality .....	14
KORESIL-Studienergebnisse zur Nutzung von Augmented Reality .....	24
Executive Summary .....	28
Literatur .....	30

---

# Soziotechnische Systeme

---



Als soziotechnisch werden komplexe Systeme bezeichnet, die vorwiegend durch die bilaterale Interaktion zwischen Mensch und Technik geprägt sind. Sie sind in verschiedenen Bereichen wie Gesundheitswesen, Transport, Telekommunikation und insbesondere der Fertigung zu finden. Dabei definiert der Begriff im Kontext produzierender Unternehmen das zielführende Zusammenwirken von sozialen Systemen, z.B. der Fachkraft am Fließband, und technischen Systemen, z.B. dem Fließband selbst, einem Coboter oder Computern, welche die menschliche Arbeitsleistung unterstützen. Entsprechend zeichnen sich soziotechnische Systeme durch eine starke wechselseitige Abhängigkeit der beteiligten Personen und Technologien aus [1]. Dies bedeutet, dass entsprechende Tätigkeiten nicht mehr von der Arbeitskraft alleine (ohne technische Unterstützung) oder autonom durch das technische System zu bewerkstelligen sind. Für das Lösen komplexer Aufgaben oder das Erreichen einer hohen Produktivität ist daher das symbiotische Zusammenwirken der beiden Systembestandteile grundlegend [2]. Für den nachhaltigen und verantwortungsvollen Einsatz derartiger Technologien ist neben dem Individuum mit seinen Bedürfnissen, Wünschen und Forderungen auch der gesamtgesellschaftliche Kontext zu beachten. Dieser Aspekt erhält bei der aktuellen Debatte zum Einsatz Künstlicher Intelligenz vermehrt

Aufmerksamkeit, da der individuelle und gesellschaftliche Mehrwert der jeweiligen Technologie mit deren Risiken abgewogen werden muss [3,4].

Der Einfluss soziotechnischer Systeme auf den Alltag und insbesondere die Arbeitswelt von heute ist bedeutend. Die Integration fortschrittlicher Technologien hat verstärkt automatisierte Prozesse hervorgebracht, wodurch viele Aufgaben, die früher von menschlichen Arbeitskräften erledigt wurden, nun von Robotern und Künstlicher Intelligenz übernommen werden. Dies hat die Effizienz und Produktivität gesteigert, jedoch auch den Bedarf an menschlicher Arbeitskraft in andere Bereiche verlagert, da primär Überwachungs- und Kontrollaufgaben anstatt direkter Beteiligung im Produktionsprozess zu erledigen sind.

---

Alltagseinfluss  
soziotechnischer Systeme

Die weitere Steigerung von Produktivität und Innovationskraft kann durch soziotechnische Systeme selbst erfolgen, welche große Potentiale für die Arbeitswelt von morgen bieten. Der zielgerichtete Einsatz digitaler Technologien im Produktionsumfeld eröffnet zahlreiche Chancen für menschliche Arbeitskräfte. Technologien wie Cobotik, cyber-physische Systeme, Industrial Internet of Things (IIoT), Künstliche Intelligenz und Extended-Reality (Virtual- & Augmented-Reality) ermöglichen Effizienz- und Qualitätssteigerungen, die ein Reshoring von Fertigung in Hochlohnländer möglich machen [5]. Eine erhöhte Resilienz der Lieferketten ist dabei ein positiver Nebeneffekt. Zugleich können gesundheitsgefährdende Tätigkeiten entschärft und so die physische wie psychische Gesundheit der Arbeitskräfte geschützt werden.

---

Potential

---

*IIoT ist real, rentiert sich und hilft Produktionsunternehmen, (digital) am Ball zu bleiben.*

*McKinsey & Company [5]*

---

Intuitiv zu bedienende, digitale Technologien werden darüber hinaus dabei helfen, die Arbeit mit komplexeren Technologien wie etwa hochvernetzten Produktionsmaschinen zu erlernen. Mit dieser Unterstützung

---

Das Potential  
heben

wird es für den Menschen leichter, sich kontinuierlich und vor allem lebenslang dynamisch an die sich ändernden Arbeitsbedingungen (geforderte Kompetenzen, Ort, ...) anzupassen. So kann auf Herausforderungen wie die alternde Arbeitsbevölkerung oder schnell wechselnde Fähigkeitsanforderungen reagiert werden. Diese Technologien begünstigen gleichzeitig das Umdenken weg von klassischen, geradlinigen Karrierewegen hin zu einer modernen Interpretation von Arbeit, bei der die Menschen, und nicht die Tätigkeit, im Fokus stehen. Werden entsprechende Modelle und Technologien in den Unternehmen erfolgreich implementiert, fördert dies eine arbeitsbezogene Weiterbildungskultur, in der Menschen sich fortwährend und individuell neue Fähigkeiten aneignen – entsprechend des aktuellen Bedarfs.

Zentrales Element bildet hierbei die Übermittlung von Informationen, entweder zu Bildungszwecken oder zur direkten Unterstützung bei einer aktuellen Aufgabe. Dies kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Traditionell wurde Wissen in Schriftform vermittelt, oder direkt von Person zu Person. Mit der Technologie haben sich jedoch Präferenzen der Lernenden hin zu dynamischeren (z.B. Lern-/Bildungsvideos), oder gar interaktiven Lernformaten (Lernapps) gewandelt. Es wird erwartet, dass sich dieser Trend mit der Weiterentwicklung entsprechender informationsvermittelnder Technologien festigt [6]. Die immer leistungsfähigeren Endgeräte wie Smartphones, Tablets oder Head-Mounted-Displays, welche hierfür zur Verfügung stehen, sind vollständig mobil und werden zunehmend multi-modaler, d. h., sie bieten neben visuellen auch akustische und haptische Informationsvermittlung. Für Produktionsunternehmen ergeben sich aus dem gesteigerten Einsatz solcher Technologien viele Möglichkeiten. So können Trainings bspw. für Cobotik-assistierte Arbeitsplätze im Vorfeld in virtuellen oder augmentierten Umgebungen mit geringem Personal- und Kosteneinsatz erprobt werden [7]. In der Produktionsumgebung selbst können digitale Assistenten mittels 3D-Visualisierungen, Daten-Projektionen und Audioanweisungen die Arbeitskräfte entlasten, deren Produktivität steigern oder dank haptischem Feedback vor Gefahren schützen. Zugleich finden entsprechende Technologien Einzug in den Alltag der Arbeitskräfte, z.B. mittels Smartphones oder -watches.

---

## Augmented Reality und ihre Einsatzgebiete

---

In diesem Zusammenhang ist insbesondere Augmented Reality (AR), d. h. die Überlagerung visueller Informationen im realen Sichtfeld der Nutzenden, eine vielversprechende Technologie. Sie könnte zukünftig sowohl in Trainingsumgebungen zum Erlernen von Arbeitsabläufen und neuer Fähigkeiten als auch in der Produktion zur Steigerung von Arbeitssicherheit und Produktivität eingesetzt zu werden. Augmented Reality bildet dabei, zusammen mit der deutlich bekannteren und verbreiteteren Virtual Reality (VR), eine Unterkategorie der weitgefassten Extended Reality (XR). AR bietet gegenüber VR vor allem den Vorteil, dass die Nutzenden die reale Umgebung weiterhin wahrnehmen können und diese Realität mit zusätzlichen Informationen, z.B. von Digitalen Zwillingen, angereichert wird (vgl. Abbildung 1). Insbesondere in realen Produktionsumgebungen bedeutet dies einen Zugewinn an Arbeitssicherheit, etwa im Falle eines Defekts im genutzten Endgerät gepaart mit einer Aufrechterhaltung der Orientierung in der realen Welt. AR-Technologien umfassen holografische Brillen, Handgelenk-Devices wie Smart Watches, Tablets, Info-Glasses oder bildgebende Projektoren, mit denen, je nach Endgerät, mittels Gesten-, Sprach- oder Augensteuerung interagiert werden kann. Diese multi-modale Kommunikation zwischen der Technologie und dem Menschen ermöglicht die Gestaltung effizienter soziotechnischer Systeme, maßgeschneidert auf Faktoren wie Alter, Vorbildung und möglicher Einschränkungen.

