

Prospektiven

Neues zur zirkulären Wertschöpfung

Circular Economy News

2026 | 04



Extended Reality für die Kreislaufwirtschaft:

Prozesse verstehen, für Ressourcen sensibilisieren, Zukunft simulieren

André Helgert, Gian Luca Dossena, Sabrina C. Eimler

Autor:innen

Sabrina C. Eimler, Hochschule Ruhr West
André Helgert, Hochschule Ruhr West
Gian Luca Dossena, Hochschule Ruhr West

Reihe

Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung / Circular Economy News
Uwe Handmann, Wolfgang Irrek, (Hrsg.)
ISSN (Print) 2750-4840
ISSN (Online) 2750-4859
1. Auflage, 01.09.2026

Bildquellen

Titelbild: response Fotografie – Hochschule Ruhr West

Bitte zitieren als:

Eimler, S.C.; Helgert, A.; Dossena, G.L. (2026): Extended Reality für die Kreislaufwirtschaft. Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2026/04. Bottrop: Prosperkolleg e.V.

Please cite as:

Eimler, S.C.; Helgert, A.; Dossena, G.L. (2026): Extended Reality for Circular Economy. Prospektiven – Circular Economy News 2026/04. Bottrop, Germany: Prosperkolleg e.V.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Impressum / Kontakt

Prosperkolleg e.V.
Am Vietshof 2-4
46236 Bottrop
Germany
info@prosperkolleg.ruhr

Redaktion finanziert durch:



Forschung finanziert durch:



Alle Projekte werden gefördert durch:



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Abstract

Der Artikel beschreibt Perspektiven, wie Extended Reality, also Virtual Reality, Augmented Reality und Mixed Reality, Unternehmen auf dem Weg zur Circular Economy unterstützen können. Der Beitrag erklärt zunächst, was XR ist und warum immersive Technologien zunehmend als Zukunftstechnologie für Wirtschaft, Bildung und Zusammenarbeit diskutiert werden. Anschließend wird gezeigt, wie XR in der Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden kann: für Schulungen, Wartung und Remote Assistance, Reparatur, zirkuläres Produktdesign, digitale Zwillinge und neue Formen der Zusammenarbeit. Praxisnahe Beispiele zeigen, welchen konkreten Nutzen XR für Unternehmen haben kann. Abschließend werden Potenziale, Grenzen und Einstiegsmöglichkeiten für kleine und mittlere Unternehmen diskutiert.

Inhalt

1.	Einleitung: Kreislaufwirtschaft und Extended Reality.....	3
2.	Was ist Extended Reality?	3
3.	Warum XR für Unternehmen relevant wird: Potenziale für zirkuläre Wertschöpfung	5
4.	XR entlang des Produktlebenszyklus	7
4.1.	Produktentwicklung und zirkuläres Design.....	8
4.2.	Schulung und Qualifizierung	9
4.3.	Montage, Nutzung, Betrieb und Prozessverständnis.....	9
4.4.	Wartung, Reparatur und Lebensdauerverlängerung	10
4.5.	Zusammenarbeit und Wissenstransfer	11
5.	Fazit: XR als Brückentechnologie für die Kreislaufwirtschaft.....	12
	Abbildungsverzeichnis	14
	Literaturverzeichnis	14
	Über die Autor:innen	16

Hinweis zur Nutzung gendersensibler Sprache

In dieser Publikation wird gendersensible Sprache verwendet. Wir beschränken uns darauf natürliche Personen zu gendern, während juristische Personen, wie Unternehmen, ohne Genderung genannt werden.

1. Einleitung: Kreislaufwirtschaft und Extended Reality

Extended Reality (XR) Technologien, wie Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) und Mixed Reality (MR), gelten als Schlüsseltechnologien der Zukunft, die Wirtschaft und Gesellschaft transformieren (Europäische Kommission, 2025). Ob in der Medizin, der industriellen Wartung, in Showrooms von Architekten, in der Unterhaltungsbranche, der Demonstration und Simulation komplexer Prozesse, technischer oder medizinischer Zusammenhänge oder in formellen und informellen Bildungskontexten, XR verbreitet sich mit der Weiterentwicklung technologischer Möglichkeiten zunehmend. Zentrale Vorteile liegen in der immersiven und interaktiven Darstellung komplexer Inhalte, der Möglichkeit realitätsnaher Simulationen ohne reale Risiken sowie in ortsunabhängigen, skalierbaren und ressourcenschonenden Lern-, Trainings- und Planungsprozessen.

Die genannten Vorteile zeigen jedoch zugleich, dass XR kein einheitliches technologisches Konzept darstellt, sondern verschiedene Ausprägungen umfasst, die je nach Anwendungskontext unterschiedliche Potenziale entfalten. Gerade im Kontext der Twin Transition, also der gleichzeitigen digitalen und nachhaltigen Transformation, ist daher ein differenziertes Verständnis der einzelnen XR-Technologien erforderlich. Um die Potenziale von XR vollständig zu nutzen und gezielt einzusetzen, ist es essenziell, die Unterschiede und spezifischen Merkmale von VR, AR und MR zu kennen.

Dieses differenzierte Verständnis ist besonders relevant, wenn XR nicht nur als technologische Innovation betrachtet wird, sondern als Werkzeug, um komplexe Transformationsprozesse sichtbar und erfahrbar zu machen und handlungsorientiert zu vermitteln, wie zum Beispiel im Kontext der Kreislaufwirtschaft. Die Vision einer Kreislaufwirtschaft sieht vor Ressourcen effizienter zu nutzen, Abfälle zu vermeiden und Produkte und Materialien möglichst lange im Umlauf zu halten, bleibt jedoch häufig im Alltag abstrakt und wenig greifbar. Viele zugrunde liegende Prozesse, wie etwa Lieferketten, Materialflüsse oder Lebenszyklen und Weiterverwendungsmöglichkeiten von Produkten und Materialien, sind meist unsichtbar, verteilt oder für Unternehmen und Konsument:innen nicht verständlich – die Umsetzung in konkrete, praktische und nachhaltige Entscheidungen fällt schwer.

