

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-03-66  
 Datum der Einreichung: 06.01.2025  
 Datum der Annahme: 23.01.2026  
 Datum der Veröffentlichung: 07.04.2026

Eine Reflexion des aktuellen Stands und der Herausforderungen der deutschen Industrie

# 15 Jahre Industrie 4.0: Zwischen Vision und Realität

N. Fjodorovs, P. Dieterle

**ZUSAMMENFASSUNG** Seit 2011 steht Industrie 4.0 für die Vision einer vollständig vernetzten, intelligenten Produktion. Rund 15 Jahre später zeigt sich jedoch: Die deutsche Industrie ist von dieser Vision noch weit entfernt. Dieser Beitrag beleuchtet den aktuellen Reifegrad deutscher Unternehmen, identifiziert zentrale Herausforderungen und diskutiert mögliche Lösungsansätze.

## STICHWÖRTER

Industrie 4.0, Digitalisierung

**15 years of Industry 4.0: Between vision and reality – A reflection on the current status and challenges facing German industry**

**ABSTRACT** Since 2011, Industry 4.0 stands for the vision of fully networked, intelligent production. However, around 15 years later, it is clear that German industry is still a long way from realizing this vision. This article examines the current maturity level of German companies, identifies key challenges, and discusses approaches for possible solutions.

## 1 Einleitung

Seit der Einführung des Begriffs Industrie 4.0 im Jahr 2011 gilt die Vision der vollständig vernetzten, selbststeuernden Produktion als zentraler Zukunftsentwurf der deutschen Industrie. Intelligente Maschinen, durchgängige Datenflüsse und flexible Wertschöpfungsnetzwerke sollen die Transparenz und Reaktionsfähigkeit erhöhen sowie die Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig steigern. 15 Jahre später stellt sich jedoch die Frage, inwieweit dieses ambitionierte Zielbild tatsächlich in der industriellen Praxis angekommen ist.

Während einzelne Best Practices und ein technologisches Angebot zweifellos existieren, zeigt sich in der breiten industriellen Unternehmenslandschaft ein heterogenes Bild. Viele Unternehmen befinden sich noch immer in frühen Digitalisierungsphasen oder kämpfen mit grundlegenden Voraussetzungen wie integrierten IT-Systemen, klaren Datenstrukturen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Die Diskrepanz zwischen strategischer Vision und operativer Umsetzung wirft zentrale Fragen nach Reifegrad, Hemmnissen und zukünftigen Entwicklungswegen auf.

Dieser Beitrag reflektiert den aktuellen Stand von Industrie 4.0 in Deutschland, analysiert die wesentlichen Herausforderungen der Umsetzung und leitet daraus mögliche Lösungsansätze ab. Zudem wird der Einfluss neuer industrieller und technologischer Trends auf die Weiterentwicklung von Industrie 4.0 eingeordnet, um eine realistische Perspektive zwischen Vision und industrieller Realität aufzuzeigen.

## 2 Übersicht der Industrie 4.0

Der Begriff Industrie 4.0 wurde 2011 geprägt und markiert den Anspruch, eine neue Ära industrieller Wertschöpfung einzuleiten. Die Vision beschreibt eine vollständig digitale Vernetzung von Ressourcen, Produkten, Diensten und Menschen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, um flexibel und schnell auf Veränderungen wie Störungen oder neue Anforderungen reagieren zu können. Grundlage dieser vernetzten und reaktionsfähigen Produktionswelt bilden cyber-physische Systeme (CPS) und digitale Abbilder von Prozessen, Produkten und Maschinen – auch als digitale Zwillinge bekannt. Ergänzt wird dies durch die Fähigkeit, erhobene Daten in Echtzeit auszuwerten, fundierte Entscheidungen zu treffen und Maßnahmen schnell einzuleiten. [1, 2]

Die Auswirkung der Vision von Industrie 4.0 auf die Entscheidungsfindung ist in **Bild 1** dargestellt. Durch die Integration von Systemen und Assets stehen Daten in Echtzeit zur Verfügung, auf deren Basis Entscheidungen schneller getroffen und Maßnahmen eingeleitet werden können. Dadurch steigt die Flexibilität des Produktionssystems. Idealerweise agiert die gesamte Produktion innerhalb definierter und zulässiger Grenzen weitgehend autonom und optimiert sich kontinuierlich selbst. Modularität und Interoperabilität spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie es ermöglichen, IT-Systeme und Assets flexibel zu integrieren, zu erweitern oder auszutauschen.

## 3 Aktueller Stand der Industrie 4.0 in Deutschland

Der aktuelle Stand von Industrie 4.0 in Deutschland wird anhand konkreter Best Practices sowie verschiedener Studien zum Industrie-4.0-Reifegrad eingeordnet. Als methodischer Referenz-

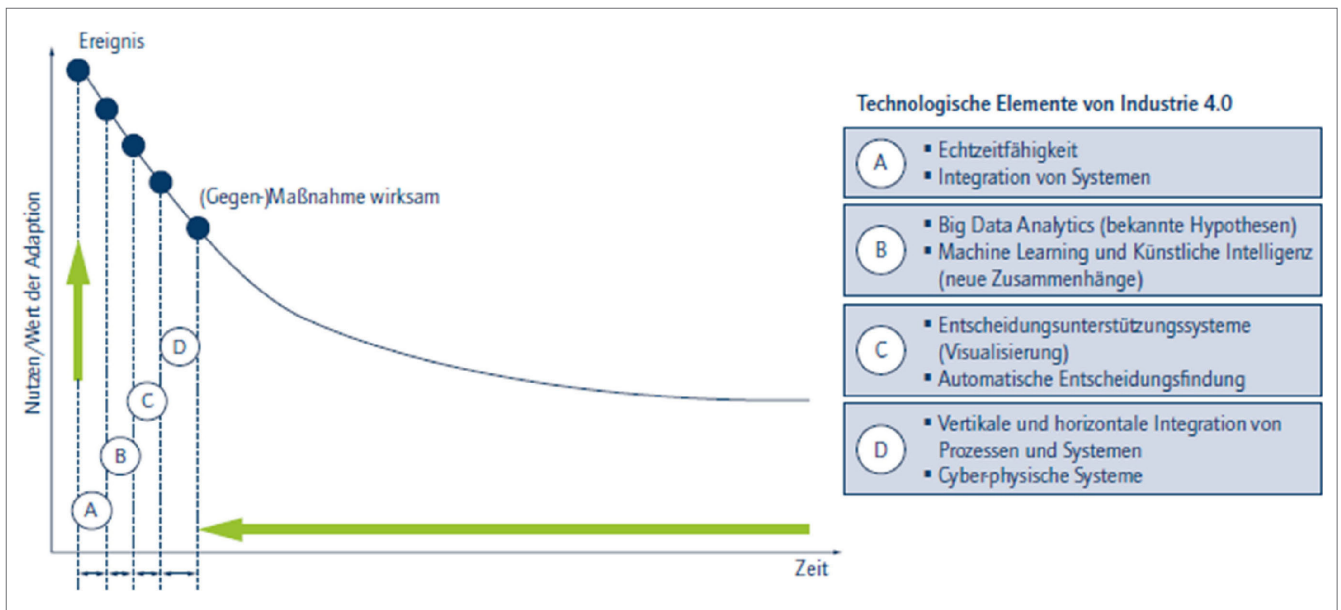


Bild 1 Steigerung des Nutzens durch Industrie 4.0. Grafik: [1]