---

Einordnung  
AR

---

*Augmented Reality wird in großen Stil kommen und wenn sie das tut, werden wir uns fragen, wie wir jemals ohne sie gelebt haben.*

*Tim Cook, CEO Apple*

---

Aktuell befinden sich viele AR-Entwicklungen auf Hard- und Software-Ebene noch in einem frühen Stadium, vergleichbar mit Smartphones vor

Einführung des iPhone. Die Devices sind oftmals schwer oder ergonomisch nicht ausgereift, sodass vielen Menschen langandauerndes Arbeiten mit diesen Geräten schwerfällt. Zugleich erfordert die Entwicklung von Lernumgebungen oder Produktionsassistenten viel Zeit und Expertise, da vorhandene Modelle, z.B. von Maschinen, aufwendig in eine AR-Umgebung transferiert und interaktionsfähig gemacht werden müssen. Diese Faktoren, zusammen mit einer begrenzten Kenntnis über das Potential und den Aufwand, dieses Potential zu heben, limitieren aktuell die Verbreitung von AR. Daher hat sich das Konsortium des BMBF-Verbundvorhabens KORESIL umfassend mit den Möglichkeiten, aber auch Grenzen von AR in Produktions- und Trainingsumgebungen befasst. Nachfolgend werden sowohl bereits existierende Beispiele erörtert sowie das Thema Ergonomie, welches den Menschen in das Zentrum dieses sozio-technischen Systems rückt, umfassend adressiert. Forschungsergebnisse aus dem KORESIL-Projekt demonstrieren das Potential der AR-Technologie und zeigen gleichzeitig auf, welche Herausforderungen auf dem Weg zur hohen Durchdringung von AR in Industrie und Bildung noch bewältigt werden müssen.



*Abbildung 1: Vision eines Arbeitsplatzes der Zukunft. Hologramme liefern Informationen der realen Anlagen oder von Digitalen Zwillingen - ortsunabhängig und in Echtzeit.*

Augmented Reality stellt eine neuartige Option für Unternehmen dar, immersive Schulungserfahrungen zu gestalten, bei denen komplexe Prozesse und Verfahren effektiv und mit reduziertem Risiko erlernt werden können [8]. Durch die Einblendung von Schritt-für-Schritt-Anweisungen oder visuellen Hinweisen direkt auf dem Arbeitsplatz bzw. in angepassten Trainingsumgebungen vereinfacht AR das Erlernen neuer Inhalte, reduziert Fehler in der Anwendung und verkürzt die Lernkurve insbesondere für neue Mitarbeitende. Diese können sich neue Fähigkeiten schneller aneignen, dies führt zu einer höheren Produktivität. Dabei ist der Einsatz realer Anlagen und Maschinen oft nicht notwendig und diese werden somit nicht blockiert, in der Folge lassen sich Stillstandzeiten reduzieren. Weiterhin können AR-Trainings häufig ortsunabhängig durchgeführt und damit Ressourcen eingespart werden. Unabhängig vom Lerninhalt ist das risikoarme learning-from-failure ein entscheidender Vorteil gegenüber realen, konventionellen Trainingsumgebungen. Gleichzeitig wird der Aufwand für Onboarding- und Ausbildungsmaßnahmen auf Seiten des Schulungspersonals verringert, dadurch sinken langfristig die Kosten in diesen Bereichen.

---

Training und  
Onboarding

Auch während der Arbeit im Produktionsumfeld kann AR effizient unterstützen, indem sie den Mitarbeitenden etwa bei komplexen Fertigungsaufgaben hilfreiche Anleitungen und Informationen bedarfsgerecht und in Echtzeit zur Verfügung stellt [9]. Durch die Verwendung insbesondere mobiler AR-Geräte können die Mitarbeitenden auf digitale Overlays zugreifen, die z.B. Instruktionen, Sicherheitshinweise und Ausrüstungsspezifikationen anzeigen. Diese kontextbezogenen Echtzeitinformationen stellen sicher, dass die Arbeitskräfte ihre Aufgaben genau, effizient und fehlerarm ausführen, wodurch die Gesamtproduktivität gesteigert wird – unabhängig vom aktuellen Fähigkeitsniveau der Mitarbeitenden. In elaborierteren Szenarien kann eine KI die Aktivitäten der Arbeitenden in Echtzeit begleiten und optional steuernde Maßnahmen ergreifen, z.B. indem diese vor einer gefährlichen Handlung explizit warnt.

---

Produktions-  
unterstützung

Ein Anwendungsgebiet, bei dem AR und die entsprechenden Mitarbeitenden bereits erfolgreich ein soziotechnisches System bilden, ist die Fernwartung. Hochqualifizierte Expertinnen und Experten müssen nicht

---

Remote Assist

mehr zu hohen ökonomischen und ökologischen Kosten zu den defekten oder zu wartenden Maschinen gebracht werden. Stattdessen werden mittels AR eine direkte, immersive Kommunikation zu einem qualifizierten Mitarbeitenden vor Ort in Echtzeit aufgebaut und Informationen ausgetauscht, bspw. indem mittels eines AR-Geräts digitale Hinweise an die entsprechende Stelle der realen Maschine eingeblendet werden. Die Menschen in der Produktion können virtuelle Darstellungen von Maschinen visualisieren, fehlerhafte Komponenten identifizieren und auf schrittweise Reparaturanweisungen zugreifen. Sind die Fachleute doch vor Ort, z.B. für die initiale fachliche Schulung des Personals, kann AR ebenfalls eingesetzt werden, um mehr Personal gleichzeitig zu schulen, oder komplexe, seltene Wartungsarbeiten im Team zu trainieren. Auch in diesem Szenario können die Ausfallzeiten der realen Produktionsanlage minimiert werden [10].

AR vereinfacht Qualitätskontrollen und Inspektionsprozesse in Fertigungsumgebungen. Durch die Überlagerung von virtuellen Vorlagen und Richtlinien mit physischen Objekten können die Mitarbeitenden präzise Messungen, Ausrichtungen und Platzierungen sicherstellen. AR-gestützte Inspektionen rationalisieren den Qualitätssicherungsprozess, verbessern die Genauigkeit und verringern das Risiko von Fehlern, was letztlich zu einer Verbesserung der gesamten Produktqualität und Ressourceneffizienz führt [11]. Zugleich können diese Lösungen effizient bei der Dokumentation unterstützen.

---

Qualitätskontrolle und Inspektionen

Die AR kann eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Sicherheit am Arbeitsplatz in Produktionsumgebungen spielen. Sie kann potentielle Gefahren identifizieren, Sicherheitsprotokolle hervorheben und die Arbeiter mit Echtzeitwarnungen versorgen. AR erleichtert zudem die Sicherheitsschulung durch die Simulation von Gefahrenszenarien und ermöglicht es so den Mitarbeitenden, Notfallmaßnahmen zu üben, ohne tatsächlichen Risiken ausgesetzt zu sein [12].