Genau hier können XR-Technologien zum Einsatz kommen. Indem sie die unsichtbaren Prozesse und abstrakten Konzepte der Transformation zur Kreislaufwirtschaft visualisieren sowie Zusammenhänge erlebbar machen, schaffen sie bei verschiedensten Stakeholdern ein tieferes Verständnis über zirkuläre Systeme und machen ihnen die Potenziale und konkreten Handlungsmöglichkeiten sichtbar. In der Produktentwicklung können virtuelle Modelle und anpassbare Roboterumgebungen helfen, Varianten frühzeitig zu testen, bevor physische Prototypen gebaut oder reale Systeme verändert werden. In der Schulung können Anwendungen dazu beitragen, Fehlbedienungen, Sicherheitsrisiken und Materialverschwendung zu reduzieren. Im laufenden Betrieb können virtuelle Photovoltaik-Anlagen oder andere digitale Nachbildungen technische Zusammenhänge sichtbar machen und so das Verständnis für Energieflüsse, Anlagenverhalten und Prozessentscheidungen fördern. Bei Wartung und Reparatur können AR- und MR-Systeme Informationen direkt dort bereitstellen, wo sie benötigt werden: an der Maschine, am Bauteil oder im Sichtfeld der Mitarbeitenden.

In dieser Prospektive geben wir neben einer Definition einen Überblick über verschiedene Einsatzmöglichkeiten und konkrete Anwendungsbeispiele.

2. Was ist Extended Reality?

XR umfasst als Sammelbegriff alle immersiven Technologien, die die reale Welt mit virtuellen Inhalten verknüpfen. VR, AR und MR unterscheiden sich darin, wie stark sie die reale Umgebung einbeziehen und bilden ein Kontinuum von Technologien, die eine vollständig virtuelle Welt darstellen bis hin zu Darstellungsformen, die die reale Welt lediglich um einige wenige virtuelle Inhalte anreichern.

VR wird heute vor allem durch Head-Mounted Displays (HMDs) umgesetzt, welche von Nutzer:innen oft als VR-Brille bezeichnet werden. Aktuelle Beispiele hierfür sind die Meta Quest 3, die Sony Playstation VR2 oder die Pico 4. Über eine separate Bildschirmausgabe für jedes Auge erzeugen sie

eine stereoskopische 3D-Sicht. Die Nutzenden sind durch das typischerweise geschlossene Design des HMDs von der realen Umgebung abgeschottet und nehmen ausschließlich die virtuelle Welt wahr. Head-Tracking stellt sicher, dass Rotation und Position des Kopfes in Echtzeit erfasst werden und dadurch eine immersive 360°-Darstellung der virtuellen Umgebung möglich ist. Controller, zusätzliche Sensoren, sowie die Erfassung der Körperposition ermöglichen eine präzise Übertragung von Bewegungen und Eingaben in die virtuelle Welt. Dieses Zusammenspiel trägt dazu bei, Interaktionen natürlicher zu gestalten und das Gefühl von Realismus und Präsenz in der virtuellen Umgebung zu erhöhen.

Bei AR-Anwendungen werden virtuelle Informationen direkt in die reale Umgebung eingebettet. Dies geschieht beispielsweise über semi-transparente Displays (siehe Abbildung 1, links) oder das von einer Kamera erfasste Echtzeitbild, in das zusätzliche Informationen eingeblendet werden, ohne die physische Welt auszublenden. Zur Darstellung von AR-Inhalten werden dabei häufig HMDs oder Brillen benutzt, wie etwa die Microsoft Hololens 2 oder die Meta Ray-Ban, aber auch VR HMDs, wie die Meta Quest 3, eignen sich zur Darstellung von AR-Inhalten. Im Gegensatz zur VR-HMDs ist die reale Umgebung hier aber noch sichtbar. Mobile Geräte wie Smartphones oder Tablets werden ebenfalls genutzt, um eine niedrigschwellige Darstellung von AR-Inhalten zu ermöglichen. Damit diese Einblendungen überzeugend wirken, erfassen AR-Systeme kontinuierlich die Position und Ausrichtung der Nutzenden und verarbeiten diese Informationen in Echtzeit. Das Zusammenspiel von Tracking und grafischer Darstellung ermöglicht es, virtuelle Informationen präzise auf das Sichtfeld zu projizieren und ihre Darstellung fortlaufend an die Perspektive der Nutzenden anzupassen. Weil die reale Umgebung stets sichtbar bleibt, eignet sich AR besonders gut für den Einsatz in industriellen Kontexten, in denen Mitarbeitende weiterhin mit physischen Objekten und Anlagen interagieren müssen. Das könnte insbesondere in Montagehallen nützlich sein, beispielsweise wenn Mitarbeitenden über eine AR-Brille Montageschritte, Bauteilpositionen oder Sicherheitshinweise direkt am realen Werkstück eingeblendet werden.

MR geht über die reine Einblendung virtueller Informationen in die reale Umgebung hinaus. Während bei AR digitale Inhalte zusätzlich zur sichtbaren Realität dargestellt werden, entsteht bei MR eine stärker integrierte Umgebung, in der reale und virtuelle Elemente räumlich aufeinander bezogen sind und miteinander interagieren können. Grundlage dafür ist die kontinuierliche Erfassung der realen Umgebung durch verschiedene Sensoren, beispielsweise Kameras, Tiefensensoren und Bewegungssensoren. Aus diesen Daten wird ein räumliches Modell der Umgebung erzeugt, um, virtuelle Objekte nicht nur an festen Positionen im realen Raum zu platzieren, sondern sie auch an reale Flächen, Kanten und Strukturen anzupassen (siehe Abbildung 1, mitte). Dadurch können digitale Objekte etwa auf einem realen Tisch liegen, von physischen Gegenständen verdeckt werden oder auf Veränderungen in der Umgebung reagieren. MR unterscheidet sich somit von AR durch den höheren Grad der räumlichen Verknüpfung und Interaktion zwischen realen und virtuellen Bestandteilen.