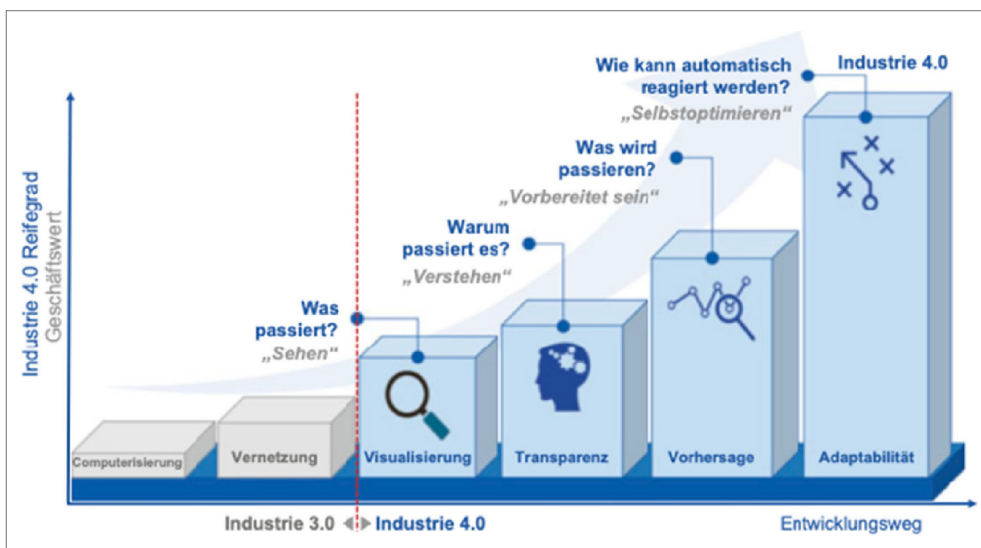


Bild 2 Stufen des Entwicklungspaths von Industrie 4.0. Grafik: [1]

rahmen dient dabei der „Industrie 4.0 Maturity Index“, der eine strukturierte und vergleichbare Bewertung ermöglicht.

### 3.1 Methodische Einordnung der Bewertung

Zur Bewertung des industriellen Fortschritts in Deutschland wird im Folgenden der Industrie 4.0 Maturity Index der Acatech herangezogen. Das Modell ist eine etablierte sowie vielfach angewandte Methodik, um Unternehmen entlang eines klar definierten, sechs-stufigen Entwicklungswegs zu verorten, wie in **Bild 2** dargestellt. [1]

### 3.2 Best Practices

Zwar existieren zahlreiche Preise und Auszeichnungen für Digitalisierungsinitiativen im Umfeld von Industrie 4.0, jedoch fehlen häufig detaillierte Informationen, die die Einordnung in Reifegradstufen erlauben. Zudem gibt es Unternehmen oder einzelne Standorte mit hohem Industrie-4.0-Umsetzungsgrad, deren

Ansätze und Erfolge nicht öffentlich verfügbar sind. Im Folgenden wird daher kein vollständiger Überblick über Best Practices gegeben, sondern exemplarisch auf öffentlich verfügbare und analysierbare Fälle verwiesen.

Die Stufe „Visualisierung“ beschreibt Unternehmen, die über eine durchgängige Transparenz ihrer Entwicklungs-, Produktions- oder Anwendungsprozesse verfügen und aktuelle Ereignisse jederzeit nachvollziehen können [1].

Im Werk Hamburg bei tesa wird die Beschichtungsproduktion digital überwacht, sodass Fehler frühzeitig erkannt werden. Grundlage ist die durchgängige Vernetzung von Maschinensteuerung, Laser und Manufacturing-Execution-System (MES) zur Erhebung von relevanten Daten für schnelle Entscheidungsprozesse [3].

Im Rittal Werk Haiger wird die Produktion vollständig digital gespiegelt: Die gesamte Prozesskette vom Kundenauftrag bis zur Auslieferung ist digital abgebildet, inklusive des Materialflusses über QR-Codes [4].

Auf der Stufe „Transparenz“ werden kausale Zusammenhänge innerhalb der Prozesse sichtbar, etwa durch Korrelationsanalysen oder Clusterverfahren, die Qualitätsabweichungen konkreten Fertigungsparametern zuordnen [1].

Bosch Bamberg nutzt hierfür die Artificial Intelligence Analytics Solution, um Ursachen von Qualitätsproblemen über verschiedene Produktionslinien hinweg zu identifizieren und fehlerhafte Bauteile frühzeitig auszusondern [5].

Eine andere Perspektive bietet Trumpf: Als Maschinenhersteller bildet das Unternehmen seine Anlagen als digitale Zwillinge ab und ermöglicht den eigenen Kunden die Inbetriebnahme der Anlagen und Fertigung in einer Simulationsumgebung. Dadurch lassen sich potenzielle Fehlerquellen bereits vorab identifizieren und in der Realität vermeiden [6, 7].

Die Stufe „Vorhersage“ umfasst die datenbasierte Prognose zukünftiger Ereignisse sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten, beispielsweise zur Vorhersage von Maschinenstillständen auf Basis historischer und aktueller Sensordaten [1].

Durch die Umsetzung der „gläsernen Produktion“ hat Henkel umfassende Transparenz über die eigenen Prozesse geschaffen und kann daraus Vorhersagen zum Prozessverhalten ableiten sowie frühzeitig Optimierungen umsetzen [8].

Bei Continental wird die Ausschusswahrscheinlichkeit eines Reifens während der Produktion berechnet, um Qualitätseinbußen frühzeitig zu erkennen und gegenzusteuern [9].

Die Stufe „Adaptabilität“ stellt den aktuell höchsten Reifegrad dar. Systeme reagieren situationsgerecht oder autonom auf vorhersehbare und unvorhersehbare Ereignisse und treffen automatisierte Entscheidungen in domänenspezifischer Echtzeit [1].

Ein Beispiel ist der Smart Press Shop in Halle (Saale), ein Joint Venture von Porsche und Schuler, das für maximale Adaptivität konzipiert ist. Das Werk ist auf die wirtschaftliche Fertigung kleinster Losgrößen ausgelegt. Mithilfe Künstlicher Intelligenz (KI) wird das eingehende Material (Aluminium oder Stahl) analysiert und bereits im ersten Hub die Pressparameter automatisch an chargenspezifische Materialeigenschaften angepasst, um Fehler wie Rissbildung zu vermeiden. Zudem erkennt die Anlage selbstständig Trends wie Werkzeugverschleiß und plant Wartungsfenster eigenständig in Produktionspausen ein. [10]

### 3.3 Allgemeiner Stand von Industrie 4.0 der deutschen Industrie

Die Bewertung des Digitalisierungsstands der deutschen Industrie ist methodisch anspruchsvoll, da die Unternehmenslandschaft stark fragmentiert ist. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) machen einen großen Anteil der industriellen Wertschöpfung aus, veröffentlichen aber vergleichsweise wenig über ihren Digitalisierungsfortschritt. Für eine flächendeckende und möglichst objektive Einschätzung stützt sich diese Analyse daher auf mehrere Umfragen und Branchenstudien, aus denen sich ein übergeordnetes Bild der zentralen Entwicklungen zum heutigen Zeitpunkt ableiten lässt.

Eine generelle Bewertung anhand von Indizes und Umfragen ist zwar nur eingeschränkt aussagekräftig, erlaubt jedoch Aussagen über übergreifende Trends und Entwicklungen. Das Industrie-4.0-Barometer der MHP Management- und IT-Beratung, das neben Deutschland auch Unternehmen aus den USA, Großbritannien und China berücksichtigt, dokumentiert eine deutliche Steigerung des Reifegrads zwischen 2022 und 2025. Der Index-

wert stieg von 48 auf 64 von 100 Punkten. Im internationalen Vergleich liegt Deutschland jedoch weiterhin hinter den betrachteten Vergleichsländern, insbesondere bei der Supply-Chain-Transparenz, dem Einsatz von Sensorik und dem Aufbau digitaler Zwillinge [11]. Laut einer Studie von BearingPoint liegt der durchschnittliche Implementierungsgrad von Industrie 4.0 bei 5,2 (von 10). Der größte Anteil der befragten Unternehmen (28 %) ordnet sich dabei selbst der Stufe 6 von 10 zu. [12] Eine Studie von Onward Partners zum Industrie-4.0-Reifegrad weltweit tätiger Unternehmen verortet den durchschnittlichen Reifegrad zwischen der Stufe 2 „Konnektivität“ und Stufe 3 „Visualisierung“ bei einem Wert von 2,4. Europa liegt mit 2,34 leicht unter dem Durchschnitt. [13] Dieses Bild wird auch durch die Bitkom-Umfrage gestützt, in der sich viele deutsche Unternehmen selbst eher als Nachzügler einordnen [14].