---

Sicherheit am Arbeitsplatz

Aus den zuvor genannten Beispielen zum Einsatz von AR in Produktionsunternehmen wird ersichtlich, dass das Potential dieser noch jungen Technologie vielfältig ist. Sollen die Menschen, und somit letztlich auch die Unternehmen, von zukünftigen Entwicklungen in diesem Bereich

---

Zwischenfazit

profitieren, müssen die weiteren Schritte zur Etablierung dieser Technologie den Menschen in den Fokus rücken. Ein zentrales Element hierfür stellt die ergonomische Ausgestaltung von Hard- und Software dar, da nur so erfolgreich die Akzeptanz gesteigert und eine gewinnbringende Symbiose von Mensch und Maschine realisiert werden kann.

---

*I feel that Augmented Reality is perhaps the ultimate computer.*

*Satya Nadella, CEO Microsoft*

---

---

## Ergonomie in Augmented Reality Anwendungen

---



Ein zentrales Element zur erfolgreichen Entstehung eines produktivitätssteigernden, soziotechnischen Systems mittels AR ist die Beachtung der Bedürfnisse der Mitarbeitenden während der Nutzung dieser Technologie. Wie auch in der klassischen Arbeitsplatzgestaltung ist dabei insbesondere die Ergonomie im Arbeitsumfeld ein Schlüssel zur Akzeptanz neuer Technologien und somit Grundlage einer dauerhaften Steigerung der Produktivität. AR-bezogene Ergonomie umfasst neben der physischen Belastung durch das Tragen und Bedienen der Geräte auch psychische Elemente, wie Konzentration, Akzeptanz und Immersivität. Viele der zu beachtenden Aspekte sind bereits Teil aktueller internationaler Forschungsvorhaben [13]. Die direkte Abhängigkeit vieler Faktoren von der spezifischen, in den Untersuchungen eingesetzten AR-Technologie (AR-Brille oder Tablet, Smartwatch oder Projektor, mit Controller oder handgestengesteuert, ...) erschwert die Verallgemeinerung vieler Erkenntnisse. Kaum ein Technologiefeld erfährt aktuell hardwareseitig so viele Neuerungen wie die Augmented Reality. Nachfolgend sind daher grundlegende ergonomische Gestaltungsrichtlinien zusammengefasst, welche durch entsprechende Beforschung dieser Themen als kritische

Ergonomie im  
Arbeitsumfeld

Elemente für eine erfolgreiche Implementierung von AR identifiziert wurden.

---

*Usability ist die logische Fortführung des Ergonomiegedankens aus der analogen in die digitale Welt.*

*Tom Cadera, Cadera Design GmbH [14]*

---

Um die Akzeptanz der Mitarbeitenden für diese Technologie zu steigern, sollten Benutzerfreundlichkeit, intuitive Interaktion und minimale kognitive Belastung im Vordergrund stehen. Symbole, Beschriftungen und Anweisungen sollten klar und gut lesbar sein, wobei Faktoren wie Schriftgröße, Kontrast und Farbe zu berücksichtigen sind. Die Möglichkeit zur individuellen, situationsangepassten Platzierung virtueller Objekte und Informationen sollte genutzt werden, um die Belastung von Augen und Nacken zu minimieren und effiziente Arbeitsabläufe zu unterstützen. Insbesondere die intuitive Interaktion ohne externe Controller nur mittels Händen erweist sich aktuell als zentrales Element für die weitere Verbreitung von AR in den Bereichen Bildung und Produktion [15].

Benutzer-  
oberfläche

AR-Geräte sollten über hochauflösende Displays mit einstellbaren Helligkeitsstufen verfügen, um unterschiedlichen Lichtverhältnissen gerecht zu werden. Größe und Position der augmentierten Objekte müssen optimiert werden, um visuelle Ermüdung, Überanstrengung der Augen und

Visualisierung



die Notwendigkeit übermäßiger Kopf- und Augenbewegungen zu vermeiden. Hohe Kontraste helfen, die augmentierten Einblendungen von der realen Arbeitsumgebung zu unterscheiden. Dies trägt zur Reduktion von

Unachtsamkeit und somit potentiellen Arbeitsunfällen bei [16]. Ein limitierender Faktor vieler Devices ist zurzeit das sogenannte Field-of-View, d.h. der Bereich des menschlichen Sichtfeldes, in dem die Hologramme angezeigt werden können. Aufgrund des aktuellen Entwicklungsstands der eingesetzten Hardware ist dieses oftmals eingeschränkt, sodass der Kopf häufig bewegt werden muss, um alle räumlich verteilten Informationen zu erfassen.

Das Gewicht, der Formfaktor und die allgemeine Ergonomie von AR-Geräten sollten sorgfältig bedacht werden [17]. Sie sollten über längere Zeit bequem zu tragen und das Hardwaregewicht gering sowie gleichmäßig verteilt sein, um eine übermäßige Belastung von Kopf, Nacken und Schultern zu vermeiden. Verstellbare Riemen und Polsterungen können dazu beitragen, dass die Geräte für verschiedene Personen mit unterschiedlichen Körperformen und -konstitutionen individuell angepasst werden können. Adapter ermöglichen die Anbringung der Geräte an verschiedenen Schutzhelmen.

---

Physische Belastung

AR-Systeme sollten eine genaue und reaktionsschnelle Bewegungsverfolgung nutzen, um die Latenzzeit zu minimieren und präzise Interaktionen zu gewährleisten. Die Tracking-Technologie sollte in der Lage sein, natürliche Bewegungen zu erfassen, um so unnötige körperliche Anstrengung oder sich wiederholende Bewegungen zu vermeiden [18]. Zugleich können weitere Modi genutzt werden, die Anweisungen des Menschen zu erfassen. Die Verfolgung der Augenbewegung sowie die inzwischen etablierte Sprachsteuerung bieten das Potential, AR barrierearm und adaptiv zu gestalten. Bei der Nutzung von Sprachsteuerung ist jedoch zu beachten, dass die Devices, wie auch Smartphones, permanent die Gespräche überwachen, um angemessen und schnell im gewünschten Moment reagieren zu können. Dies stellt neue Herausforderungen an den Datenschutz, wenn sichergestellt werden muss, welche gesprochenen Informationen wie verarbeitet werden.

---

Interaktion



Der Grad an Immersivität einer Anwendung bezeichnet u.a. die Ausprägung der als korrekt und natürlich empfundenen Platzierung und Darstellung von Objekten im Raum. Daher sollten die augmentierten Hologramme derart konzipiert sein, dass sie eine korrekte Tiefenwahrnehmung gewährleisten, damit die Mitarbeitenden virtuelle Objekte im Verhältnis zur physischen Umgebung genau wahrnehmen und mit ihnen interagieren können. Verzerrungen oder Unstimmigkeiten in der Tiefenwahrnehmung können zu Fehlern und Sicherheitsrisiken führen. Gleichzeitig sorgt eine niedrige Immersivität insbesondere bei ungeübten Nutzergruppen für eine schnelle Ablehnung der neuen Technologie [19]. Die Immersivität kann weiterhin über multi-modale Interaktion erhöht werden. So können taktile Handschuhe eingesetzt werden, um augmentierte Objekte erfahrbarer zu machen.

