

Vom Automatisieren zum Agieren

Mit Agentic AI zur Software Defined Industry

Inhalt

Executive Summary	4
1 Ausgangslage: Warum jetzt ein neues Produktionsparadigma entsteht	6
1.1 Von Industrie 4.0 zur Software Defined Industry: Evolution der Automatisierung	6
1.2 Wachsender Handlungsdruck: Fachkräftemangel, Fragmentierung und neue Wettbewerber	8
2 Leitthesen: Drei Perspektiven auf die Produktion der Zukunft	10
2.1 Industrie: Wettbewerbsfähigkeit und Fachkräftesicherung durch KI-gestützte Produktion	10
2.2 Gesellschaft: KI stärkt menschliche Fähigkeiten und demokratisiert Wissen	12
2.3 Politik: Souveränität durch offene Standards, Pragmatismus und wettbewerbsfähige Rahmenbedingungen	12
3 Software Defined Industry: Leitbild für die Produktion der Zukunft	14
3.1 Integration und Governance: Herausforderungen von SDI und KI-Agenten	15
3.2 Potenziale für den Standort: Produktivität, Resilienz und Souveränität	17
4 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Umsetzung	19
4.1 Technische Basis: Interoperabilität, Datenräume und strategische Governance	19
4.2 Sozioökonomische Faktoren: Investitionen, Qualifizierung und Akzeptanz	20
4.3 Regulatorischer Rahmen: Standardisierung, unternehmerische Freiheit und Energiepolitik	21
5 Referenzszenarien: Wo KI-Agenten heute schon Mehrwert versprechen	23
6 Handlungsempfehlungen: Was jetzt zu tun ist	24
6.1 Für die Industrie	24
6.2 Für die Gesellschaft	24
6.3 Für die Politik	24
7 Fazit: Der entscheidende Moment für den Schritt zur Software Defined Industry	26
Autoren und Mitwirkende	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Der Paradigmenwechsel der industriellen Produktion	5
Abbildung 2 Die Entwicklungsstufen der industriellen Produktion hin zu Software Defined Industry	8
Abbildung 3 Wachsender Handlungsdruck der Industrie: Wettbewerbsfähigkeit und Fachkräftesicherung durch softwaredefinierte, KI-gestützte Produktionssysteme	9
Abbildung 4 Die drei Perspektiven auf die Produktion der Zukunft	10
Abbildung 5 Referenzarchitektur verschiedener Agententypen, AAS und Skills	15
Abbildung 6 Gemeinsam durch Industrie, Politik und Gesellschaft hin zu Produktivität, Resilienz und Souveränität	19
Abbildung 7 Handlungsempfehlungen	25

Executive Summary

Aufbruch in eine neue industrielle Ära: Wie Software Defined Industry und Agentic AI die Produktion verändern

Die industrielle Produktion steht vor einer Zäsur: Mit der Software Defined Industry (SDI) und dem Einsatz agentenbasierter KI (Agentic AI) entsteht ein neues Produktionsparadigma, das die Potenziale der Industrie 4.0 zu voller Entfaltung bringen kann. Die Fähigkeit, Produktionsprozesse softwareseitig flexibel zu steuern, eröffnet Chancen für gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Nachhaltigkeit, ist aber auch mit erheblichen technologischen, organisatorischen und regulatorischen Herausforderungen verbunden.

Das Konzept der Industrie 4.0 hat in den letzten zehn Jahren wichtige Grundlagen geschaffen: Modularisierung, Flexibilisierung, Datenintegration und Standards wie die Asset Administration Shell (AAS). Dennoch konnten nicht alle Ziele erreicht werden, was insbesondere auf hohe Umrüstkosten, geringe Selbst-Adaptivität und Wandlungsfähigkeit sowie komplexe Engineering-Prozesse zurückzuführen ist. Während der verschärfte Fachkräftemangel, ein volatiles Marktumfeld und geopolitische Fragmentierung den Handlungsdruck erhöhen, besteht im Zusammenspiel mit der technologischen Reife (Edge- & Cloud-Computing, Large Language Models (LLMs)/ Small Language Models (SLMs), offene Standards) und erfolgreichen Pilotprojekten ein vielversprechendes Zeitfenster, um SDI und agentenbasierte KI in die breite industrielle Anwendung zu überführen.