Auf technologischer Ebene zeigt das Industrie-4.0-Barometer über die analysierten Länder besonders deutliche Fortschritte beim digitalen Zwilling, dessen Indexwert von 35 auf 58 Punkte stieg. Auch bei der Supply-Chain-Transparenz (von 41 auf 62 Punkte) sowie bei den Datenanalysefähigkeiten (von 49 auf 71 Punkte) sind signifikante Entwicklungen zu beobachten [11]. Speziell für Deutschland kann dies auch anhand der Bitkom-Studie bestätigt werden, wo Anwendungen zur Datenbeschaffung zu den drei am häufigsten eingesetzten Industrie-4.0-Anwendungen zählen, darunter digitale Marktplätze, digitale Zwillinge und Internet-of-Things-(IoT)-Plattformen. Zudem halten 63 % der Befragten den digitalen Zwilling für unverzichtbar, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben [14]. Dies entspricht der logischen Entwicklung entlang der Reifegradstufen, da digitale Zwillinge eine durchgängige Datenintegration voraussetzen und typischerweise den Übergang zu höheren Reifegraden jenseits reiner Konnektivität markieren. Gleichzeitig wird die Optimierung in den nachfolgenden Reifegradstufen zunehmend komplexer.

In Bezug auf die Datenauswertung zeigt sich, dass KI branchenübergreifend als eine der zentralen Zukunftstechnologien betrachtet wird – ihre Nutzung nimmt kontinuierlich zu. Bereits 42 % der deutschen Unternehmen setzen KI in der Produktion ein, insbesondere in der Qualitätssicherung, der Mustererkennung und der vorausschauenden Planung [14, 15].

Industrie 4.0 ist in Deutschland weniger ein einheitlicher Zustand als vielmehr ein heterogener Entwicklungsraum mit ausgeprägten Reifegrad-Asymmetrien zwischen den Branchen. Vorreiter sind überwiegend große Unternehmen oder solche, die sich aufgrund externer Rahmenbedingungen wie Regulierung, Wettbewerbsdruck oder steigender Marktanforderungen transformieren müssen. Der Reifegrad korreliert dabei stark mit konkreten Branchenanforderungen – etwa Rückverfolgbarkeit in der Pharma- und Automobilindustrie oder Automatisierung in der Serienfertigung.

## 4 Ableitung und Diskussion der Herausforderungen

Der aktuelle Stand zeigt, dass deutsche Unternehmen noch weit von der ursprünglichen Vision der Industrie 4.0 entfernt sind. Die identifizierten Hemmnisse lassen sich in drei zentrale Kategorien unterteilen: technische, organisatorische (darunter auch menschliche und kulturelle) sowie wirtschaftliche Herausforderungen. Obwohl in Umfragen auch Erwartungen an die Politik formuliert werden und externe Faktoren wie geopolitische

und regulatorische Rahmenbedingungen die Unternehmen beeinflussen, liegt der Fokus dieses Beitrags bewusst auf den Herausforderungen, die die Unternehmen selbst direkt beeinflussen können.

#### 4.1 Technische Herausforderungen

Die technische Komplexität der Umsetzung der Industrie-4.0-Vision ist in der Realität sehr hoch [11, 12, 16]. Die Vernetzung sämtlicher Akteure innerhalb eines Ökosystems, selbst innerhalb der Grenzen eines einzelnen Unternehmens, stellt eine anspruchsvolle Konzeptions- und Umsetzungsaufgabe dar. Dabei geht es nicht nur um die technische Anbindung der Akteure an eine Middleware oder einen Data Lake, sondern um die durchgängige Definition notwendiger Datenstrukturen und -objekte über mehrere IT-Systeme und Akteure hinweg.

Dies verdeutlicht folgendes Beispiel aus der Praxis: Das 3D-Modell eines Produkts aus dem Computer-Aided-Design-(CAD)-System muss als Stückliste für Planung und Einkauf im Enterprise-Resource-Planning-(ERP)-System bereitgestellt werden. Die Maße und Oberflächenparameter des 3D-Modells müssen für die Prüfplanung im Computer-Aided-Quality-(CAQ)-System überführt werden. Anschließend muss das 3D-Modell in ein Computer-Aided-Manufacturing-(CAM)-System übertragen werden, um daraus das Numerical-Control-(NC)-Programm samt Bearbeitungsreihenfolge und Bearbeitungszeiten zu generieren. Diese Informationen fließen auch in den Arbeitsplan im ERP-System ein. Schließlich muss das NC-Programm zum richtigen Zeitpunkt in der Produktion von einem MES auf die Maschine zur Bearbeitung überspielt werden.

Hinzu kommen häufig unterschätzte und weniger sichtbare Themen des Datenmanagements, etwa die Festlegung von Übertragungs- und Aktualisierungsfrequenzen, der Umgang mit mehreren Datenversionen und -geltungszeiträumen sowie die Sicherstellung korrekter Datengrundlagen für Auswertungen. Dazu gehört beispielsweise der saubere Abgleich von Plan- und Ist-Daten unter Berücksichtigung historischer Versionen von Arbeitsplänen und Vorgabezeiten. Insgesamt handelt es sich um eine große Menge an Stamm- und Bewegungsdaten, die sinnvoll miteinander verknüpft werden müssen, um richtige Aktivitäten auszulösen und belastbare Erkenntnisse zu liefern.

Diese Herausforderung wird zusätzlich durch operative Probleme erschwert, die im industriellen Alltag unvermeidbar sind, wie beispielsweise Systemausfälle, Übertragungsfehler, mangelnde Datenqualität und menschliche Fehler. Darüber hinaus führen Abkündigungen bestehender IT-Systeme oder die Einführung neuer Technologien zu einem kontinuierlichen technischen Wandel der IT-Architektur in der Produktion.

Die Brownfield-Realität und eine nach wie vor begrenzte Interoperabilität prägen die deutsche Produktionslandschaft. Heterogene Maschinenparks aus unterschiedlichen Generationen und von verschiedenen Herstellern lassen sich nur mit hohem Aufwand in eine einheitliche Datenarchitektur integrieren. Trotz etablierter Standards wie OPC UA oder der Verwaltungsschale (Asset Administration Shell) müssen Schnittstellen in der Praxis häufig projektbezogen definiert und entwickelt werden. [17]

Auch die Integration übergeordneter IT-Systeme wie ERP, MES oder CAQ (wie oben an dem Beispiel mit dem 3D-Modell dargestellt) sowie die Extraktion der in der gesamten IT-Landschaft verteilten Daten stellen erhebliche Herausforderungen dar.