---

Immersivität

Das von AR-Systemen gelieferte Audio-Feedback muss verschiedene Anforderungen, abhängig vom Nutzenden und der Einsatzumgebung, genügen [20]. Die Lautstärke und Klarheit der Anweisungen oder Warnungen sollten an den Geräuschpegel der Produktionsumgebung angepasst werden können oder sich diesem automatisch anpassen, jedoch parallel Arbeitende nicht stören. Klare und prägnante Audiohinweise können

---

Audio

helfen, Informationen schnell zu erfassen und effektiv darauf zu reagieren. Zugeschnitten auf eine vielfältige Arbeitnehmerschaft sollten die Instruktionen und insbesondere Gefahrenhinweise in der Muttersprache verfügbar sein, um Missverständnissen und Situationen mit Gefahrenpotential vorzubeugen.

AR-Geräte dürfen die Bewegungsfreiheit der Mitarbeitenden nicht einschränken oder ihre Sicht behindern, insbesondere, wenn sie körperlich anstrengende Aufgaben ausführen oder in gefährlichen Umgebungen arbeiten [21]. Die Geräte sollten mit einer angemessenen Belüftung ausgestattet sein, um Unbehagen oder Überhitzung bei längerem Gebrauch zu vermeiden.

---

Sicherheit &  
Komfort

Ist der Einsatz von AR in der Produktion entschieden, sollte die Implementierung nicht top-down erfolgen, sondern die späteren Anwendenden kontinuierlich mit einbeziehen. Daher sind entsprechende Schulungs- und Einarbeitungsprogramme anzubieten, um sicherzustellen, dass die Arbeitnehmenden wissen, welche Potentiale und Grenzen diese Technologie besitzt. Die Schulungen sollten ferner die besten ergonomischen Praktiken abdecken, einschließlich der Einstellung und des Tragens der Geräte, des Umgangs mit Ermüdung und der Erkennung von Anzeichen von Unbehagen oder Überlastung. Wie von modernen Autos bekannt, kann eine Müdigkeitsüberwachung alternativ auch direkt in die AR-Geräte integriert werden.

---

Einarbeitung

---

## KORESIL-Anwendungsforschung zu AR

---

Mit dem Fokus auf fünf Einsatzszenarien von Augmented Reality in Produktionsunternehmen, welche aus Sicht des Forschungskonsortiums einen signifikant positiven Einfluss für die Unternehmen versprechen, wurden im Zuge des KORESIL-Projektes verschiedene AR-Anwendungen entwickelt und evaluiert. Dies ermöglicht eine gezieltere Einschätzung des Potentials dieser Technologien und zeigt mögliche Herausforderungen auf. Die genannten Kernszenarien umfassen dabei die folgenden Aspekte:

- Unterstützung des **Menschen**
- Verbesserung des **Prozessverständnisses**
- Überwachte **Produktion**
- Reduktion von **Stillstandzeiten**
- Verbessertes technisches **Marketing**

Das KORESIL Konsortium hat diese Aspekte in fünf konkreten AR-Anwendungen exemplarisch umgesetzt. Abbildung 2 liefert die Übersicht dieser Anwendungen. In [22] wird ausführlich auf die entwicklungsseitigen Herausforderungen eingegangen. Gleichzeitig werden Besonderheiten der im Projekt verwendeten AR-Hardware (HoloLens 2 von Microsoft) adressiert.

---

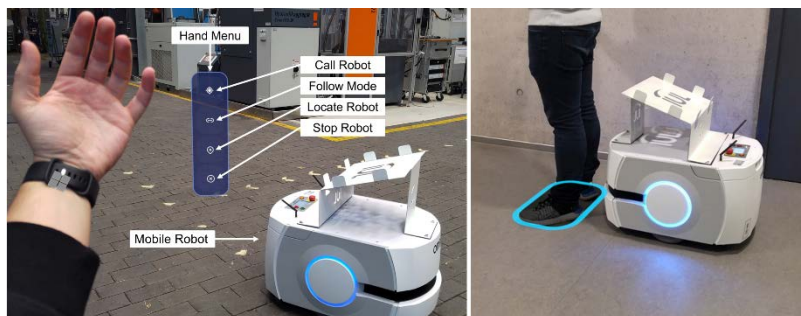
*Augmented Reality is the direction that I think is far more interesting and promising [compared to VR] — for technology and, really, for humanity.*

*John Hanke, CEO Niantic, Inc.*

---



auf Server-Ebene. Die Brille funkt per WLAN-Verbindung entsprechende Anweisungen an den Server. Diese werden vom Roboter „gelesen“ und in Maschinenbefehle übersetzt. Aktuelle Positions- und Sensordaten werden in umgekehrter Richtung gesendet und empfangen, von der Brille interpretiert und dem Nutzenden visuell aufbereitet präsentiert (vgl. Abbildung 3).



*Abbildung 3: Darstellung des autonomen, mobilen Roboters sowie die Menüstruktur zur AR-Steuerung (links). Visualisierung des "Folge-Mir-Modus", welcher durch das Betreten des Feldes vor dem Roboter aktiviert wird (rechts).*

Mit Hilfe eines solchen Setups wurde anschließend auch ein autonomer, mobiler Roboter (AMR) mit einer AR-Brille verbunden [23]. Derartige mobile Helfer finden aktuell vorrangig in Großunternehmen Anwendung, da die Pfadplanung aufwendig und damit teuer ist. Können AMRs jedoch mittels einer AR-Brille gesteuert werden, ermöglicht dies eine aufgabenspezifische, einfache Umsetzung von AMR-Arbeiten. Per Gesten- oder Sprachsteuerung kann der AMR an eine beliebige Stelle in der Produktionshalle geschickt werden, z.B. um dort Bauteile oder Werkzeuge einzusammeln. Alternativ kann auch der Begleiter-Modus aktiviert werden, sodass der AMR dem Nutzenden in sicherem Abstand folgt. Hiermit lässt sich der Transport von schwerem Gut an einen leicht zu bedienenden Helfer auslagern. Zu jeder Zeit kann die aktuelle Position auf einer Mini-Map (Abbildung der Produktionshalle) eingesehen werden. Zugleich sendet der AMR auch Sprachinformation an die Brille, z.B. wenn er sein Ziel erreicht oder seine Aufgabe beendet hat.

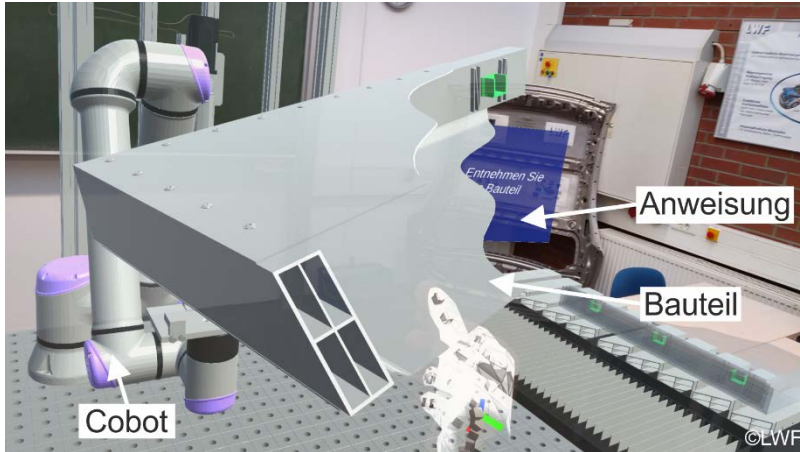
Der im KORESIL-Projekt entwickelte Ansatz kann zudem zur direkten Ansteuerung von Industriemaschinen genutzt werden. Dies wurde anhand eines industriellen 3D-Druckers demonstriert. Aus einer entsprechenden AR-Anwendung heraus kann ein beliebiges Modell per Hand auf einer holografischen Ebene skizziert werden und als 3D-Modell übersetzt an den Drucker geschickt werden. Dieser initialisiert sich eigenständig und fertigt das vom Nutzenden entwickelte Modell innerhalb kürzester Zeit. Dies kann als *direct manufacturing on demand* bezeichnet werden und ist in dieser Flexibilität nur dank gestengesteuerter AR und echtzeitfähiger bilateraler Kommunikation möglich. Wird eine solche Technologie in die Zukunft gedacht, ermöglichen sich gänzlich neue Wege der verteilten und vernetzten Fertigung. Dies bildet die Grundlage für eine Fertigung direkt aus dem Metaverse heraus, welches die Realität durch vernetzte, digitale Zwillinge von Anlagen und Warenströmen abbildet.