Leitthesen

Drei Leitthesen bilden die Basis dieses White Papers und adressieren dabei jeweils eine spezifische Zielgruppe:

- **Industrie:** Produktivität und Fachkräftesicherung sind nur durch softwaredefinierte, KI-gestützte Produktionssysteme erreichbar.
- **Gesellschaft:** Wohlstand und Beschäftigung entstehen durch die Symbiose von Mensch und Maschine – KI stärkt menschliche Fähigkeiten, statt sie zu ersetzen.
- **Politik:** Technologische Souveränität erfordert offene Standards, pragmatische Regulierung und wettbewerbsfähige Energie- und Infrastrukturkosten.

Chancen und Herausforderungen

SDI und agentenbasierte KI bergen erhebliche und notwendige Potenziale für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie.

- Produktivität & Flexibilität: Digitale Zwillinge und skill-basierte Produktionsmodelle reduzieren Engineering-Aufwände um bis zu 70 Prozent, Rüstzeiten sinken von Tagen auf Stunden.
- Neue Geschäftsmodelle: Production-as-a-Service und datengetriebene Zusatzdienste erweitern industrielle Wertschöpfung.
- Resilienz & Standortstärkung: Agentensysteme optimieren Lieferketten, ermöglichen Reshoring von Produktion und sichern industrielle Wertschöpfung in Hochlohnländern.
- Gesellschaftlicher Mehrwert: KI-Assistenzsysteme verkürzen Einarbeitungszeiten, senken Fehlerquoten und machen komplexe Technologien für breitere Belegschaften nutzbar.

Dem gegenüber stehen allerdings nicht zu vernachlässigende Herausforderungen wie Know-how Defizite, Integration in bestehende IT/OT, Unsicherheit bezüglich Technologieentscheidungen und regulatorische Ungenauigkeiten. Diese stehen einer breiten Adaption von software-basierter Produktion und dem Einsatz von KI-Agenten bislang noch im Weg und können nur durch Verzahnung von Industrie, Politik und Gesellschaft beseitigt werden.

Darum werden in diesem White Paper drei wesentliche Handlungsfelder definiert und erörtert:

- **Industrie:** Interoperabilität sichern, hybride Systeme pilotieren, Roadmaps für SDI-Transformation entwickeln, datenbasierte Geschäftsmodelle erschließen.
- **Gesellschaft:** Qualifizierung ausbauen, Vertrauen in KI stärken, sozialverträgliche Transformation gestalten.
- **Politik:** Standards vorantreiben, Doppelregulierung vermeiden, Energiekosten senken, Modellregionen fördern.

SDI und agentenbasierte KI sind keine theoretischen Visionen, sondern eine strategische Notwendigkeit. Wer jetzt handelt, schafft Produktivität, Resilienz und technologische Souveränität. Entscheidend ist, dass Industrie, Politik und Gesellschaft koordiniert vorgehen – nur so kann Deutschland seine Rolle als führender Industriestandort behaupten und zugleich Maßstäbe für eine nachhaltige, innovationsgetriebene Produktion der Zukunft setzen.