Ein Beispiel ist die Zusammenführung nachhaltigkeitsbezogener Daten, bei der Informationen aus unterschiedlichen IT-Systemen häufig manuell konsolidiert werden müssen. So liegen Energieverbrauchsdaten etwa in MES oder Energiemanagementsystemen, Materialzusammensetzungen und Rohstoffmengen im ERP- oder CAD-System, CO<sub>2</sub>-Emissionswerte, sofern sie überhaupt erfasst werden, in spezialisierten IT-Systemen und Informationen zur Recyclingfähigkeit in Product-Lifecycle-Management-(PLM)-Systemen. Nicht selten sind solche und weitere relevante Daten in Excel-Dateien dokumentiert. Entsprechend handelt es sich um komplexe Vorhaben, die die Definition geeigneter Datenmodelle, eine systematische Datensuche sowie den Aufbau belastbarer Datenintegrationslösungen beziehungsweise Data Pipelines erfordern. [18, 19] Die für den digitalen Produktpass (Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts) notwendigen Daten sind grundsätzlich auch vorhanden, müssen jedoch aus unterschiedlichen IT-Systemen und Datenbanken konsistent zusammengeführt werden. Dazu gehören etwa Materialnachweise und Stücklisten aus dem ERP-System, technische Spezifikationen und Konstruktionsdaten aus dem PLM-System, Prüfprotokolle und Qualitätszertifikate aus dem CAQ-System sowie Wartungshistorien und Reparaturdaten aus Service-Management-Systemen. [20]

Unzureichende Datenqualität und mangelnde Datenkonsistenz verhindern zudem die effektive Nutzung vorhandener Daten [21]. Anstelle einer vollautomatisierten und echtzeitfähigen Datenerhebung werden viele Daten noch manuell erfasst (zum Beispiel durch Betriebsdatenerfassungsterminals (BDE-Terminals) oder gar am Ende einer Schicht im Büro), was Fehler und Ungenauigkeiten begünstigt. Statt eines integrierten Datenökosystems landen Informationen häufig in isolierten Silos, die durch Grenzen von IT-Systemen, Abteilungsstrukturen oder einzelne Anwendungsfälle geprägt sind. [15] Die nachträgliche Harmonisierung und Integration solcher Daten erfordert große, interdisziplinäre Projekte. Darüber hinaus sind bei vielen Unternehmen Stammdaten nicht mehr realitätsnah und für automatisierte Planung, Analyse oder Entscheidungsunterstützung nur eingeschränkt geeignet.

Schließlich fehlen in vielen Unternehmen grundlegende, übergeordnete Konzepte, etwa für eine zukunftsfähige IT-Architektur und IT-Infrastruktur. Statt flexibel und anpassungsfähig ausgelegt zu sein, sind diese häufig auf den aktuellen Zustand zugeschnitten oder historisch gewachsen und erschweren damit die konsequente Umsetzung von Industrie-4.0-Initiativen. [22–24]

#### 4.2 Organisatorische, kulturelle und menschenbezogene Herausforderungen

Viele Unternehmen sind noch in einem „traditionellen Prozessdenken“ verhaftet und versuchen, bestehende, oft historisch gewachsene Prozesse lediglich zu digitalisieren, anstatt sie grundlegend zu hinterfragen. Die neuen Technologien und Ansätze von Industrie 4.0 ermöglichen jedoch nicht nur die Beschleunigung bestehender Prozesse, sondern fördern neue Arbeitsweisen und Prozesse sowie eröffnen vollständig neue Geschäftsmodelle und Umsetzungskonzepte.

Trotz hoher Zustimmungswerte in Umfragen zögern viele Unternehmen bei der konkreten Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten. Häufig besteht die Wahrnehmung, dass diese Ansätze für das eigene Unternehmen zu groß, zu abstrakt oder zu

akademisch seien und daher keinen unmittelbaren Nutzen bieten – etwa weil das Unternehmen zu klein, zu spezialisiert oder aktuell nicht von den adressierten Herausforderungen betroffen ist. Daraus entsteht eine Diskrepanz zwischen Bekenntnis und Handeln: Während Unternehmen in Befragungen die strategische Bedeutung von Industrie 4.0 grundsätzlich anerkennen, mangelt es in der Praxis an Mut, klaren Prioritäten oder erforderlichen Ressourcen, um die Transformation konsequent voranzutreiben.

Eine zusätzliche Hürde stellt die mangelnde Akzeptanz digitaler Technologien und neuer Prozesse bei Mitarbeitenden dar, die Transformationsprojekte spürbar verlangsamt. Diese Herausforderung ist vielschichtig. Einerseits entstehen Ängste und Vorbehalte, etwa die Sorge vor Arbeitsplatzverlust oder ein generelles Misstrauen gegenüber neuen Technologien. Andererseits muss auch die technologische Reife der eingesetzten Systeme weiter steigen, da Systemausfälle, Performanceprobleme, fehlerhafte Auswertungen oder zusätzlicher administrativer Aufwand die tägliche Arbeit erschweren und Ablehnung fördern; insbesondere dann, wenn Digitalisierungsmaßnahmen als zusätzliche Belastung ohne erkennbaren Nutzen wahrgenommen werden. [25]

Unabhängig davon, ob man Best Practices, Studien und Umfragen oder Beratungserfahrungen betrachtet, handelt es sich bei Industrie-4.0-Initiativen nahezu immer um komplexe Projekte. Die Vielzahl an beteiligten Akteuren führt häufig zu Ineffizienzen, erhöhtem Koordinationsaufwand und unscharfen Zieldefinitionen. Unklare Strategien, fehlende Transparenz über bestehende Lösungen und Möglichkeiten sowie ein unzureichend definierter Projektumfang erschweren den Erfolg zusätzlich.

Ein weiterer struktureller Aspekt liegt im Charakter von Industrie 4.0 selbst. Im Gegensatz zu früheren industriellen Revolutionen fehlt ein klarer, singulärer technologischer Auslöser, der einen unmittelbaren Handlungsdruck erzeugt. Während frühere Umbrüche maßgeblich durch einzelne Schlüsseltechnologien geprägt waren, wurde Industrie 4.0 nicht retrospektiv identifiziert, sondern frühzeitig als strategisches Zukunftskonzept formuliert [26]. Der Begriff wurde als Sammelbezeichnung für die Weiterentwicklung und Kombination bestehender und kommender Technologien geprägt. Dies ist grundsätzlich legitim, da Industrie 4.0 auch als strategische Leitvision für die Zukunft verstanden werden kann. Für Unternehmen bedeutet dies jedoch, dass nicht der kurzfristige Einsatz einzelner Technologien im Vordergrund stehen sollte, sondern die schrittweise und konsequente Umsetzung der zugrunde liegenden Vision entlang der eigenen Wertschöpfung.

### 4.3 Wirtschaftliche Herausforderungen

Für viele Unternehmen, insbesondere Hidden Champions und Weltmarktführer, bestand in den ersten Jahren kein unmittelbarer finanzieller Druck zu einer grundlegenden Transformation. Hohe Produktqualität und exzellenter Service sorgten dafür, dass bestehende Geschäftsmodelle und Prozesse weiterhin erfolgreich waren. Entstehende Probleme wurden daher häufig durch zusätzlichen Personaleinsatz oder größere Einzelprojekte kompensiert, anstatt eine grundlegende Neuausrichtung für die Zukunft vorzunehmen. Inzwischen geben zwar viele Unternehmen an, einen steigenden wirtschaftlichen Druck zu verspüren, doch ist es schwierig, in finanziellem Druck die notwendigen Veränderungen zu treiben und umzusetzen. Zudem erfordert die notwendige

Transformation einen langen Zeitraum, um positive Effekte zu spüren.

Hohe Implementierungskosten stellen insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen eine erhebliche Barriere dar. Im Industrie-4.0-Barometer nennen 63 % der Unternehmen fehlende finanzielle Mittel und Zeit als größte Hürden für die Umsetzung von Industrie-4.0-Initiativen [12], in einer Umfrage von Deutscher Industrie und Handelskammer zählen Investitionen mit 43 % zu den Top-3-Herausforderungen [16]. Die Modernisierung veralteter Anlagen oder die Investition in neue, intelligente Produktionslinien erfordert erhebliche finanzielle Ressourcen. Hinzu kommen Kosten für Schulungen, Qualifizierungsmaßnahmen und die Umschulung der Belegschaft im Umgang mit neuen Systemen.