In allen genannten Szenarien war es von zentraler Bedeutung, die Betriebssicherheit vor Ort zu wahren. Insbesondere wenn Maschinen aus der Ferne gesteuert werden, muss sichergestellt sein, dass durch diese Anweisungen Menschen, Maschinen oder andere Einrichtungen vor Ort nicht gefährdet werden. Für eine flächendeckende Umsetzung derartiger Remote Control Systeme bedarf es, je nach Anwendung, angepasster (Arbeits-)Sicherheitssysteme, um den geltenden gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Bei der Nutzung von AR in komplexen soziotechnischen Systemen ist, wie zuvor dargestellt, die Ergonomie des Systems von zentraler Bedeutung für die erfolgreiche Adaption. In anderen Kontexten kann AR selbst zur Beantwortung realer ergonomischer Gestaltungsfragen herangezogen werden. In KORESIL wurde dies anhand einer Applikation zur *Arbeitsplatzgestaltung* gezeigt. Der betrachtete, konventionelle Arbeitsplatz dient zur Montage von Baugruppen und umfasst verschiedene Arbeitsstationen und -abläufe (vgl. Abbildung 4).

---

Arbeitsplatz-  
gestaltung



*Abbildung 4: AR-Anwendung zur Arbeitsplatzgestaltung. Verschiedene Konfigurationen können getestet und verglichen werden.*

Dieser wurde in einer AR-Applikation virtuell abgebildet. In einem fiktiven Szenario soll dieser Arbeitsplatz durch einen Coboter erweitert werden, um den Menschen zu entlasten. Da jeder Mensch eine leicht andere Präferenz hat, wie er oder sie von dem Coboter unterstützt werden möchte, wäre ein Austesten verschiedener Konfigurationen vergleichsweise aufwändig. In der AR-Umgebung kann der Coboter hingegen instantan virtuell verschoben und dessen Integration in die Prozessfolge getestet werden. Zusätzlich können die weiteren Arbeitsmittel (Werkzeuge, Kisten, ...) ebenfalls neu angeordnet werden, sollten durch die Integration des Coboters Änderungen erforderlich werden. Darüber hinaus wurden in der entwickelten Anwendung auch reale Elemente, z.B. Bauteile und Werkzeuge, integriert. Hierin liegt aktuell ein entscheidender Vorteil der AR gegenüber der etablierteren VR. In AR lassen sich reale Objekte natürlicher in die Anwendung integrieren und in der Folge auch eine physische Belastungsanalyse realisieren. Im Gegensatz dazu werden in VR häufig nur Game-Controller verwendet, die in ihrem Handling und Gewicht stark von den realen Elementen abweichen. Somit lassen sich mittels AR Arbeitsplatzumgestaltungen und Neuplanungen virtuell und individuell überprüfen, ohne dass entsprechende Szenarien am re-

alen Arbeitsplatz kostenintensiv umgesetzt werden müssen. Nur die finale Konfiguration wird dann real nachgebildet und final getestet. Weitere Details zu dieser Anwendung sowie die begleitend durchgeführte Studie mit Teilnehmenden aus verschiedensten Fachrichtungen sind in [7] veröffentlicht.

In Verknüpfung mit IIoT liefert die AR neue Wege für die überwachende *Prozessanalyse*. Hierfür wurden in KORESIL neben der Visualisierung von Live-Sensordaten erstmals auch vorberechnete Computersimulationsdaten holografisch an die entsprechenden Positionen in der Maschine projiziert (vgl. Abbildung 5) [15]. Die vergleichende Analyse von Ist- mit zuvor berechneten Soll-Zuständen befähigt die für die Überwachung zuständigen Mitarbeiter schneller und gezielter in laufende Prozesse einzugreifen und unvorhergesehene Szenarien zu erkennen. In derartigen Situationen, die außerhalb der Trainingsräume von automatisierten Kontrollsystemen liegen, werden erfahrene Mitarbeitende auch zukünftig eine bedeutende Rolle bei der Überwachung einnehmen, indem sie den Prozesszustand schnell überblicken und dann aktiv eingreifen können.

Prozess-  
analyse

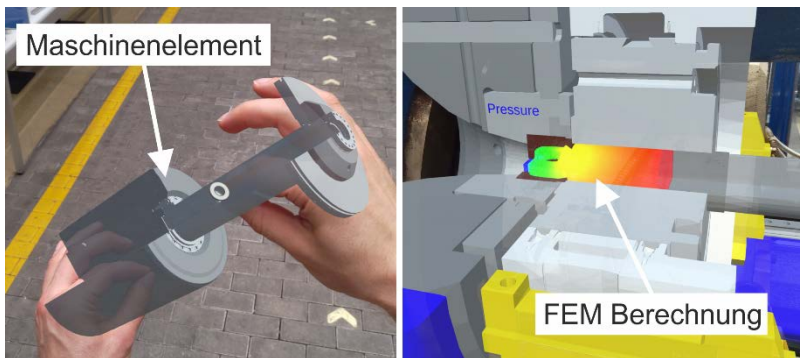


Abbildung 5: AR-Anwendung zur Prozess- und Maschinenanalyse. Einzelne Komponenten können virtuell entnommen und inspiziert werden (links). Computersimulationen von Zustandsgrößen können als Hologramme an der entsprechenden Stelle in der Maschine angezeigt werden (rechts).

Die Visualisierung von Simulationsergebnissen, an der korrekten Position und zeitlich angepasst an den Prozessfortschritt, helfen zudem das *Prozessverständnis* in Trainingsszenarien zu verbessern, da nicht einseh- bare oder gar nicht messbare Informationen erfahrbar gemacht werden. Zudem können die Maschinen und Anlagen virtuell zerlegt werden, so- dass Wartungsarbeiten vorrausschauend trainiert werden können.

Ein wesentlicher Schwachpunkt bisheriger Anwendungen für holografi- sche Brillen wurde bei der Entwicklung entsprechender Trainingsumge- bungen ebenfalls adressiert: die kollaborative Interaktion. Üblicherweise ist es für die umgebende Umwelt nur schwer einzusehen, was die Per- son, die sich aktuell im AR-Training befindet, sieht und tut. Für einen ge- steigerten Lernerfolg ist es jedoch förderlich, wenn sich Lehrende und Lernende in der gleichen Umgebung befinden und kontextbezogen aus- tauschen können. Entsprechend wurde, wie in Abbildung 6 dargestellt, mittels Cloud-basierter Kommunikation eine Live-Interaktion zwischen mehreren AR-Brillen realisiert [15]. Die Interaktionen einer Person mit den Hologrammen sind für alle anderen in die Lernumgebung einge- loggten Personen ebenfalls sichtbar. Dabei müssen sich alle Teilneh- menden nicht einmal im selben physischen Raum befinden. Dies ermög- licht somit eine ortsunabhängige, kollaborative Lernerfahrung, was den globalen Austausch und die Weitergabe von Fachwissen fördert.