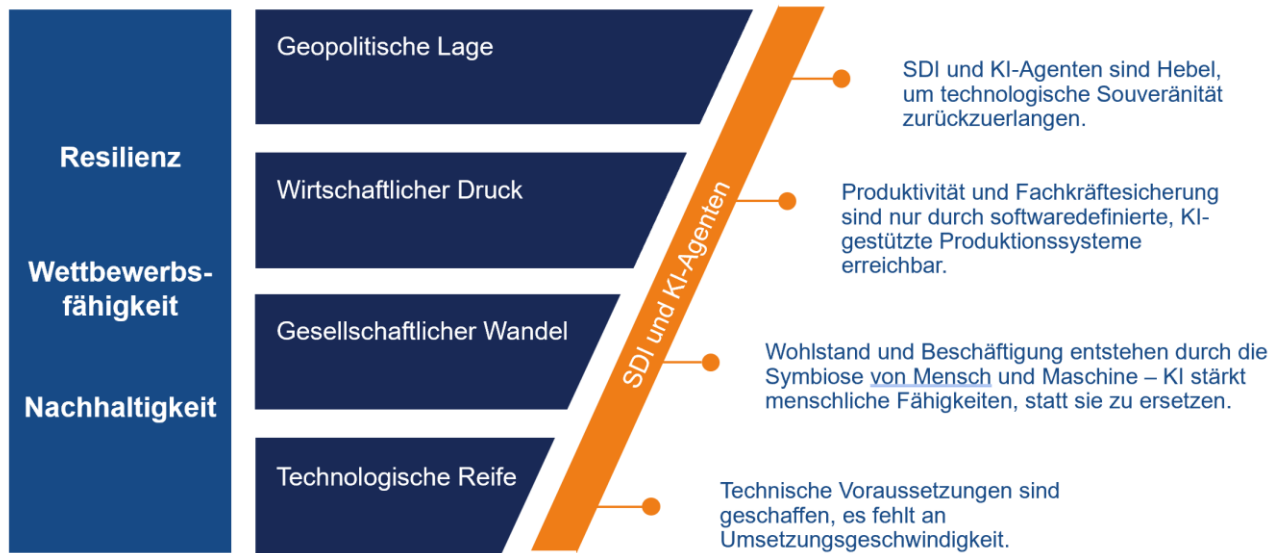


Abbildung 1 Der Paradigmenwechsel der industriellen Produktion

1 Ausgangslage: Warum jetzt ein neues Produktionsparadigma entsteht

Die industrielle Produktion steht an einem historischen Wendepunkt. Über Jahrzehnte war der Fortschritt in der Fertigung vor allem von mechanischen Innovationen, der Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik sowie der schrittweisen Optimierung etablierter Prozesse geprägt. Mit dem Einzug der vierten industriellen Revolution – *Industrie 4.0* – verlagerten sich die Innovationsschwerpunkte: Vernetzung, durchgängige Datenintegration und intelligente Steuerungssysteme rückten ins Zentrum. Die physische Maschine bleibt zwar unverzichtbar, doch ihr volles Potenzial entfaltet sich zunehmend durch die Software, die sie steuert, vernetzt und in cyber-physische Systeme einbindet.

Diese Transformation markiert den Übergang von einer rein technisch geprägten zu einer datengetriebenen und adaptiven Industrie, in der Produktionsanlagen nicht nur automatisiert arbeiten, sondern situationsabhängig lernen, vorhersagen und optimieren können. Technologien wie Künstliche Intelligenz, Edge- und Cloud-Computing, Digital Twins sowie durchgängige Kommunikationsstandards bilden dabei den Kern zukünftiger Wertschöpfung.

Gleichzeitig verändert sich die globale Rahmenlage tiefgreifend:

- Verkürzte Produktlebenszyklen erfordern schnell anpassbare Produktionsprozesse.
- Volatile Märkte und geopolitische Verschiebungen erhöhen die Notwendigkeit resilienter Liefer- und Wertschöpfungsketten.
- Rasanter Innovationsdruck verlangt nach beschleunigten Entwicklungs- und Markteinführungszyklen.

In diesem Umfeld entscheidet die Fähigkeit zur agilen und skalierbaren Produktion über die Wettbewerbsfähigkeit, sowohl für einzelne Unternehmen als auch für ganze Industrien.

Ziel dieses White Papers ist es, die nächste Entwicklungsstufe der industriellen Produktion technologisch, wirtschaftlich und politisch einzuordnen. Es richtet sich an Automatisierer, Maschinen- und Anlagenbauer, Endanwender, Systemintegratoren sowie an politische Entscheidungsträger. Dabei werden konkrete Handlungsfelder aufgezeigt, die notwendig sind, um die *Produktion der Zukunft* erfolgreich zu gestalten: innovativ, nachhaltig und international wettbewerbsfähig.