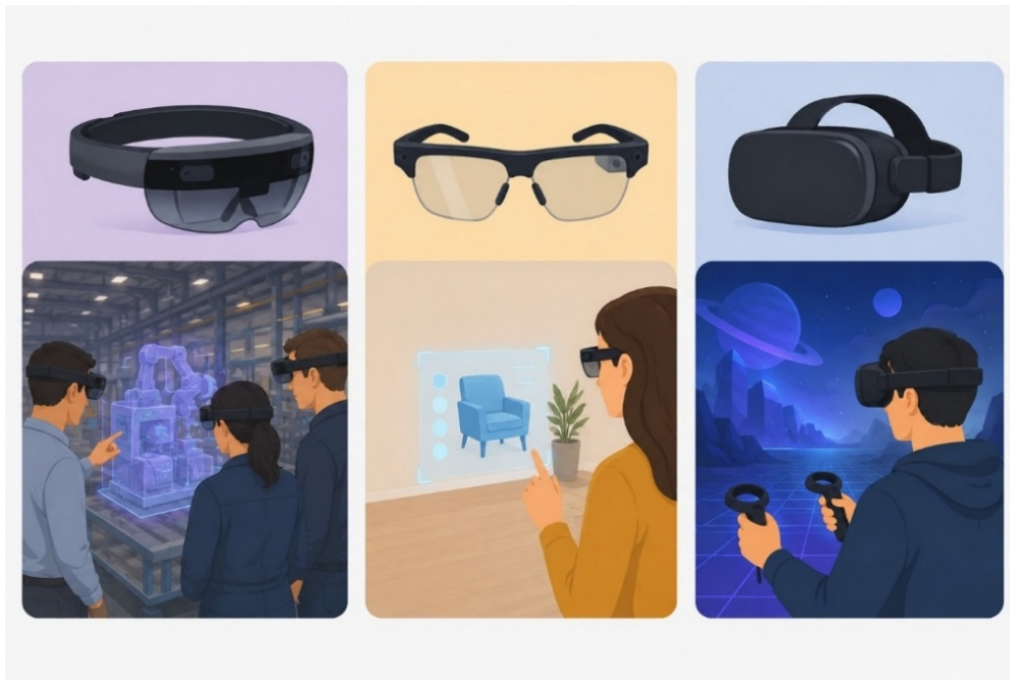


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Technologien Virtual Reality, Augmented Reality und Mixed Reality (v.l.n.r.)

3. Warum XR für Unternehmen relevant wird: Potenziale für zirkuläre Wertschöpfung

XR ist für die zirkuläre Wertschöpfung in vielerlei Hinsicht relevant: Sichtbarkeit und Verständnis des Themas, Fehlervermeidung, Ressourcenschonung und das Treffen von nachhaltigeren Entscheidungen können durch XR unterstützt werden. Die zunehmende Bedeutung von XR für Unternehmen ergibt sich dabei nicht nur aus technologischen Fortschritten, sondern auch aus aktuellen Herausforderungen wie steigenden Qualifizierungsanforderungen, Fachkräftemangel, komplexeren Arbeitsprozessen und dem Bedarf an effizienteren Formen der Zusammenarbeit. Entsprechend wird XR auch in internationalen Diskussionen über Zukunftstechnologien, etwa im World Economic Forum, als vielversprechender Anwendungsbereich betrachtet (Vimbai Jumbe, 2024).

Ein Literaturreview von Dossena et al. (Manuskript in Vorbereitung) identifizierte aus wissenschaftlichen Datenbanken 29 wissenschaftliche Publikationen, welche sich inhaltlich mit dem Einsatz von XR-Technologien im Kontext der Kreislaufwirtschaft auseinandersetzen. Oft dienen sie der Sensibilisierung, Bildung und Verhaltensänderung. Im industriellen Kontext werden XR-Technologien vor allem genutzt, um Prozesse zu optimieren, Fehler zu vermeiden und ressourcenschonendere Entscheidungen zu ermöglichen.

Zehn der erfassten Publikationen befassten sich mit dem Bereich der Bildung und Bewusstseinsbildung. Hier wird XR genutzt, um komplexe ökologische Zusammenhänge verständlicher zu machen. Mehrere Arbeiten beschreiben Anwendungen, die Bürgerinnen und Bürger über Recycling, Plastikverbrauch oder nachhaltigen Konsum informieren. So wurden VR-Anwendungen entwickelt, die die Auswirkungen von Plastikmüll visualisieren und dadurch umweltbewussteres Verhalten fördern sollen (Chirico et al., 2020). Andere Projekte nutzen AR, um Nutzenden zu zeigen, wie Abfall richtig getrennt wird oder wie Plastikabfälle kreativ weiterverwendet werden können (Karyono et al., 2024). Auch nachhaltiger Lebensmittelkonsum und die Vermeidung von Lebensmittelverschwendung wurden als Einsatzbereiche identifiziert (Hsaio et al., 2025). XR-Anwendungen informieren hier beispielsweise über richtige Lagerung oder machen sichtbar, welche Auswirkungen Lebensmittelverschwendung auf Umwelt und Ressourcen hat (Bordegoin et al., 2026).

Insgesamt 19 Artikel zeigen, wie XR-Technologien Unternehmen entlang des gesamten Produktlebenszyklus von der Planung über Wartung und Reparatur bis hin zu Recycling und Wiederverwertung unterstützen. Ein zentrales Einsatzgebiet ist die Unterstützung von Reparatur- und Wartungsprozessen. AR-Systeme können Techniker:innen in Echtzeit zusätzliche Informationen einblenden und Schritt-für-Schritt-Anleitungen direkt an Maschinen visualisieren (Chu & Pan, 2023). Dadurch lassen sich Fehler reduzieren und Reparaturen effizienter durchführen. Gleichzeitig fördern solche Systeme die Lebensdauer von Produkten und Anlagen, da Reparatur und Wartung gegenüber einem frühzeitigen Austausch attraktiver und praktikabler werden.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld ist die Wiederverwendung und Rückgewinnung von Materialien und Bauteilen. So beschreibt das Review AR-Systeme, die beim Zerlegen von Waschmaschinen unterstützen, um wiederverwendbare Komponenten effizient zu identifizieren und auszubauen (Lorenz et al., 2025). Andere Anwendungen helfen dabei, anhand von Diagnosedaten zu entscheiden, ob ein Bauteil repariert, ersetzt oder erneut genutzt werden sollte (Mao et al., 2025). Dadurch werden Ressourcen geschont und Materialkreisläufe verlängert.

Auch im Bauwesen spielt XR eine wichtige Rolle. Mehrere Arbeiten beschäftigen sich mit sogenannten „Digital Twins“, also digitalen Abbildern von Gebäuden und Materialien (Su et al., 2025; Wieser et al., 2024). Mithilfe von VR und MR können Gebäude visualisiert und hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit analysiert werden (Reisinger et al., 2024). So lassen sich Materialien wie Holz- oder Stahlträger bereits in der Planungsphase auf ihre spätere Wiederverwendung oder Rückgewinnung hin bewerten (Caldas et al., 2022; Schützenhofer et al., 2024). XR unterstützt damit Entscheidungen, die langfristig zu einer ressourcenschonenderen Bauweise beitragen können.

Darüber hinaus kann XR die Zusammenarbeit räumlich verteilter Teams unterstützen. Virtuelle Arbeitsumgebungen ermöglichen es mehreren Personen, gemeinsam mit digitalen Modellen, Prototypen oder Visualisierungen zu arbeiten. Dies ist insbesondere für zirkuläre Wertschöpfungsprozesse relevant, da diese häufig die Abstimmung unterschiedlicher Akteur:innen entlang des gesamten Produktlebenszyklus erfordert, von der Entwicklung, Produktion, Wartung, Rücknahme, Recycling bis hin zur Wiederverwertung. XR kann dabei helfen, komplexe Informationen gemeinsam sichtbar zu machen und Entscheidungen über Materialien, Bauteile oder Prozesse standortübergreifend zu unterstützen. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit von Hard- und Software sinken zudem die technischen Hürden für den Einsatz von XR in Unternehmen.