*Abbildung 6: Live-Kollaboration zwischen mehreren AR-Devices ermöglicht gemeinschaftliches Lernen. Aktionen von Person A (rechts) werden in Echtzeit für Person B (links) sichtbar und umgekehrt. Ein Video zur dargestellten Szene findet sich unter [Link](#).*

Ein entscheidender Aspekt, welcher hologramm-basiertes Lernen von realen Lernumgebungen im industriellen Kontext unterscheidet, ist die

fehlende haptische Wahrnehmung von z.B. Werkzeugen und Bauteilen. Ein schweres Objekt lässt sich virtuell mit zwei Fingern im Raum bewegen und eine Schraube wird auf Knopfdruck festgedreht. Für viele reale Anwendungen, z.B. Wartungsarbeiten, ist das korrekte Erlernen von Handgriffen jedoch essentiell. Um die haptische Interaktion mit den rein visuellen Hologrammen zu ermöglichen, wurden im KORESIL-Projekt leichte Force-Feedback-Handschuhe mit der AR-Brille verknüpft (vgl. Abbildung 7). Wie in allen vorherigen Szenarien beruhte die Kommunikation zwischen diesen Geräten auf dem beschriebenen, Cloud-basierten Ansatz [24]. Die entsprechenden Lernszenarien konnten somit auch haptisch erfahrbar gestaltet und dementsprechend unabhängiger von realen Maschinen und Objekten umgesetzt werden. Einen großen Mehrwert liefert diese Technologie bei dem Erlernen von Gefahrenbereichen. Greift man im virtuellen Raum in einen kritischen Bereich, z.B. in die aktive Maschine, vibrieren die Handschuhe intensiv und unterstreichen die audio-visuell implementierte Abschreckung. Dies konnte in kleinen Pilotstudien erfolgreich bestätigt werden. Zukünftig könnten Haptik-Handschuhe zudem um Aspekte der Bewegungseinschränkung erweitert werden.



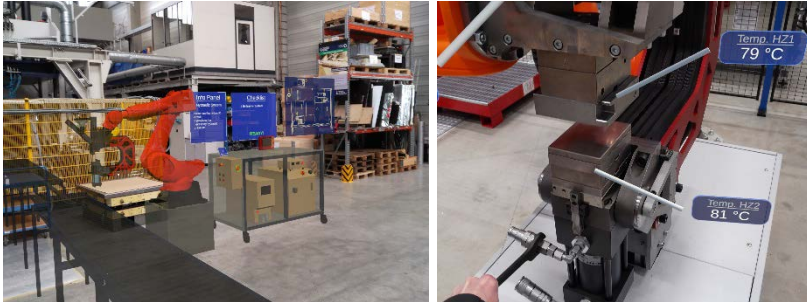
*Abbildung 7: Mit Hilfe leichter und mobiler Haptik-Handschuhe (links) können AR-Hologramme ertastbar gemacht werden (rechts), indem jede virtuelle Interaktion über Aktuatoren ein haptisches Feedback erzeugt.*

In der entwickelten Konfiguration kann man trotz der Signalisierung durch die Vibration der Handschuhe die Hand und Finger weiterhin bewegen und so durch virtuelle Objekte hindurchgreifen. Um das Gefühl der echten Interaktion zu stärken und das reale Greifen zu suggerieren, müssten die Finger z.B. beim Greifen eines Werkzeugs oder Bauteils ortsgetreu in der Bewegung gesperrt werden.

Mit der Möglichkeit, komplette Fertigungsanlagen realitätsnah abzubilden, besitzen AR-Anwendungen für die moderne Aus- und Weiterbildung ein immenses Potential. Im Projekt KORESIL wurde als vielversprechendes Anwendungsbeispiel für das produktionsnahe Training eine AR-Anwendung für die *Maschineneinweisung* am Beispiel einer mobilen Spritzgießanlage umgesetzt (Abbildung 8 links) [25]. Die Nutzenden werden mit optischen Hinweisen durch den Startprozess der Anlage geleitet und können die erfolgreiche Bearbeitung der Teilschritte über eine digitale Checkliste prüfen. Die Wiederholung der Arbeitsschritte bei zunehmender Reduktion der unterstützenden Informationen hilft den Teilnehmenden, die Inhalte des Trainings zu festigen. Mit derartigen Anwendungen können neue Mitarbeitende selbstständig die Bedienung und Wartung von Anlagen und Prozessen zeit- und ortsflexibel sowie gefahrenfrei kennenlernen. Ebenso besteht die Möglichkeit, erfahrene Fachkräfte bereits im Vorfeld gezielt zu trainieren und so den Übergang auf neue Anlagen und Prozesse zu beschleunigen. Auch während der Arbeit an der realen Produktionsanlage können AR-Anwendungen Hilfestellung bei der Maschinenbedienung geben, indem diese Informationen zum laufenden Prozess kontextgebunden und in Echtzeit den Mitarbeitenden präsentieren (vgl. Abbildung 8 rechts). Gleichzeitig ist durch die bidirektionale Ausprägung der Schnittstellen eine Anpassung der Prozessparameter direkt während der Arbeit an der Maschine oder auch während etwaiger Kontrollgänge intuitiv und effizient über die Hologramme möglich.

---

Maschinen-  
einweisung



*Abbildung 8: AR-Anwendungen besitzen großes Potential für den effizienten Kompetenztransfer. So können die Maschinenbedienung im Vorfeld erlernt werden (links) und die Mitarbeitenden während der laufenden Produktion mit aktuellen Prozessdaten versorgt werden (rechts).*

Dank der zahlreichen technologischen Entwicklungen, etwa der Verknüpfung mehrerer AR-Brillen oder der Kommunikation mit statischen und mobilen Robotern sowie haptischen Handschuhen, konnte das Potential von AR im industriellen Umfeld erfolgreich aufgezeigt werden. Die Unterstützung des Menschen im Produktionsumfeld sowie der Einsatz von AR als Lehrinstrument wurden gleichermaßen adressiert. Insbesondere für den letztgenannten Anwendungsfall ist jedoch eine hohe Akzeptanz dieser neuen Technologie bei allen Beteiligten erforderlich, weshalb auch dies im KORESIL-Projekt erforscht wurde. Diese Analysen werden nachfolgend dargestellt.

---

Zwischenfazit  
AR-  
Applikationen

---

## KORESIL-Studienergebnisse zu AR

---

Zur Potentialbewertung der Augmented Reality als innovativem, digitalem Lernwerkzeug wurde basierend auf den entwickelten Applikationen eine Befragung unter Studierenden des Maschinenbaus (Vertiefungsrichtung Produktionstechnik) durchgeführt [15]. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Analyse lassen sich mit folgenden Kernpunkten zusammenfassen.