1.1 Von Industrie 4.0 zur Software Defined Industry: Evolution der Automatisierung

Die vergangenen zehn Jahre standen im Zeichen der konsequenten Umsetzung der **Industrie 4.0-Prinzipien**. Ziel war es, Produktionssysteme flexibler und reaktionsfähiger zu gestalten, um auf dynamische Marktanforderungen schneller reagieren zu können. Besonders prägend waren zwei Entwicklungen: **Modularisierung** und **Flexibilisierung**. Maschinen und Anlagen wurden modular aufgebaut, sodass einzelne Komponenten leichter ausgetauscht, erweitert oder modernisiert werden konnten. Zentrale Standards wie die AAS und OPC UA haben dabei den Grundstein für herstellerübergreifende Kommunikation und Datenintegration gelegt. Diese Standards ermöglichen es, Maschinen, Sensoren und Softwareplattformen zu einem durchgängigen digitalen Ökosystem zu verbinden, was eine Voraussetzung für datengetriebene und selbstoptimierende Produktionsprozesse darstellt.

Doch die ambitionierten Ziele von Industrie 4.0 konnten nicht vollständig erreicht werden. Trotz aller Fortschritte zeigten sich Grenzen:

- Komplexe Steuerungsanpassungen waren oft nur mit hohem Engineering-Aufwand möglich.
- Produktionslogiken ließen sich nicht ohne Weiteres grundlegend verändern.
- Umrüst- und Ausfallzeiten blieben ein erheblicher Kosten- und Effizienzfaktor.

Damit wurde deutlich: Die erste Dekade von Industrie 4.0 hat zwar den technologischen Unterbau geschaffen, doch die volle Dynamik und Selbst-Adaptivität der Produktion sind noch nicht erreicht. Der nächste Schritt muss daher darin bestehen, die Trennung zwischen physischer und digitaler Welt weiter aufzulösen,

um einen Wandel aktueller Produktions- und Wertschöpfungssysteme herbeizuführen. Bestehende Geschäftsmodelle werden zunehmend ergänzt werden durch datenbasierte, digitale und plattformorientierte beziehungsweise souveräne Dienste. Produktionssysteme und Lieferketten müssen flexibler und kurzfristiger agieren können, um den Anforderungen an individuelle Produkte, variable Volumina und dynamische Skalierbarkeit zu entsprechen. Die AAS ermöglicht die digitale Abbildung von Produktionsprozessen und entkoppelt diese von der rein physischen Welt. Herausforderungen wie mangelnde Transparenz, Manipulationssicherheit und Verlässlichkeit können heute zunehmend durch moderne Technologien, erweiterte Rechen- und Speicherkapazitäten sowie verbesserte Konnektivität adressiert werden.