Ein weiterer zentraler Hemmfaktor ist der häufig unklare Return on Investment. Während sich kleinere, klar abgegrenzte Anwendungsfälle wirtschaftlich bewerten lassen, handelt es sich bei der Transformation im Sinne von Industrie 4.0 um ein strategisches Vorhaben mit langfristigem Horizont. Die ambitionierten Versprechen von Industrie 4.0 lassen sich nur schwer unmittelbar quantifizieren, während die erforderlichen Investitionen in Hardware, IT-Systeme, Beratung, Schulungen und Prozessgestaltung bereits in frühen Projektphasen sehr hoch sind. [11]

## 5 Formulierung der Lösungsansätze

Es gibt bereits Belege und Praxisbeispiele dafür, dass Industrie 4.0 umsetzbar ist und reale Mehrwerte liefern kann. Die folgenden Handlungsempfehlungen sollen Unternehmen dabei unterstützen, sich schrittweise in Richtung der Industrie-4.0-Vision zu entwickeln. Unabhängig von einzelnen Maßnahmenkategorien sollte die Umsetzung dabei konsequent an vier übergeordneten Leitlinien ausgerichtet werden.

Erstens benötigen Unternehmen einen klaren übergeordneten Plan, der definiert, inwieweit die Industrie-4.0-Vision realisiert und welche konkreten Herausforderungen (beziehungsweise Business Needs) dabei adressiert werden sollen. Dazu gehört etwa die Frage, welchen Stellenwert Flexibilität in der Produktion hat, mit welchen Kunden und Lieferanten eine tiefe Integration erforderlich ist und welche Anforderungen der Markt tatsächlich stellt. Auf dieser Basis lassen sich die notwendigen Industrie-4.0-Initiativen ableiten, sowohl mit Blick auf IT-Architektur und IT-Infrastruktur als auch auf Maschinenparks, eingesetzte Fertigungs- und IT-Technologien. Daraus wiederum werden konkrete Anwendungsfälle definiert, priorisiert und in einer konsistenten Roadmap verankert.

Zweitens soll zügig in die Umsetzung gegangen werden, statt in endlosen Planungsschleifen und der Suche nach perfekten Konzepten zu verharren. Dabei ist ein iteratives Vorgehen sinnvoll, das Lernen durch praktische Erfahrung ermöglicht – insbesondere bei der hohen Komplexität des Themenfeldes. Konkrete Projekte schaffen sichtbare Erfolge und liefern wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung. Die Projekte sollen jedoch stets auf ein gemeinsames Gesamtziel ausgerichtet sein und in die bestehende Unternehmensarchitektur integriert werden. So lassen sich abgegrenzte Fortschritte erzielen, ohne die strategische Orientierung aus dem Blick zu verlieren und ohne eine Vielzahl unzusammenhängender Insellösungen zu schaffen.

Drittens ist ein Austausch mit anderen Unternehmen in vergleichbaren Situationen hilfreich. Der Blick über den eigenen Tellerrand erlaubt realistische Einordnungen, den Zugang zu

erprobten Lösungsansätzen und das Lernen aus Erfolgen wie auch Fehlern anderer. Netzwerke, Partnerschaften und Brancheninitiativen können so die Umsetzung von Industrie 4.0 deutlich beschleunigen.

Viertens ist Industrie 4.0 als kontinuierlicher Transformationsprozess zu verstehen und nicht als Zustand mit einem klaren Endpunkt. Die Vision ist ambitioniert, ihre vollständige Umsetzung entsprechend anspruchsvoll und mit erheblichen Investitionen verbunden. Die Vision von Industrie 4.0 bietet einen langfristigen Orientierungsrahmen, an dem Unternehmen ihre technologische, organisatorische und kulturelle Weiterentwicklung ausrichten können.

### 5.1 Technische Lösungsansätze

Grundsätzlich sollen Unternehmen eine konsistente IT-Architektur und eine dazugehörige IT-Systemlandschaft konzipieren, die sowohl zentrale Systeme als auch kleinere Insellösungen sowie deren Datenflüsse berücksichtigt. Dabei ist klar festzulegen, welche IT-Systeme eng zusammenarbeiten müssen und welche IT-Systeme und Akteure bewusst entkoppelt werden können, etwa zeitlich oder durch separate Daten- und Transformationsschichten. So hat beispielsweise die Bernard Krone Holding eine eventbasierte IT-Architektur umgesetzt, um Abhängigkeiten zwischen IT-Systemen zu reduzieren, Integration neuer IT-Systeme und Anwendungsfälle zu vereinfachen sowie die Kontrolle über eigene Daten zu behalten. [27]

Die beherrschbare Umsetzung der technischen Komplexität setzt voraus, dass zunächst die Komplexität von Prozessen, Organisationsstrukturen und Produkten reduziert wird. In der Praxis werden relevante Objekte häufig in mehreren Systemen parallel gepflegt, wobei Logiken aus anderen Systemen dupliziert werden. Dem sollte ein ganzheitliches, systemübergreifendes Verständnis zentraler Business-Objekte wie Ressourcen, Fertigungsaufträge oder Produkte entgegenstehen. Dieses Verständnis muss konzeptionell erarbeitet und bei der weiteren Detaillierung, etwa bei der Schnittstellendefinition oder der Konfiguration eines IT-Systems, konsequent umgesetzt werden.

Die Brownfield-Realität wird nicht kurzfristig verschwinden und soll daher explizit Bestandteil der Planung sein. Dazu gehört die Bewertung der Restlaufzeiten bestehender IT-Systeme und Anlagen sowie die Entscheidung, wann und wo ein Übergang sinnvoll ist. Nicht zwingend müssen alle IT-Systeme und Assets gleichzeitig angebunden werden; häufig ist es zielführender, ausgewählte Bereiche zu fokussieren und andere im Zuge geplanter Erneuerungen zu integrieren. KUKA zeigt mit seiner Zerspanungsanwendung im Brownfield, dass Industrie 4.0 sogar mit teils 30 Jahre alten Bestandsmaschinen umsetzbar ist, auch wenn dies Herausforderungen mit sich bringt. [28]

Das Datenmanagement soll keine einmalige oder isolierte Aufgabe sein. Eine grundlegende initiale Konzeption ist notwendig, auch wenn sie sich selten vollständig vorab umsetzen lässt und im Projektalltag oft nachrangig priorisiert wird. Umso wichtiger ist es, dass die Datenflüsse frühzeitig etabliert werden, Fehler transparent sichtbar gemacht und kontinuierlich adressiert werden. An diesen Stellen muss aktiv nachgesteuert und schrittweise optimiert werden, um langfristig belastbare Daten als Grundlage für Industrie-4.0-Anwendungen sicherzustellen.

### 5.2 Organisatorische und kulturelle Lösungsansätze

Die Umsetzung von Industrie-4.0-Initiativen ist vor allem aus organisatorischer und kultureller Perspektive eine komplexe Aufgabe. Sie erfordert mehr als einmalige Investitionen in Technik oder externe Konzepte: Kultur ist tief verankert und muss langfristig neu gedacht und gelebt werden. Führungskräfte spielen dabei eine entscheidende Rolle, indem sie durch eigenes Handeln, Prioritäten und konsequente Vorbilder die Veränderung vorantreiben. Zentral ist, dass Industrie-4.0-Projekte keinen Selbstzweck darstellen, sondern die Arbeit der Mitarbeitenden tatsächlich erleichtern und wirtschaftlichen Mehrwert schaffen sollen.

Eine klare Vision und die zentrale Bereitstellung geeigneter Werkzeuge und Vorgaben sind essenziell. Dazu zählen übergeordnete Governance-Strukturen, Frameworks sowie passende Softwarelösungen, zum Beispiel zur Prozessmodellierung. Abteilungen und Teams sollten selbst definieren, welche Ziele aus der Strategie abgeleitet werden und in welchem Rahmen Lösungen erarbeitet werden können. So lässt sich dezentral und autonom an Teilergebnissen arbeiten, die am Ende zusammengeführt werden und funktionieren. Ohne klare Vorgaben besteht die Gefahr, dass die Heterogenität der Initiativen schwer kontrollierbar wird.