Analyse  
Studierende

Im Kontext von Vorlesungen und Laboren kann AR

- Das eigenständige Lernen fördern, indem bspw. die Vorbereitung von zuhause ermöglicht wird
- Die Verknüpfung von Theorie und Praxis bereits im Hörsaal oder zu Hause bewerkstelligen
- Die Motivation steigern, da abstrakte Themen und Zusammenhänge anschaulich dargestellt werden, z.B. durch den Blick in eine Maschine zur Beobachtung eines Prozesses
- Den Praxisbezug erhöhen, da reale Probleme aus Produktionsunternehmen abgebildet werden können
- Die Erweiterung der digitalen Kollaboration zwischen Lehrenden und Lernenden auf Objekte und Prozesse realisieren

---

*Even over the short period of time, I learned more than ever by studying a written manual.*

*Student und Teilnehmer der AR-Feldstudie*

---

Dank einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit den Fachbereichen Psychology und Informatik konnte das Studiendesign weiter verfeinert werden, um übertragbare Erkenntnisse zur Nutzung von AR in Lernumgebungen zu erhalten. Dabei wurden in kontrollierten Lernumgebungen verschiedene Szenarien verglichen, z.B. die Erfüllung einer bestimmten

Aufgabe, welche zuvor mittels Text oder primär mittels auditiv unterstützter Hologrammen erläutert wurde. Folgenden Aussagen lassen sich aus einer ersten Studienanalyse ableiten:

- Die Kombination auditiver und visueller Instruktionen erzeugt die schnellste Durchführung einer Aufgabe durch die Probanden, jedoch bei einer initial erhöhten Fehlerrate gegenüber der Instruktion mittels Text.
- Die Kombination audio-visueller Instruktionen mit zusätzlichem Text erhöht die Fehlerrate und reduziert die Schnelligkeit der Durchführung nicht weiter. Es wird hier von einer Sinnesüberforderung ausgegangen, die die weiter erhöhte Fehlerrate erklären kann.
- Unabhängig von der gewählten Instruktionsmodalität empfinden die Probanden das Erlernen und Durchführen einer Aufgabe in AR als nicht sonderlich anstrengend.

Soll eine derart neue Technologie erfolgreich die Aus- und Weiterbildung digitalisieren und somit die Art, wie gelernt wird, transformieren, muss dieser Umbruch von den Lehrenden getragen werden. Lag die Vorerfahrung im Bereich XR bei Studierenden bei niedrigen 20 %, so lag diese bei Lehrenden noch einmal einige Prozentpunkte darunter. Entsprechend müssen Lehrkräfte passend für eine erfolgreiche Implementierung geschult werden. Die Ergebnisse der Lehrendenuntersuchung, bei der sowohl die Nutzung von AR-Brillen im Allgemeinen erprobt und evaluiert wurde, als auch der vergleichende Einsatz dieser Technologie in Trainingsumgebungen und realen Produktionsumgebungen, ergab dabei folgende Erkenntnisse:

- Hoher Tragekomfort und keine Schwindelgefühle, wie sonst bei Virtual Reality üblich – unabhängig von Alter und Vorerfahrung
- Interaktive und intuitive Handhabung, insbesondere durch direkte Steuerung per Hand und Stimme

- Aspekte wie Blick in die Maschine, Darstellung von Computersimulationen und virtuelle Sicherheitsfeatures sowohl in AR-Trainingsumgebungen als auch in realen Produktionsumgebungen relevant
- AR wird als geeignetes Tool angesehen, komplexe Lernziele eigenständig, motiviert und ohne externe Supervision zu erreichen

Bis zum Jahre 2027 soll die Anzahl an Nutzenden im Bereich Virtual Reality von heute 100 Millionen auf ca. 135 Millionen ansteigen. Hingegen wird bei Augmented Reality eine Verfünffachung von heute 20 auf dann 110 Millionen im gleichen Betrachtungszeitraum prognostiziert [26]. Dies unterstreicht das Potential und verschärft gleichzeitig die Notwendigkeit, bei dieser Technologie den Anschluss nicht zu verlieren. Soll AR zukünftig einen messbaren, nachhaltigen und wirtschaftlichen Vorteil generieren, so müssen noch offene Fragen beantwortet werden.

---

Der Blick nach vorne

- Es muss anhand **konkreter Feldstudien** mit Industrieunternehmen quantifiziert werden, welchen Impact AR-Technologien auf die Produktivität von Arbeitskräften haben. Dabei sind Schlüsselaspekte zu identifizieren, die die Ableitung konkreter Gestaltungsrichtlinien ermöglichen.
- Entsprechende Untersuchungen sollten dabei nicht nur Pilot-Charakter haben, sondern in **Langzeitstudien** angelegt sein, welche auch Entwicklungen innerhalb der Technologien erfassen können.
- Es gilt die **psychische wie physische Belastung** bei der Nutzung verschiedenster AR-Geräte mit unterschiedlichen Interaktionsmodalitäten genauer zu untersuchen. Nur so kann ein erfolgreicher, barrierefreier Langzeiteinsatz a priori zur Produktivitätssteigerung implementiert werden. Daraus lassen sich ergonomische Gestaltungsempfehlungen vor allem für die nächste Hardware-Generation ableiten.
- Einen weiteren Schwerpunkt sollte die **Identifikation von Kriterien** zur generellen **Akzeptanz** einer solchen Technologie darstellen. Wie kann es gelingen, dass Menschen aller Alters- und

Bildungsstufen den Mehrwert von AR in ihrem Arbeitsalltag erkennen und somit bereitwillig den Einsatz dieser annehmen?

- Die **Entwicklung** entsprechender AR-Applikationen muss umfangreich **vereinfacht** werden. Aktuell können für einen konkreten Anwendungsfall nur Personen mit speziellen Vorkenntnissen den Aufwand sowie den Nutzen und die Risiken abschätzen und die eigentliche Entwicklung vornehmen. Soll AR in der Industrie in der gesamten Breite sowie auch in anderen Wirtschaftszweigen und in Ausbildungseinrichtungen vielfältigen Einsatz finden, so muss die Hürde des Initialaufwands auf Software- wie Hardware-Ebene reduziert werden.

---

## Executive Summary

---

Die in diesem Whitepaper dargestellten Kernaspekte bezüglich der Bedeutung von digital vernetzten soziotechnischen Systemen für die Arbeitswelt von morgen, und welche Rolle Augmented Reality als Werkzeug darin hat, sind nachfolgend zusammengefasst.

- **Zukunft der Arbeitswelt:** In der zukünftigen Arbeitswelt sind Mensch und Maschine stärker vernetzt, was komplexe soziotechnische Systeme hervorbringt, die entscheidend sind für die Bewältigung von Arbeitskräftemangel, internationalem Konkurrenzdruck sowie ökologischen und soziologischen Nachhaltigkeitsanforderungen.
- **Ortsunabhängige Vernetzung:** Eine zentrale Komponente dieser Systeme wird die ortsunabhängige Vernetzung zwischen datengenerierenden und fernsteuerbaren Produktionsmaschinen sowie den Arbeitskräften sein. Hier kommt Augmented Reality (AR) eine Schlüsselrolle als Enabler zu.
- **AR in der Produktion:** AR ermöglicht, durch die Einblendung von Informationen im Sichtfeld der Nutzer die Überwachung, Steuerung und Weiterentwicklung von Maschinen mittels tragbarer Devices wie holografischer Brillen.
- **AR in der Lehre:** AR-Technologie erlaubt zeit- und kostensparende Aus- und Weiterbildung auf verschiedensten Bildungsebenen mit einem hohen Grad an Intuition und Zugänglichkeit dank benutzerfreundlicher Devices und Anwendungen.
- **Notwendige Verbesserungen:** Für eine breite Adaption von AR müssen sowohl Hardware als auch Software verbessert werden. Die Entwicklung von AR-Anwendungen sollte vereinfacht werden, ähnlich wie bei Smartphone-Apps, und die Hardware muss unter ergonomischen Aspekten weiterentwickelt werden.

- **Potential von AR:** Wenn diese Anpassungen erfolgreich sind und die Akzeptanz in produzierenden Unternehmen für solche disruptiven Technologien gestärkt wird, hat AR das Potential, die Produktivität nachhaltig zu erhöhen und die Arbeitskräfte nachhaltig zu entlasten.