Insgesamt zeigt sich, dass XR vor allem dort einen Mehrwert bietet, wo komplexe Informationen verständlich dargestellt und in konkrete Handlungen übersetzt werden müssen. XR-Technologien helfen dabei, verborgene Materialflüsse sichtbar zu machen, nachhaltige Entscheidungen zu unterstützen und zirkuläre Prozesse effizienter zu gestalten. Gleichzeitig wird deutlich, warum XR gerade jetzt für Unternehmen relevant wird: Die Technologie bietet praxisnahe, skalierbare Möglichkeiten für Weiterbildung, Prozessunterstützung und Zusammenarbeit und kann damit auf zentrale Herausforderungen industrieller Transformation reagieren. XR kann daher nicht nur als technisches Werkzeug verstanden werden, sondern auch als Medium, das Lernen, Verständnis und Zusammenarbeit fördert. Gerade deshalb besitzt XR großes Potenzial, Unternehmen bei der Transformation hin zu einer stärker zirkulären Wertschöpfung zu unterstützen.



Abbildung 2: Verschiedene Einsatzmöglichkeiten von XR

4. XR entlang des Produktlebenszyklus

Nachdem deutlich wurde, warum XR für Unternehmen im Kontext zirkulärer Wertschöpfung relevant ist, stellt sich im nächsten Schritt die Frage, an welchen Stellen des Produktlebenszyklus diese Technologien konkret ansetzen können. XR entfaltet ihren Nutzen für die Kreislaufwirtschaft entlang des gesamten Produktlebenszyklus: von der Entwicklung und Planung über Schulung, Nutzung, Wartung und Reparatur bis hin zu Demontage, Wiederverwendung und Recycling. Dabei kann XR als Übersetzungstechnologie verstanden werden: Die Technologie kann technische Zusammenhänge, Materialflüsse, Energieverbräuche oder Nachhaltigkeitswirkungen sichtbar und räumlich erfahrbar machen. Gerade für Unternehmen ist dies relevant, weil zirkuläre Maßnahmen häufig nicht an fehlenden Vorteilen scheitern, sondern daran, dass sie im Arbeitsalltag schwer greifbar und schwer umsetzbar sind. Welche Informationen brauchen Mitarbeitende, um eine Reparatur sicher durchzuführen? Wie lassen sich komplexe Nachhaltigkeitsthemen so vermitteln, dass sie auch praktisch angewandt werden? Wie kann eine Anlage länger genutzt oder ein Bauteil wiederverwendet werden? Bei diesen Fragestellungen können VR, AR und MR unterschiedliche Aufgaben übernehmen. VR eignet sich besonders, wenn Prozesse vollständig simuliert, trainiert oder erklärt werden sollen. AR ist hilfreich, wenn digitale Informationen direkt in reale Arbeitssituationen eingeblendet werden. MR verbindet beide Ansätze, indem digitale Objekte räumlich in reale Umgebungen eingebettet und dort interaktiv genutzt werden können. Entscheidend ist dabei nicht die Technologie an sich, sondern die Frage, welches Problem im Unternehmen gelöst werden soll.

4.1. Produktentwicklung und zirkuläres Design

Ein erster Anwendungsbereich liegt in der Produktentwicklung und dem zirkulären Design. Produkte sollen langlebig, reparierbar, demontierbar und wiederverwertbar sein. Solche Anforderungen müssen in der Regel früh berücksichtigt werden, da bereits produzierte Produkte sich nur schwer noch verbessern lassen. Hier kann XR helfen, Produkte schon vor der physischen Herstellung erfahrbar zu machen. Somit können Konstrukteur:innen, Techniker:innen und weitere Stakeholder ein virtuelles Modell eines Produktes betrachten, verändern und gemeinsam diskutieren. Damit können Entwicklungsfehler vermieden und physische Prototypen reduziert werden. XR wird insbesondere dann interessant, wenn diese virtuellen Modelle mit Produktdaten oder digitalen Zwillingen (also ein virtuelles Abbild eines realen Objekts, Systems oder Prozesses) verbunden werden. Somit wird aus einer rein optischen Darstellung eine Möglichkeit, Informationen über Materialien, Komponenten, Nutzungszustände und Wartungsbedarfe zu erhalten. Diese Möglichkeiten können entsprechend im konkreten Nutzungskontext sichtbar gemacht werden. Ein ähnlicher Gedanke zeigt sich in konkreten Forschungstools für die Mensch-Roboter-Interaktion für Industrieroboter (Arntz et al., 2021) oder soziale Roboter (Helgert et al., 2025). Das Tool von Helgert et al. wurde entwickelt, um virtuelle Studiumgebungen einfacher erstellen und anpassen zu können (siehe Abbildung 3). Forschende können dort unter anderem Umgebungen, Roboter, Interaktionsformen und Messmethoden auswählen sowie Roboterverhalten über eine visuelle Programmieroberfläche gestalten. Der Vorteil liegt darin, dass virtuelle Roboter flexibel verändert, getestet und in unterschiedlichen Szenarien (Bibliothek, Industriehalle, etc.) eingesetzt werden können, ohne dass dafür ein physischer Roboter umgebaut, neu programmiert oder überhaupt vor Ort verfügbar sein muss.

Für zirkuläres Design ist dieser Ansatz interessant, weil er zeigt, wie XR Entwicklungs- und Testprozesse ressourcenschonender machen kann. Varianten lassen sich virtuell erproben, bevor reale Prototypen oder physische Anpassungen nötig werden. Gerade bei komplexen technischen Systemen, wie etwa Robotern, Maschinen oder Assistenzsystemen, können Unternehmen dadurch früher prüfen, welche Lösung funktioniert, welche Funktionen wirklich gebraucht werden und welche Gestaltung später wartungs-, reparatur- oder anpassungsfreundlich ist. XR unterstützt damit nicht nur die Visualisierung fertiger Produkte, sondern auch das iterative Entwickeln zirkulärer Lösungen.