Rollen und Verantwortlichkeiten müssen klar zugeordnet werden, beispielsweise durch dedizierte Prozessverantwortliche, die die organisatorische Durchgängigkeit der Prozesse sicherstellen. Im Rahmen von Prozess-Redesigns sollte nicht nur analysiert werden, welche Anforderungen erfüllt werden müssen, sondern auch, wie Prozesse effizienter gestaltet werden können. Lean-Ansätze in der Produktion sind längst Realität, die Lean-Produktion allein reicht jedoch nicht aus; übergeordnete Prozesse in der Auftragsabwicklung müssen ebenfalls verschlankt und mit den IT- und Architekturmodellen verknüpft werden.

### 5.3 Wirtschaftliche Lösungsansätze

Unternehmen können die Umsetzung von Industrie-4.0-Initiativen wirtschaftlich unterstützen, indem sie aktiv an Forschungsprojekten teilnehmen. Dies umfasst sowohl größere Vorhaben, etwa gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), als auch kleinere, speziell auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zugeschnittene Programme wie jene der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), die oftmals kostenfreie Teilnahme ermöglichen.

Darüber hinaus empfiehlt sich die Zusammenarbeit mit Universitäten, Forschungseinrichtungen und Wissensnetzwerken, etwa im Rahmen von „Mittelstand-Digital“, an Hochschul-Campussen oder in Demofabriken. Solche Kooperationen bieten Zugang zu aktuellem Wissen, Technologien und Best Practices.

Eine weitere Möglichkeit ist die Beteiligung an Arbeitskreisen, beispielsweise auf der Plattform Industrie 4.0 [29]. Dort können Unternehmen aktiv an der Entwicklung praxisnaher Standards mitwirken und Erfahrungen aus der eigenen Umsetzung einbringen.

Schließlich sollten Unternehmen Förderprogramme gezielt nutzen, um Investitionen in Hardware, Produktentwicklung oder Produktionsdigitalisierung zu realisieren. Solche Förderungen können die finanziellen Hürden reduzieren und die Umsetzung von Industrie-4.0-Lösungen beschleunigen.

## 6 Einfluss von neuen Trends auf Industrie 4.0

Aktuell kommen weitere technologische und strukturelle Trends hinzu, die Industrie 4.0 entweder in ihrer Umsetzung unterstützen oder einen höheren Reifegrad industrieller Digitalisierung voraussetzen. Im Folgenden wird analysiert, welche Entwicklungen als Befähiger der Transformation wirken und welche als Treiber zusätzliche Anforderungen an Unternehmen stellen.

### 6.1 Befähiger der Transformation – was hilft bei der Umsetzung von Industrie 4.0?

Künstliche Intelligenz, insbesondere Large Language Models (LLM) und KI-Agenten, eröffnet neue Möglichkeiten für Industrie-4.0-Anwendungen. Diese Systeme können unstrukturierte Daten und menschliche Sprache verstehen und Entscheidungen in Workflows übernehmen. Neben der technologischen Leistungsfähigkeit sorgt der kommerzielle Erfolg von LLMs für eine hohe Akzeptanz und ein gutes Verständnis bei Mitarbeitenden. Dennoch handelt es sich nicht um eine universelle Lösung: Der Einsatz von LLMs im Kontext von Industrie 4.0 muss sorgfältig geplant werden. Dabei sollten Unternehmen insbesondere die Integration neuer Innovationen berücksichtigen, etwa Conversational Interfaces zu MES oder ERP-Systemen oder die Automatisierung komplexerer Prozesse mithilfe intelligenter Agenten. [30]

Edge AI bietet die Möglichkeit, Daten nicht nur am Entstehungsort vorzuverarbeiten, sondern auch direkt tiefgehender zu analysieren. Dies reduziert die Datenkomplexität, ermöglicht Echtzeitanalysen und erlaubt, Rohdaten unmittelbar zur Gewinnung von Erkenntnissen zu nutzen. [31]

Auch Robotik und humanoide Roboter profitieren von technologischen Fortschritten: Sie werden leistungsfähiger, kostengünstiger und flexibler einsetzbar. Beispiele reichen von Greifern für Verpackungsmaschinen über Automatisierungen in der Produktsortierung, autonome mobile Roboter (AMR) für die Logistik bis hin zu Cobots, die direkt mit Mitarbeitenden zusammenarbeiten. [32] Weltweit treiben Entwicklungen im Bereich humanoider Roboter die industrielle Automatisierung voran; so unterstützen erste Roboter Menschen direkt in der Produktion [33].

Digitale Zwillinge und industrielle Metaverse-Anwendungen erweitern die Möglichkeiten für virtuelles Prototyping, verbesserte Zusammenarbeit sowie Trainings- und Simulationsszenarien. Industrielle Metaverse-Umgebungen bilden die reale Welt nahezu originalgetreu ab und ermöglichen in Kombination mit KI, dass Teams in Echtzeit gemeinsam an der Lösung realer Herausforderungen arbeiten [34, 35].

### 6.2 Treiber der Transformation – was erfordert einen hohen Reifegrad von Industrie 4.0?

Menschenzentriertheit und neue Arbeitsbedingungen entwickeln sich zu zentralen Treibern der industriellen Transformation. Diese stärkere Fokussierung wird insbesondere im darauffolgenden Konzept der Industrie 5.0 deutlich, das den technologiegetriebenen Ansatz der Industrie 4.0 erweitert und den Menschen stärker in den Mittelpunkt rückt. Industrie 5.0 verschiebt den Fokus hin zu Menschenzentriertheit, Nachhaltigkeit und Resilienz und adressiert damit nicht nur globale Herausforderungen wie Klimawandel und Ressourcenknappheit, sondern

stärkt zugleich die Wettbewerbsfähigkeit durch nachhaltige und menschenorientierte Produktionsansätze. In diesem Kontext gewinnen die aktive Einbindung von Mitarbeitenden in digitalisierte Produktionsprozesse sowie die Gestaltung attraktiver Arbeitsplätze für ein sich wandelndes Arbeitskräfteangebot zunehmend an Bedeutung. [36, 37].

Anhaltende Individualisierung und Mass Customization deuten darauf hin, dass Industrie 4.0 in der nächsten Phase die Massenproduktion hochgradig individualisierter Produkte ermöglicht. Dies wird vor allem durch intelligente Produktionsplanung und KI-gestützte Ressourcenoptimierung getrieben. Unternehmen müssen ihre Produktionsprozesse anpassen, um der gestiegenen Komplexität gerecht zu werden [38].

Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft werden zu strategischen Imperativen. Forderungen nach CO<sub>2</sub>-Neutralität, Kreislaufwirtschaft und materialeffizienter Produktion erfordern eine grundlegende Umgestaltung der Produktionsprozesse, um Energie und Material effizient zu nutzen und Abfälle zu minimieren [39].

Resilienz und Krisenfestigkeit werden aufgrund globaler Lieferkettenstörungen, wie während der COVID-19-Pandemie, sowie geopolitischer Spannungen immer wichtiger. Dezentralisierte und regionalisierte Produktionsstrukturen werden zunehmend notwendig, um Risiken zu minimieren [40, 41].

Reshoring, also die Rückverlagerung von Produktionskapazitäten in die Region, gewinnt vor dem Hintergrund internationaler Lieferkettenrisiken und geopolitischer Unsicherheiten zunehmend an Bedeutung. Damit eine Produktion in Deutschland oder im näheren Ausland trotz hoher Personalkosten wirtschaftlich bleibt, müssen Produktions- und Auftragsabwicklungsprozesse deutlich effizienter gestaltet werden, ohne dabei Flexibilität, Individualisierbarkeit und Nachhaltigkeit einzuschränken. [42, 43]

## 7 Fazit und Ausblick

Die deutsche Industrie liegt 15 Jahre nach Initiierung von Industrie 4.0 noch deutlich hinter der Vision zurück. Zwar existieren zahlreiche technologische Lösungen und einige Best Practices, doch befinden sich viele Unternehmen weiterhin in frühen Reifegradstufen. Häufig fehlen grundlegende Voraussetzungen wie durchgängige IT-Architekturen, integrierte IT-Systeme und konsistente Daten.