## Literatur

---

- [1] Polojärvi D, Palmer E, Dunford C. (2023). A systematic literature review of sociotechnical systems in systems engineering. *Systems Engineering*. 26: 482–504. DOI: 10.1002/sys.21664
- [2] Carayon, P. (2006). Human factors of complex sociotechnical systems, *Applied Ergonomics*, 37(4), pp. 525-535, DOI: 10.1016/j.apergo.2006.04.011.
- [3] Makarius, E. E., Mukherjee, D., Fox, J. D., Fox, A. K. (2020). Rising with the machines: A sociotechnical framework for bringing artificial intelligence into the organization, *Journal of Business Research*, 120, pp. 262-273, DOI: 10.1016/j.jbusres.2020.07.045
- [4] Clarke, L. (2023): Call for AI pause highlights potential dangers. In: *Science* (New York, N.Y.) 380 (6641), S. 120–121. DOI: 10.1126/science.adi2240.
- [5] Behrendt, A., de Boer, E., Kasah, T., Koerber, B., Mohr, N., Richter, G. (2021). Industrielles IoT und führende Technologien als Treiber der digitalen Transformation in der Produktion. McKinsey & Company, 28.11.2023. Online verfügbar unter [https://www.mckinsey.de/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/publikationen/2021-02-05%20iiot%20report/mckinsey-iiot\\_als\\_treiber\\_der\\_digitalen\\_transformation\\_in\\_der\\_production.pdf](https://www.mckinsey.de/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/publikationen/2021-02-05%20iiot%20report/mckinsey-iiot_als_treiber_der_digitalen_transformation_in_der_production.pdf), zuletzt geprüft am 11.05.2024.
- [6] Mary, E., W., Dankbaar., Peter, G., M., de Jong. (2014). Technology for learning: how it has changed education. *Perspectives on medical education*, 3(4):257-259. DOI: 10.1007/S40037-014-0141-0
- [7] Meschut, G., Gillich, J., Chudalla, N. (2024). Ressourceneffiziente Füge- & Entfügetechnologien. In: Gude, M.; Tekkaya, A.E.; Zäh, M.F. et al. (Hrsg.): *Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Sozio-technische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper*. Dresden. DOI: 10.25368/2024.53

- [8] Zwettler, Monika (2023): Entwicklungsprozesse mit Augmented Reality einfach optimieren. In: konstruktionspraxis, 28.09.2023. Online verfügbar unter <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/engie-refrigeration-ar-anwendung-optimierung-a-6812b3385189fbfae2481cd065f69d57/?cmp=nl-112&uuid=98a3446d3739bd09dbf3a20c1bf76fc3>, zuletzt geprüft am 11.10.2023.
- [9] Illing, J., Klink, P., Grünefeld, U., Pflingstorn, M., Heuten, W. (2020). Time is money! Evaluating Augmented Reality Instructions for Time-Critical Assembly Tasks. 277-287. DOI: 10.1145/3428361.3428398
- [10] Jia, W., Zhu, J., Xie, L., Yu, C. (2021). Review of the Research on Augmented Reality Maintenance Assistant System of Mechanical System. 1748(6):062041-. DOI: 10.1088/1742-6596/1748/6/062041
- [11] Alves, J., Marques, B., Dias, P., Santos, B. S. (2020). Using Augmented Reality and Step by Step Verification in Industrial Quality Control. 350-355. DOI: 10.1007/978-3-030-58282-1\_55
- [12] Chen, K., Perera, G., Li, L., Xu, X., Chen, K. B. (2020). Develop and evaluate an augmented reality posture training tool to promote work safety. 64(1):2051-2055. DOI: 10.1177/1071181320641496
- [13] Morgado, M., Miguel, L. (2018). Ergonomics in the Industry 4.0: virtual and augmented reality. Journal of ergonomics, 08(05) DOI: 10.4172/2165-7556.1000E181
- [14] Drescher, U. (2023): Gutes Design ist das Ergebnis eines durchdachten Nutzer-Konzepts. In: Konstruktionspraxis, 30.05.2023. Online verfügbar unter [https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/gutes-design-ist-das-ergebnis-eines-durchdachten-nutzer-konzepts-a-8e94910c0fcd8b992bd9db07b88a3e34/?xing\\_share=news](https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/gutes-design-ist-das-ergebnis-eines-durchdachten-nutzer-konzepts-a-8e94910c0fcd8b992bd9db07b88a3e34/?xing_share=news), zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- [15] Grodotzki, J., Müller, B.T., Tekkaya, A.E. (2023). Enhancing Manufacturing Education based on controller-free Augmented Reality Learning, 51st SME NAMRC Conference, New Brunswick, NJ, USA. DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.08.068

- [16] Duin, A. H., Armfield, D. M., Pedersen, I. (2019). Human-Centered Content Design in Augmented Reality. 89-116. DOI: 10.4324/9780429201141-6
- [17] Toll, A. M. (2019). Ergonomics Study of a Helmet-Mounted Augmented Reality System for Coal Power Plant Workers, Master Thesis, Marquette University, [https://epublications.marquette.edu/theses\\_open/527/](https://epublications.marquette.edu/theses_open/527/)
- [18] Dad, A., Arora, B., Parker, N., Rachh, T. (2018). Augmented Reality: Tracking Methods. International Journal of engineering research and technology, 5(1)
- [19] Kiryakova, G. (2020). The Immersive Power of Augmented Reality. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.92361
- [20] Lemordant, J. (2010) Basic Concepts in Augmented Reality Audio. W3C Workshop: Augmented Reality on the Web, Jun 2010, Barcelona, Spain. pp.4. (hal-00494276)
- [21] Thomas, D., Holmquist, L. E. (2021). Is Functionality All That Matters? Examining Everyday User Opinions of Augmented Reality Devices. 232-237. DOI: 10.1109/VRW52623.2021.00050
- [22] Hecker, C., Krampitz, T., Lieberwirth, H. (2024). Demontage, Recycling, Stoffkreisläufe. In: Gude, M.; Tekkaya, A.E.; Zäh, M.F. et al. (Hrsg.): Komplexität beherrschen, Kreisläufe schließen. Soziotechnische Systeme für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen: Das interaktive Whitepaper. Dresden. DOI: 10.25368/2024.54
- [23] Müller, B.T., Grodotzki, J., Tekkaya, A.E. (2024). Augmented Reality based Control of Autonomous Mobile Robots. In: Auer, M.E., Langmann, R., May, D., Roos, K. (eds) Smart Technologies for a Sustainable Future. STE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1027. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-61891-8\_30
- [24] Grodotzki, J., Müller, B.T., Tekkaya, A.E. (2024). Enhancing the Immersion of Augmented Reality through Haptic Feedback. . In: Auer, M.E., Langmann, R., May, D., Roos, K. (eds) Smart Technologies for a Sustainable Future. STE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1027. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-61891-8\_31

- [25] Müller, B.T. (2024): Phoenix Contact STE Student Award: HoloLEIV - AR Based Setup and Operation of Inline Robotic Systems. 21st International Conference on Smart Technologies & Education. Helsinki, 06.-08.03.2024. Online verfügbar unter <https://www.edunet-wa.com/1>.
- [26] Brandt, M. (12. Oktober, 2022). Andere Realitäten bislang spärlich bevölkert [Digitales Bild]. Zugriff am 27. Juli 2023, von <https://de.statista.com/infografik/28442/geschaetzte-anzahl-der-nutzerinnen-von-vr-ar-headsets-weltweit/>