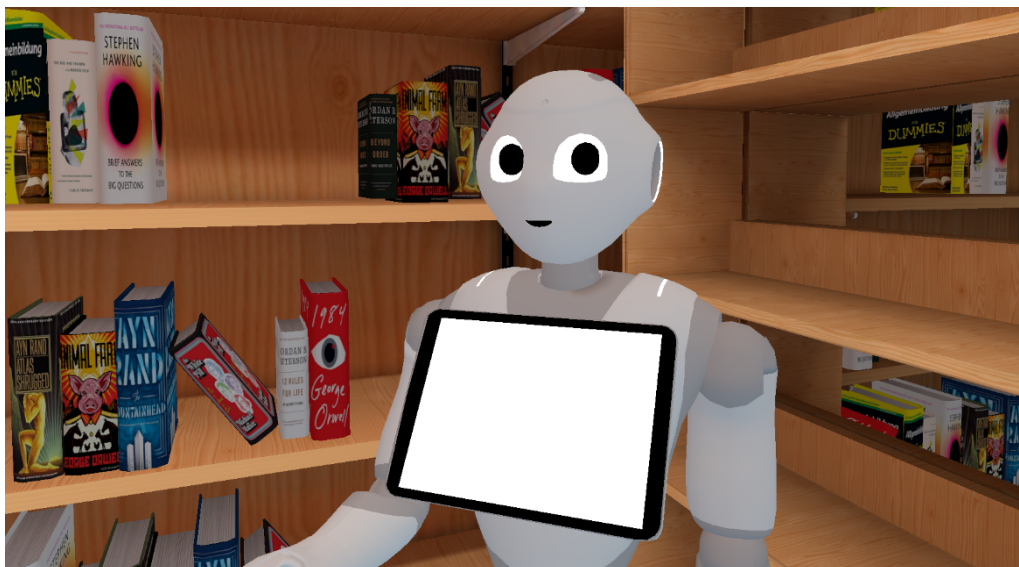


Abbildung 3: Ein virtueller sozialer Roboter in einer virtuellen Bibliothek.

4.2. Schulung und Qualifizierung

Ein zentraler weiterer Einsatzbereich ist die Schulung. Unternehmen müssen Mitarbeitende in der Regel an komplexen Maschinen, Anlagen oder Prozessen ausbilden. Klassische Schulungen mit Handbüchern oder Präsentationen reichen häufig nicht aus, wenn praktische Handgriffe oder räumliches Verständnis oder Sicherheit eine wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig sind reale Trainingsumgebungen oft teuer, gefährlich oder nur eingeschränkt verfügbar. XR bietet hier den Vorteil, dass solche Trainings-Handlungen in sicheren Umgebungen wiederholt und verschleißfrei durchgeführt werden können. Digitale Zwillinge von echten Maschinen ermöglichen es, gefährliche Situationen zu erleben, ohne tatsächlich gefährdet zu sein. So können auch Abläufe trainiert werden, wenn die Maschine gerade nicht verfügbar ist.

Ein Beispiel für ein solches Anwendungsszenario ist die VR-Anwendung "Mill Instructor" (Keßler et al., 2020) (siehe Abbildung 4). Sie bildet eine CNC-Fräsmaschine virtuell ab und ermöglicht es, grundlegende Bedienabläufe zu trainieren, bevor sie an der echten Maschine ausgeführt werden. Verschleiß und Schäden durch Fehlbedienung sowie unnötiger Materialverbrauch sollen vermieden, Sicherheitsrisiken reduziert werden. Gleichzeitig macht die virtuelle Umgebung die Schulung unabhängiger von Ort, Maschinenverfügbarkeit und Zeitfenstern und stellt ein attraktives, innovatives Lernmedium dar.

Ressourcenschonung beginnt im Sinne einer Circular Economy nicht erst beim Recycling. Vermiedene Fehlbedienung, weniger Ausschuss, geringere Maschinenschäden und eine bessere Qualifizierung tragen dazu bei, dass Materialien und die Anlagen effizienter genutzt werden. XR kann helfen, zirkuläre Kompetenzen aufzubauen: nicht abstrakt, sondern durch praktisches Erleben.

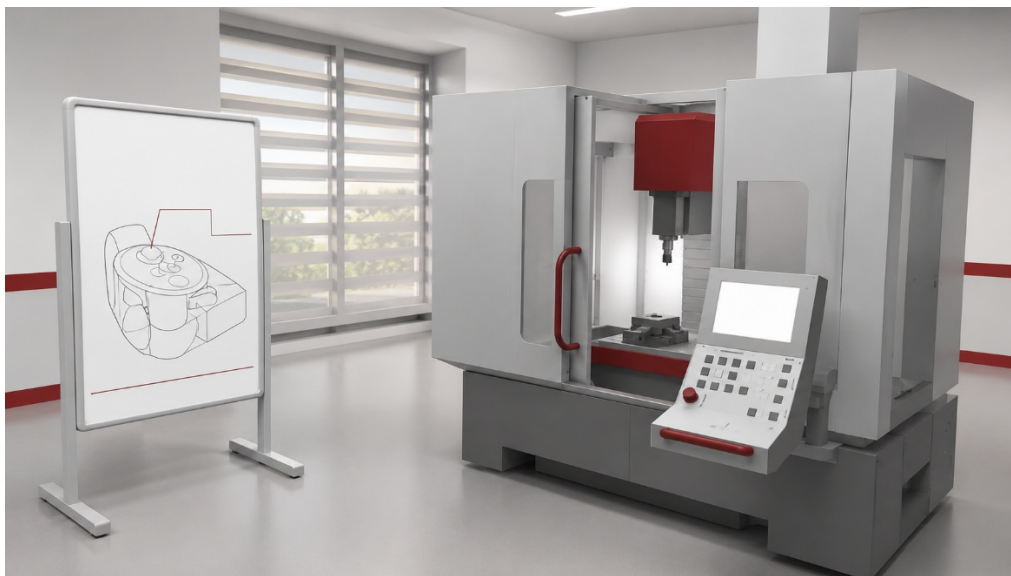


Abbildung 4: Eine virtuelle CNC-Fräsmaschine als Schulungsbeispiel.

4.3. Montage, Nutzung, Betrieb und Prozessverständnis

Auch während der Nutzung von Produkten und Anlagen kann XR unterstützen, komplexe Inhalte wie Energieflüsse, Materialströme digitale Steuerungsdaten oder gebäudespezifische Informationen liegen zwar oft vor, bleiben aber in Tabellen, Dashboards und Systemen verborgen. XR kann solche Informationen in den realen Raum holen. Eine Anlage kann z.B. virtuell erklärt, Prozessschritte hervorgehoben oder Energieflüsse sichtbar gemacht werden. Dadurch kann ein anschauliches Bild davon entstehen, was aktuell passiert und welche Folgen bestimmte Entscheidungen haben.