Die größten Hemmnisse liegen in der ganzheitlichen Umsetzung: Technische Komplexität, gewachsene Brownfield-Strukturen und wirtschaftliche Unsicherheiten erschweren die Transformation. Investitionen werden zurückgestellt, solange bestehende Arbeitsweisen funktionieren – obwohl steigender Wettbewerbsdruck sowie Anforderungen an Resilienz und Nachhaltigkeit eine Neuausrichtung zunehmend erforderlich machen.

Industrie 4.0 erfordert eine klare Vision und ein konsistentes, langfristiges Projektprogramm. Der nachhaltige Erfolg liegt in der Fähigkeit der Unternehmen, ihre Prozesse, Organisation und IT-Landschaft ganzheitlich weiterzuentwickeln.

Weiterhin stellt sich die Frage, welche Perspektive bereits erfolgreiche Unternehmen verfolgen sollen: Ob die bestehende Vision weiter optimiert wird, eine neue, weiterführende Vision entwickelt werden muss oder ob Industrie 4.0 künftig primär als notwendige Voraussetzung für andere Themen wie die Kreislaufwirtschaft dient?


## LITERATUR

- [1] Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R. et al.: Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. Stand: 2020. Internet: [www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-in-dex-update-2020/download-pdf?lang=de](http://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-in-dex-update-2020/download-pdf?lang=de). Zugriff am 18.02.2026
- [2] Obermaier, R.: Industrie 4.0 und Digitale Transformation als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. In: Obermaier, R. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Wiesbaden: Springer Gabler 2019, S. 3–46
- [3] Redaktion FI: Industrie 4.0 bei tesa: Der intelligente Ballen. Internet: [factory-innovation.de/artikel/industrie-4-0-bei-tesa/](http://factory-innovation.de/artikel/industrie-4-0-bei-tesa/). Zugriff am 18.02.2026
- [4] Hilbrand, C.: Ein Werk der Spitzenklasse: Das Rittal Werk Haiger ist die „Fabrik des Jahres 2025“. Internet: [www.rittal.com/de-de/Unternehmen/Presse/Pressemeldungen/FabrikdesJahres2025](http://www.rittal.com/de-de/Unternehmen/Presse/Pressemeldungen/FabrikdesJahres2025). Zugriff am 18.02.2026
- [5] Bosch: Gestatten, AI Analytics Plattform – Im Auftrag der Null-Fehler-Produktion. Internet: [www.bosch.com/de/stories/ki-in-der-produktion/](http://www.bosch.com/de/stories/ki-in-der-produktion/). Zugriff am 18.02.2026
- [6] Poll, D.: Digitaler Zwilling in der Anwendung bei Daimler Buses. Internet: [www.produktion.de/technik/digitaler-zwilling-in-der-anwendung-bei-daimler-buses/1698853](http://www.produktion.de/technik/digitaler-zwilling-in-der-anwendung-bei-daimler-buses/1698853). Zugriff am 18.02.2026
- [7] Daum, C.: Simulationssoftware für leichte Logistik. Internet: [www.trumpf.com/de\\_DE/newsroom/stories/simulationssoftware-fuer-leichte-logistik/](http://www.trumpf.com/de_DE/newsroom/stories/simulationssoftware-fuer-leichte-logistik/). Zugriff am 18.02.2026
- [8] Henkel: Wie Daten, künstliche Intelligenz und die richtige Einstellung zu Veränderung Industrie 4.0 Wirklichkeit werden lassen. Internet: [www.henkel.de/spotlight/2023-07-11-wie-daten-kuenstliche-intelligenz-und-die-richtige-einstellung-zu-veraenderung-industrie-4-0-wirklichkeit-werden-lassen-1869978](http://www.henkel.de/spotlight/2023-07-11-wie-daten-kuenstliche-intelligenz-und-die-richtige-einstellung-zu-veraenderung-industrie-4-0-wirklichkeit-werden-lassen-1869978). Zugriff am 18.02.2026
- [9] Dolic, D.; Koll, D.: Continental Tire. Scrap prediction in the tires manufacturing process using Machine Learning. Stand: 2022. Internet: [barc.com/de/continental-tire/](http://barc.com/de/continental-tire/). Zugriff am 18.02.2026
- [10] Frisch, J.: SAP: Künstliche Intelligenz optimiert die Fertigung. Internet: [news.it-matchmaker.com/sap-kuenstliche-intelligenz-optimiert-die-fertigung/](http://news.it-matchmaker.com/sap-kuenstliche-intelligenz-optimiert-die-fertigung/). Zugriff am 18.02.2026
- [11] Unger, C.; Delalic, E.; Herf, M. et al.: Industrie 4.0 Barometer 2025 – Data-Driven Production. Studie. Stand: 2025. Internet: [www.mhp.com/de/insights/was-wir-denken/industrie-40-barometer-2025-data-driven-production](http://www.mhp.com/de/insights/was-wir-denken/industrie-40-barometer-2025-data-driven-production). Zugriff am 18.02.2026
- [12] Dankmeier, K.; Mater, S.; Müller, S.: Industrie 4.0: Die unvollendete Revolution. Studie. Stand: 2024. Internet: [www.bearingpoint.com/de-de/publikationen-and-events/publikationen/industrie-40-die-unvollendete-revolution/?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=21008394904](http://www.bearingpoint.com/de-de/publikationen-and-events/publikationen/industrie-40-die-unvollendete-revolution/?gad_source=1&gad_campaignid=21008394904). Zugriff am 18.02.2026
- [13] Schmitz, S.; Witowski, J.; Kaufmann, J.: Benchmark on Industry 4.0. Discover the hidden challenges of slow-movers and strategies of front-runners. Stand: 2024. Internet: [www.onwardpartners.co/insights/whitepaper-benchmark-on-industry-40](http://www.onwardpartners.co/insights/whitepaper-benchmark-on-industry-40). Zugriff am 18.02.2026
- [14] Bitkom: Industrie 4.0: Bitkom-Studie 2025. Stand: 2025, <https://doi.org/10.64022/2025-industrie-4-0>
- [15] Calle, C. F.; Heimann, T.: Studie IT Trends 2024 – Das Business fordert mehr Flexibilität. Stand: 2024. Internet: [www.capgemini.com/de-de/wp-content/uploads/sites/8/2024/02/Studie-IT-Trends-2024\\_15.02.2024\\_final.pdf](http://www.capgemini.com/de-de/wp-content/uploads/sites/8/2024/02/Studie-IT-Trends-2024_15.02.2024_final.pdf). Zugriff am 18.02.2026
- [16] Deutsche Industrie- und Handelskammer: Digitalisierung in Deutschland: Zwischen Effizienz und Bürokratie. Die DIHK-Digitalisierungsumfrage 2025. Stand: 2025. Internet: [www.dihk.de/resource/blob/129666/ec88b4d0dbaa6b5c91b86be4c0b7643e/dihk-digitalisierungsumfrage-2025-data.pdf](http://www.dihk.de/resource/blob/129666/ec88b4d0dbaa6b5c91b86be4c0b7643e/dihk-digitalisierungsumfrage-2025-data.pdf). Zugriff am 18.02.2026
- [17] Reich, J.; Ludwig, G.; Ludwig, C. et al.: Die digitale Integration von Brownfield-Anlagen. Stand: 2022. Internet: [www.bitkom.org/sites/main/files/2022-09/2209\\_Bitkom\\_Leitfaden\\_Brownfield.pdf](http://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-09/2209_Bitkom_Leitfaden_Brownfield.pdf). Zugriff am 18.02.2026
- [18] Perau, M.; Berwing, K.: Sustainable ERP. CO2-Management als neues Modul im ERP-System? ERP-Matchmaker.guide ERP-Lösungen 2024 (2023) 4, S. 10–14
- [19] Perau, M.; Simons, J.: Bausteine des zukünftigen Produktionsmanagements. UdZ – The Data-driven Enterprise 3 (2023) 1, S. 40–44
- [20] Perau, M.; Laubach, N.; Schröer, T. et al.: Information-based Integration of Life Cycle Assessment into IT Landscapes of Manufacturing Companies. IFAC-PapersOnLine 58 (2024) 19, pp. 1204–1209