Gleichzeitig offenbart sich: Die Orchestrierung komplexer, dynamischer Systeme, die Anforderungen an Lebenszyklus, Resilienz und nachhaltiges Wirtschaften sowie die Interaktionsfähigkeit entlang globaler Lieferketten lassen sich mit klassischen Engineering- und Produktionssystemen nur unzureichend abbilden. Die industrielle Produktion muss sich weiterentwickeln – hin zu einer **Software Defined Industry (SDI)**. Anders als die enger gefassten Begriffe Software Defined Manufacturing (SDM), Software Defined Production oder Software Defined Factory zielt SDI auf die gesamte Industrie und ihre Wertschöpfungsketten ab. Hardwaregebundene Produktionslogiken werden durch softwarebasierte Steuerungen, modulare Schnittstellen und KI-orchestrierte Prozesse ersetzt. Damit entsteht ein neues Paradigma, das die Brücke schlägt von Industrie 4.0 zu einer flexiblen, softwaregesteuerten und KI-gestützten Wertschöpfung. Parallel dazu setzt sich das Konzept der **agentenbasierten KI (Agentic AI)** durch: autonome Software-Agenten, die auf Basis standardisierter Datenmodelle Entscheidungen treffen, mit anderen Agenten interagieren und in Echtzeit Prozesse koordinieren. In Verbindung mit digitalen Zwillingen ermöglicht dies eine durchgängige Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus von Produkten, Produktionssystemen und Lieferketten hinweg. Dabei sind Software-Agenten an sich noch nichts Neues. Seit den 1990er Jahren werden sie als ein alternativer Lösungsansatz für die Steuerung von Prozessen angesehen. Russel und Norvig (2010)¹ definieren Agenten in ihrem KI-Standardwerk übersetzt als „alles, was seine Umgebung durch Sensoren wahrnimmt und durch Aktoren auf diese Umgebung einwirkt“ und präsentieren detaillierte Beschreibungen verschiedener Varianten und ihrer Bestandteile. Eine Referenzarchitektur zur Strukturierung der inneren Funktionsweise von autonomen Systemen wie Software-Agenten wurde von Prof. Wolfgang Wahlster (2017), dem langjährigen Leiter des DFKI, vorgestellt.² In Anlehnung an diese Referenzarchitektur können Software-Agenten aus Mechanismen für Selbstregulation, Wahrnehmung, Lernen, Optimierung, Koordination, Akteur- und Sensorintegration, Wissensrepräsentation, Kommunikation mit anderen Software-Agenten und verschiedenen Interaktionen mit Menschen bestehen. Sobald nur einer dieser Mechanismen durch ein LLM unterstützt wird, wird aus dem klassischen Software-Agenten ein **KI-Agent (AI-Agent)**. In der Produktion sind das vor allem KI-Agenten, die einzelne Produkte, Anlagen, Fertigungsinseln oder AGVs repräsentieren. Aktuell werden LLMs für die Kommunikations- und Koordinationsmechanismen zwischen den Agenten, für die Akteur- und Sensorintegration in den Agenten sowie für die Interaktion der Agenten mit Menschen eingesetzt. Die daraus sichtbar werdenden Potenziale stellen bestehende Konzepte auf den Prüfstand. Zukünftig braucht es stärker systemische und fraktal interagierende Produktionssysteme, die vom Engineering bis hin zum Betrieb nicht nur lokal, sondern auch über System- und Unternehmensgrenzen hinweg zielorientiert und vernetzt agieren.

¹ Russell, S., Norvig, P. (2010). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall.

² <https://link.springer.com/article/10.1007/s00287-017-1049-y>



Abbildung 2 Die Entwicklungsstufen der industriellen Produktion hin zu Software Defined Industry

1.2 Wachsender Handlungsdruck: Fachkräftemangel, Fragmentierung und neue Wettbewerber

Die Umsetzung von Software Defined Industry und agentenbasierten Architekturen ist längst keine Zukunftsvision mehr, sondern technisch realisierbar. Mehrere Entwicklungen schaffen derzeit ein einmaliges Zeitfenster, um diese Konzepte aus der Forschung in die breite industrielle Anwendung zu bringen.

Technologisch sind die Voraussetzungen so günstig wie nie zuvor. Fortschritte im Cloud- und Edge-Computing ermöglichen es, große Datenmengen dort zu verarbeiten, wo sie entstehen, also beispielsweise in der Fertigungslinie oder im global verteilten Produktionsnetz. Leistungsfähige KI-Modelle, von umfangreichen Large Language Models bis hin zu spezialisierten Small Language Models, eröffnen neue Möglichkeiten für autonome Entscheidungsfindung, Prozessoptimierung und intelligente Koordination. Offene Kommunikationsprotokolle wie das Model Context Protocol (MCP) oder das Agent2Agent Protokoll (A2A) setzen die Basis für die Interaktion von KI-Agenten mit anderen Anwendungen sowie untereinander. Zusätzlich sorgen offene Standards, wie die Verwaltungsschale (AAS, Asset Administration Shell) oder VDI/VDE 2653, für Interoperabilität zwischen Anlagen und Systemen unterschiedlicher Hersteller und schaffen damit die Grundlage für modulare, skalierbare Produktionssysteme. Um die Optimierung von Produktions- und Engineering-Prozesse auch unternehmensübergreifend datenbasiert und souverän zu ermöglichen, liefern aktuelle Entwicklungen zu Datenräumen und Datenökosystemen (beispielsweise Initiativen wie Manufacturing-X) die entsprechenden technologischen Basiselemente. Technologisch ist agentenbasierte KI also einsatzbereit und skalierbar.