Ein Beispiel ist die virtuelle Photovoltaikanlage (Arntz et al., 2021) (siehe Abbildung 5). Reale PV-Anlagen sind für die praxisnahe Lehre nur eingeschränkt nutzbar, weil Zugänge begrenzt sind, Wetterbedingungen die erzeugte Leistung beeinflussen und nicht alle Zustände experimentell hergestellt werden können. Die VR-Anwendung bildet deshalb eine reale PV-Anlage virtuell nach, macht Module veränderbar und verbindet technische Zustände mit visueller Rückmeldung. Dadurch können Nutzer:innen Energieflüsse, Verschaltungen und Anlagenverhalten besser nachvollziehen.



Abbildung 5: Eine Repräsentation von PV-Anlagen zur Förderung des Prozessverständnisses.

Für Unternehmen lässt sich dieser Gedanke übertragen: XR kann helfen, Anlagen nicht nur zu betreiben, sondern besser zu verstehen. Wer erkennt, wie Energie, Material, Verschleiß und Bedienentscheidungen zusammenhängen, kann Anlagen effizienter nutzen, Fehler vermeiden und Wartungsbedarfe früher erkennen.

4.4. Wartung, Reparatur und Lebensdauerverlängerung

Ein anderer naheliegender CE-Anwendungsfall ist die Wartung. Produkte und Anlagen werden nur dann länger genutzt, wenn sie instandgehalten, repariert und bei Bedarf modernisiert werden können. In der Praxis scheitert das jedoch häufig an fehlendem Wissen, fehlender Zeit oder fehlender Verfügbarkeit von Expert:innen.

AR und MR können Serviceprozesse direkt am Objekt unterstützen. Mitarbeitende sehen Schritt-für-Schritt-Anleitungen im Sichtfeld, bekommen Hinweise zu Bauteilen oder werden durch eine Fehlersuche geführt. Statt in einem Handbuch nach Informationen zu suchen, erscheinen diese dort, wo sie gebraucht werden: an der Maschine, am Schaltschrank, an der Anlage oder am Bauteil.

Das Projekts DamokleS zeigt z.B., wie solche Unterstützung in industriellen Umgebungen gedacht werden kann (Arntz et al., 2020) (siehe Abbildung 6). Das Projekt entwickelte ein kontextbezogenes System, das relevante Informationen rollen- und situationsabhängig bereitstellt und unter anderem über ein AR-Head-Mounted-Display nutzbar macht. AR dient dabei als Schnittstelle, um digitale Inhalte wie Navigationspfade oder arbeitsbezogene Informationen auch für ungelernte Kräfte direkt im Sichtfeld der Beschäftigten anzuzeigen.

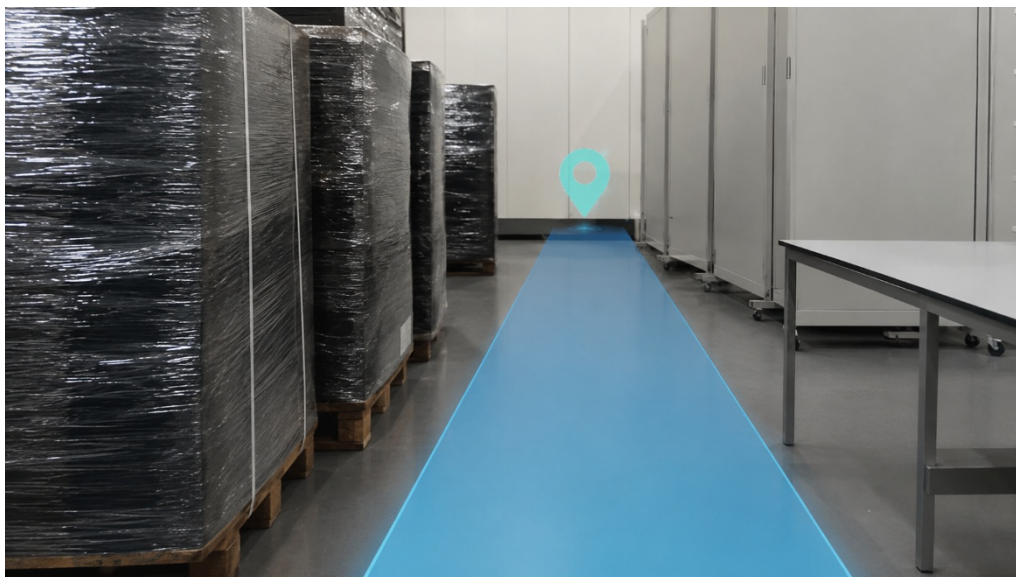


Abbildung 6: Ein AR-System um digitale Inhalte wie Navigationspfade darzustellen.

Der CE-Nutzen liegt hier in der Lebensdauererlängerung. Wenn Wartung einfacher, sicherer und verständlicher wird, können Anlagen länger genutzt und Ausfälle reduziert werden. Gleichzeitig können neue Mitarbeitende schneller eingearbeitet und Expert:innenwissen besser im Unternehmen verteilt werden.

4.5. Zusammenarbeit und Wissenstransfer

Kreislaufwirtschaft ist eine gesellschaftliche und unternehmerische Gemeinschaftsaufgabe. Sie betrifft Entwicklung, Einkauf, Produktion, Vertrieb, Service, Kund:innen, Entsorgungspartner und oft auch die Öffentlichkeit. Gleichzeitig ist Circular Economy eng mit der digitalen Transformation verbunden. Gerade hier entsteht jedoch ein Vermittlungsproblem. Themen wie Circular Economy, Ressourcenschonung, digitale Produktpässe oder Twin Transition sind wichtig, bleiben aber oft abstrakt. Klassische Kommunikationsformate wie Webseiten, Berichte oder Präsentationen stoßen dabei schnell an Grenzen. Sie können Informationen zwar bereitstellen, machen komplexe Zusammenhänge aber nur begrenzt erfahrbar. Für viele Menschen bleibt deshalb unklar, wie ökologische und digitale Maßnahmen konkret zusammenhängen, welchen Nutzen sie haben und wie sie im eigenen Arbeits- oder Unternehmenskontext angewendet werden können.

Virtual Reality kann an dieser Stelle eine besondere Rolle einnehmen (siehe Abbildung 7). Sie visualisiert Informationen nicht nur, sondern macht sie räumlich erfahrbar und interaktiv und damit oft ansprechender zugänglich. Einen solchen immersiven Erlebnisraum nutzt das Projekt Transferhub: Digitalisierung und Circular Economy im Prosperkolleg als innovative Form der Wissenschaftskommunikation: Video- und Informationsbereiche, Twin Transition-Quizzes und Spiele, Hörinseln mit Interviews, interaktive Demonstratoren, ein Roboter-Guide und noch viel mehr. Die Umgebungen wächst mit dem Projekt und macht Ergebnisse der täglichen Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Forschenden, Bürger:innen und Studierenden sichtbar.