- [21] Stich, V.; Schacht, M.; Schröer, T. et al.: Aufbau, Nutzung und Monetarisierung einer industriellen Datenbasis. Stand: 2022. Internet: [www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Datenbasis.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Datenbasis.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Zugriff am 18.02.2026
- [22] Brecher, C.; Padberg, M.; Jarke, M. et al.: The Internet of Production: Interdisciplinary Visions and Concepts for the Production of Tomorrow. In: Brecher, C.; Schuh, G.; van der Aalst, W. et al. (Edit.): Internet of Production. Fundamentals, Methods and Applications. Cham: Springer International Publishing 2024, pp. 3–16
- [23] Kremer, S.: Der Game-Changer für die Produktion der Zukunft. Eventgetriebene Architektur im Unternehmen. UdZ – The Data-driven Enterprise 2 (2022) 2, S. 15
- [24] Toro Santamaria, R.; Ferreira, P. M.: Operating System for Cyber-Physical Manufacturing (OSCM): A Flexible Event-Driven Shopfloor Information Platform for Advanced Manufacturing. Proceedings of the ASME 2022 17th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Volume 2: Manufacturing Processes; Manufacturing Systems. West Lafayette, Indiana, USA, 2022, <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85576>
- [25] Lensing, K.: KI-basierte Assistenzsysteme für die Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T.; Vogel-Heuser, B.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0: Band 1: Produktion. Heidelberg: Springer 2023, S. 209–237
- [26] Gstrein, W.: Drei-Punkte-Plan für die Prozessautomatisierung. Stand: 2020. Internet: [www.industr.com/de/drei-punkte-plan-fuer-die-prozess-automatisierung-2480084](http://www.industr.com/de/drei-punkte-plan-fuer-die-prozess-automatisierung-2480084). Zugriff am 18.02.2026
- [27] Factory Innovation: Best-of FI Award 2024: Bernard Krone Holding SE & Co. KG. Stand: 2024. Internet: <https://factory-innovation.de/artikel/bernard-krone-holding-se-co-kg/>. Zugriff am 18.02.2026
- [28] Wandschneider, P.: Die smarte Robot Factory im Brownfield. Ein Anwendungsbeispiel der Open Industry 4.0 Alliance. Internet: [factory-innovation.de/artikel/die-smarte-robot-factory-im-brownfield/](http://factory-innovation.de/artikel/die-smarte-robot-factory-im-brownfield/). Zugriff am 18.02.2026
- [29] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Auf dem Weg zu industriellen Datenökosystemen: Skalieren. Gemeinsam. International. Fortschrittsbericht 2024. Plattform Industrie 4.0, Stand: 2025. Internet: [www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2024-fortschrittsbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2024-fortschrittsbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Zugriff am 18.02.2026
- [30] Fjodorovs, N.; Gütermann, A.: Studie zum Einsatz von LLMs im Produktionsumfeld. wt Werkstattstechnik online 115 (2025) 09, S. 645–652. Düsseldorf: VDI Fachmedien, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-09>
- [31] Singh, R.; Gill, S. S.: Edge AI: A survey. Internet of Things and Cyber-Physical Systems 3 (2023), pp. 71–92
- [32] Pietrantonio, L.; Favilla, M.; Fraboni, F. et al.: Integrating collaborative robots in manufacturing, logistics, and agriculture: Expert perspectives on technical, safety, and human factors. Frontiers in Robotics and AI 11 (2024), #1342130
- [33] BMW Group: Humanoide Roboter für das BMW Group Werk Spartanburg. Stand: 2024. Internet: [www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2024/humanoide-roboter.html](http://www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2024/humanoide-roboter.html). Zugriff am 18.02.2026
- [34] Lyu, Z.; Fridenalk, M.: Digital twins for building industrial metaverse. Journal of advanced research 66 (2024), pp. 31–38
- [35] Fernández-Caramés, T. M.; Fraga-Lamas, P.: Forging the Industrial Metaverse for Industry 5.0: Where Extended Reality, IIoT, Opportunistic Edge Computing, and Digital Twins Meet. IEEE Access 12 (2024), pp. 95778–95819
- [36] European Commission: Industry 5.0. What this approach is focused on, how it will be achieved and how it is already being implemented. Internet: [research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en](http://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en). Zugriff am 18.02.2026
- [37] Harbeke, E.; Künlén, L.: Industrie 5.0 – Neue Effizienzen und strategische Chancen. Stand: 2024. Internet: [www.rothschildandco.com/de/newsroom/insights/2024/10/industrie5.0/](http://www.rothschildandco.com/de/newsroom/insights/2024/10/industrie5.0/). Zugriff am 18.02.2026
- [38] Roland Berger: Next Generation Manufacturing. Internet: [www.rolandberger.com/de/Insights/Global-Topics/Next-Gen-Manufacturing/Publications/](http://www.rolandberger.com/de/Insights/Global-Topics/Next-Gen-Manufacturing/Publications/). Zugriff am 18.02.2026
- [39] Bitkom: Vier Punkte für eine erfolgreiche NKWS. Bitkom Positionspapier zur Erarbeitung einer Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie. Stand: 2024. Internet: [www.bitkom.org/sites/main/files/2023-09/bitkom-positionspapier-vier-punkte-fuer-eine-erfolgreiche-nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie.pdf](http://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-09/bitkom-positionspapier-vier-punkte-fuer-eine-erfolgreiche-nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie.pdf). Zugriff am 18.02.2026
- [40] Spiß, M.: Systematische Konfiguration der Resilienz in der Beschaffung. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2023
- [41] Stich, V.; Schröer, T.; Linnartz, M. et al.: Wertschöpfungsnetzwerke in Zeiten von Infektionskrisen. Stand: 2021. Internet: [www.acatech.de/publikation/wertschoepfungsnetzwerke-in-zeiten-von-infektionskrisen-expertise/](http://www.acatech.de/publikation/wertschoepfungsnetzwerke-in-zeiten-von-infektionskrisen-expertise/). Zugriff am 18.02.2026
- [42] Poll, D.: Reshoring von Produktion nach Deutschland: Das sagt der VDMA. Stand: 2022. Internet: [www.produktion.de/technik/reshoring-von-produktion-nach-deutschland-das-sagt-der-udma/1762777](http://www.produktion.de/technik/reshoring-von-produktion-nach-deutschland-das-sagt-der-udma/1762777). Zugriff am 18.02.2026
- [43] Michalski, T.; Sohlbach, S.; Baroutas, G.: Reshoring und De-Globalisierung: Relevanz der strategischen Entscheidung für das Business Development deutscher Unternehmen. Working Paper Nr. 36 (2025), <https://doi.org/10.48718/wf6-ga57%0A>


---

**Nikita Fjodorovs, M.Sc.** 

*nikita.fjodorovs@fir.rwth-aachen.de*

FIR e. V. an der RWTH Aachen   
Campus-Boulevard 55, 52074 Aachen  
[www.fir.rwth-aachen.de](http://www.fir.rwth-aachen.de)

**Paula Dieterle, B.Eng.** 

Hochschule Düsseldorf   
Münsterstr. 156, 40476 Düsseldorf  
[www.hs-duesseldorf.de](http://www.hs-duesseldorf.de)

LIZENZ



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