Abbildung 7: Eine virtuelle Umgebung als Wissenstransfer für Circular Economy Inhalte.

Damit zeigt der Ansatz, XR zur Wissenschaftskommunikation einzusetzen, wie diese Technologie über reine Visualisierung hinausgehen kann. Der Stand von Forschung und Technik wird erfahrbar, die Exponate laden zum Ausprobieren, Erleben und Experimentieren ein. Gerade für Unternehmen ist dieser Ansatz relevant, weil er zeigt, wie abstrakte Transformationsprozesse in konkrete Lern- und Erfahrungsräume übersetzt werden können. XR wird damit zu einem Werkzeug für Wissenstransfer, Beteiligung und Kommunikation und kann helfen, zirkuläre Wertschöpfung verständlicher, zugänglicher und handlungsnäher zu machen.

5. Fazit: XR als Brückentechnologie für die Kreislaufwirtschaft

Extended Reality kann eine wichtige Brücke schlagen: zwischen abstrakten Nachhaltigkeitszielen und konkretem Handeln im Unternehmensalltag.

Gerade darin liegt ihr besonderer Wert für die Kreislaufwirtschaft. Viele zirkuläre Maßnahmen erfordern ein gutes Verständnis komplexer Zusammenhänge. Produkte sollen langlebiger, besser reparierbar und einfacher demontierbar werden. Anlagen sollen effizienter betrieben und länger genutzt werden. Mitarbeitende sollen in der Lage sein, Maschinen sicher zu bedienen, Fehler zu vermeiden und Wartungsprozesse korrekt durchzuführen. Kund:innen, Partnerunternehmen und weitere Stakeholder müssen verstehen, warum zirkuläre Lösungen sinnvoll sind und welchen Beitrag sie selbst leisten können. XR kann diese Zusammenhänge nicht nur erklären, sondern erfahrbar machen.

Auch für Wissenstransfer und Kommunikation bietet XR großes Potenzial. Der Projektdemonstrator des Transferhub zeigt, dass komplexe Transformationsprozesse nicht nur in Berichten oder Präsentationen vermittelt werden müssen. Sie können als interaktive Erfahrungsräume gestaltet werden, in denen Nutzer:innen Inhalte selbst erkunden, Entscheidungen treffen und Rückmeldungen erhalten. Damit wird Circular Economy nicht nur als Konzept beschrieben, sondern als konkrete, nachvollziehbare und handlungsnähe Aufgabe erlebbar.

Für Unternehmen bedeutet das: Der Einstieg in XR muss nicht mit einer großen technologischen Gesamtstrategie beginnen. Sinnvoller ist oft ein konkreter Anwendungsfall. Wo entstehen häufig Fehler? Wo ist Schulung teuer oder riskant? Wo sind Anlagen schwer verständlich? Wo hängt Wartung von wenigen Expert:innen ab? Wo bleiben Nachhaltigkeitsziele zu abstrakt? Aus solchen Fragen können erste XR-Anwendungen entstehen, die später mit digitalen Zwillingen, Produktdaten, Wartungssystemen oder Nachhaltigkeitskennzahlen verbunden werden.

Dabei sollten Unternehmen XR nicht als Selbstzweck einsetzen. Entscheidend ist nicht, ob eine Anwendung besonders beeindruckend aussieht, sondern ob sie einen realen Nutzen erzeugt: weniger Ausschuss, weniger Stillstand, bessere Qualifizierung, längere Produktnutzung, einfachere Reparatur, verständlichere Kommunikation oder ressourcenschonendere Entscheidungen. Nur wenn XR solche konkreten Verbesserungen unterstützt, leistet sie einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Die Kreislaufwirtschaft braucht technische Innovationen, aber auch Verständnis, Beteiligung und neue Formen der Zusammenarbeit. XR kann genau hier ansetzen. Sie macht zirkuläre Wertschöpfung sichtbar, verständlich und erfahrbar. Damit wird sie zu einer Brückentechnologie zwischen digitaler Transformation und nachhaltigem Wirtschaften.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Technologien Virtual Reality, Augmented Reality und Mixed Reality (v.l.n.r.)	5
Abbildung 2: Verschiedene Einsatzmöglichkeiten von XR	7
Abbildung 3: Ein virtueller sozialer Roboter in einer virtuellen Bibliothek. Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Abbildung 4: Eine virtuelle CNC-Fräsmaschine als Schulungsbeispiel.	9
Abbildung 5: Eine Repräsentation von PV-Anlagen zur Förderung des Prozessverständnisses.	10
Abbildung 6: Ein AR-System um digitale Inhalte wie Navigationspfade darzustellen.	11
Abbildung 7: Eine virtuelle Umgebung als Wissenstransfer für Circular Economy Inhalte.	12

Literaturverzeichnis

Arntz, A., Keßler, D., Borgert, N., Zengeler, N., Jansen, M., Handmann, U., & Eimler, S. C. (2020). Navigating a heavy industry environment using augmented reality: A comparison of two indoor navigation designs. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 3–18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49698-2_1

Arntz, A., Eimler, S. C., & Hoppe, H. U. (2021). A virtual sandbox approach to studying the effect of augmented communication on human-robot collaboration. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, Article 728961. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.728961>

Arntz, A., Keßler, D., Eimler, S. C., Borgert, N., Zengeler, N., Jansen, M., & Handmann, U. (2021). Walking on the bright sight: Evaluating a photovoltaics virtual reality education application. In *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)* (pp. 295–301). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIVR52153.2021.00063>

Bordegoni, M., Carulli, M., Hegazy, A., Maccarrone, P., Rossoni, M., & Aruanno, B. (2026). A multisensory extended reality platform for food spoilage detection. In L. T. De Paolis, P. Arpaia, & M. Sacco (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science: Vol. 15740. Extended reality* (pp. 95–108). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97772-5_7

Caldas, L. R., Silva, M. V., Silva, V. P., Carvalho, M. T. M., & Toledo Filho, R. D. T. (2022). How different tools contribute to climate change mitigation in a circular building environment?—A systematic literature review. *Sustainability*, 14(7), Article 3759. <https://doi.org/10.3390/su14073759>

Chirico, A., Scurati, G. W., Maffi, C., Huang, S., Graziosi, S., Ferrise, F., & Gaggioli, A. (2020). Designing virtual environments for attitudes and behavioral change in plastic consumption: A comparison between concrete and numerical information. *Virtual Reality*. <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00442-w>

Chu, C.-H., & Pan, J.-K. (2023). A systematic review on extended reality applications for sustainable manufacturing across the product lifecycle. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-023-00567-8>

Dossena, G. L., Erle, L., Helgert, A., & Eimler, S. C. (Manuskript in Vorbereitung). Extended reality for circular economy: A systematic literature review.

Europäische Kommission. (2025, 9. Juli). *Erweiterte Realität*. Gestaltung der digitalen Zukunft Europas. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/extended-reality>

Helgert, A., Eimler, S. C., & Gross, T. (2025). A technical user study on an authoring tool for simplifying VR study setups in HRI research. In *2025 20th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)* (pp. 550–558). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HRI61500.2025.10973865>

Hsaio, P.-W., Kong, L.-Q., & Ti, Y. (2025). From awareness to action: Using immersive augmented reality to promote sustainable food practices. *Sustainability*, 17(24), Article 11050. <https://doi.org/10.3390/su172411050>

Karyono, T., Setiawan, T., & Permana, W. J. (2024). Augmented reality (AR) technology to stimulate creativity in a zero-waste lifestyle in converting plastic waste to art products to support sustainable development goals (SDGs). *Journal of Engineering Science and Technology*, 19(4), 1463–1486.

Keßler, D., Arntz, A., Friedhoff, J., & Eimler, S. C. (2020). Mill instructor: Teaching industrial CNC procedures using virtual reality. In *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)* (pp. 231–234). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIVR50618.2020.00048>

Lorenz, M., Okoniewski, M., Own, A., & Knopp, S. (2025). Industrial augmented reality—Concept for an AR-AI-station for component recovery from washing machines for circular economy. In *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 1384–1385). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VRW66409.2025.00338>

Mao, W., Scheffer, S., & Majumdar, A. (2025). Augmented reality for circular maintenance: A smart testbed for sustainable asset lifecycles. In *2025 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* (pp. 429–431). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct68609.2025.00085>

Reisinger, J., Zahlbruckner, M. A., Kán, P., Podkosova, I., Kaufmann, H., & Kovačić, I. (2024). RE:STOCK industry: Digital framework for the circular reuse of existing structures for vertical production. In M. Srećković, M. Kassem, R. Soman, & A. Chassiakos (Eds.), *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction* (Vol. 2024, pp. 220–227). European Council on Computing in Construction. <https://doi.org/10.35490/EC3.2024.322>

Schützenhofer, S., Pibal, S., Wieser, A., Bosco, M., Fellner, M., Petrinis, V., & Kovačić, I. (2024). Digital ecosystem to enable circular buildings: The circular twin framework proposal. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(2). <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0500>

Su, B., Fawad, M., Chen, Q., & Salamak, M. (2025). Mixed reality-based digital twinning of building circularity: A co-design approach for sustainable buildings. In J. Zhang, Q. Chen, G. Lee, V. A. Gonzalez, & V. R. Kamat (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (pp. 1590–1596). International Association for Automation and Robotics in Construction. <https://doi.org/10.22260/ISARC2025/0208>

Vimbai Jumbe, I. (2024, June 26). *How XR can amplify the impact of purpose-driven initiatives*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2024/06/how-xr-can-amplify-the-impact-of-purpose-driven-initiatives/>

Wieser, A., Pibal, S., Schützenhofer, S., Bosco, M., & Kovačić, I. (2024). A digital framework for generating and evaluating digital circular twins. In M. Srećković, M. Kassem, R. Soman, & A. Chassiakos (Eds.), *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction* (Vol. 2024, pp. 974–981). European Council on Computing in Construction. <https://doi.org/10.35490/EC3.2024.318>

Über die Autor:innen

André Helgert

André Helgert studierte Medizinische Informatik an der OTH Regensburg sowie Informatik an der Hochschule Ruhr West (HRW). Seit April 2021 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Informatik der HRW in Bottrop in der Arbeitsgruppe von Prof'in. Dr. Sabrina Eimler im Bereich Human Factors & Gender Studies. In seiner kooperativen Promotion mit der Universität Bamberg beschäftigt er sich mit dem Einsatz von Virtual und Extended Reality in der Mensch-Roboter-Interaktion. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von Ansätzen, die Virtual Reality als Forschungsinstrument vereinfachen und auch nicht-technischen Forschenden zugänglich machen. Darüber hinaus beschäftigt er sich mit XR-Anwendungen, die für Diskriminierung und Diversity sensibilisieren, sowie mit Maßnahmen zur Förderung von Frauen in MINT-Fächern. Weitere Forschungsinteressen umfassen KI-gestützte Lehr- und Lernszenarien, digitale Assistenten sowie Fragestellungen rund um Circular Economy und Twin Transition.

Gian Luca Dossena

Gian Luca Dossena studierte Angewandte Kognitions- und Medienwissenschaften (M.Sc.) an der Universität Duisburg-Essen und arbeitete dort nach dem Studium zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Interactive Systems. Seit Juli 2025 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut Informatik der Hochschule Ruhr West (HRW) in Bottrop in der Arbeitsgruppe Human Factors & Gender Studies von Prof'in. Dr. Sabrina Eimler tätig. Er befasst sich mit dem Einsatz von Extended Reality Technologien in der Mensch-Technik-Interaktion mit einem spezifischen Fokus auf deren Einsatz im Bereich Wissensvermittlung und Wissenschaftskommunikation.

Sabrina C. Eimler

Sabrina Eimler ist seit 2015 Professorin für Human Factors & Gender Studies an der Hochschule Ruhr West in Bottrop. Nach dem Bachelor und Master in Angewandter Kommunikations- und Medienwissenschaft sowie Kulturwirt schloss sie eine Promotion in der Medien- und Sozialpsychologie ab. Ihre Forschung nutzt innovative Methoden und verbindet interdisziplinäres Wissen für einen positiven Einsatz moderner Technologien, das in vielen erfolgreichen Forschungsprojekten verschiedener Mittelgeber zum Einsatz kam. Die Themen sind dabei vielfältig und bewegen sich in den Bereichen XR, KI, Social Robotics, Women in Tech, Twin Transition und Gestaltung innovativer Lehr-/Lernformate unter Berücksichtigung von Vielfalt. Ein enger Austausch mit Wirtschaft und Gesellschaft kennzeichnet die tägliche Arbeit des Teams von Prof.'in Dr. Sabrina Eimler.