Dass diese Ansätze nicht nur in der Theorie, sondern auch in praxisnaher Umgebung funktionieren, zeigen erste erfolgreiche Referenzprojekte. In der SmartFactory-KL in Kaiserslautern steuern Agentensysteme bereits heute modulare Fertigungsstationen und passen Produktionspläne dynamisch an, während im Umfeld des DFKI autonome Logistiknetzwerke Materialflüsse in Echtzeit optimieren und auf Störungen proaktiv reagieren. Solche Praxisbeispiele senken die Eintrittsbarrieren erheblich, da sie zeigen, wie bestehende Produktionsanlagen Schritt für Schritt in flexible, softwaredefinierte Architekturen ohne riskante Komplettumstellungen, sondern durch einen kontrollierten, inkrementellen Transformationsprozess, überführt werden können.



Abbildung 3 Wachsender Handlungsdruck der Industrie: Wettbewerbsfähigkeit und Fachkräftesicherung durch softwaredefinierte, KI-gestützte Produktionssysteme

Neben der technologischen Reife verstärkt die geopolitische Lage den Handlungsdruck. Die fortschreitende Deglobalisierung und die technologische Entkopplung zwischen Wirtschaftsräumen wie Europa, den USA und China führen zu unterschiedlichen KI-Strategien, Datenrichtlinien und Produktionsstandards. Für die europäische Industrie eröffnet sich dadurch eine strategische Chance: Durch die Verbindung technologischer Exzellenz mit hohen Qualitätsstandards und einem verantwortungsvollen Umgang mit Daten kann ein eigenständiges, international wettbewerbsfähiges Produktionsökosystem entstehen, das sowohl Abhängigkeiten reduziert als auch neue Märkte erschließt. Abgesehen von den Chancen, die sich für die Industrie daraus ergeben, führen steigende Komplexität in Produktionsnetzwerken, der anhaltende Fachkräftemangel und der steigende Effizienzdruck zu einem erhöhten Bedarf an diesen Technologien.

Das Zusammentreffen von technologischer Machbarkeit, erfolgreichen Praxiserfahrungen und geopolitischem und wirtschaftlichem Handlungsdruck erzeugt ein strategisches Momentum, das nicht beliebig reproduzierbar ist. Unternehmen, die jetzt in SDI- und AI-Agentenarchitekturen investieren, sichern nicht nur ihre Wettbewerbsfähigkeit in einem zunehmend volatilen Marktumfeld, sondern schaffen auch die Basis für technologische Unabhängigkeit und langfristige Innovationsführerschaft. Wer abwartet, riskiert, dass sich internationale Standards und Marktstrukturen ohne eigene Einflussnahme verfestigen und der entscheidende Wettbewerbsvorsprung an andere fällt.

2 Leitthesen: Drei Perspektiven auf die Produktion der Zukunft

Die künftige Entwicklung der industriellen Produktion wird durch ein komplexes Zusammenspiel technologischer, wirtschaftlicher und politischer Faktoren bestimmt. Diese Kräfte wirken nicht isoliert, sondern verstärken sich gegenseitig, wodurch sich ein dynamisches Umfeld für Fertigung, Planung und Management ergibt.

Die im Folgenden dargestellten Leitthesen fassen die zentralen Grundannahmen dieses White Papers zusammen. Sie bilden die Basis für die detaillierte Analyse technischer und politischer Rahmenbedingungen, die Bewertung praxisnaher Anwendungsbeispiele sowie die Ableitung konkreter Handlungsfelder für die Industrie, Politik und Gesellschaft.

Ziel ist es, die Leitlinien für die Umsetzung von Software Defined Industry und agentenbasierten Produktionsarchitekturen klar zu strukturieren und die strategische Bedeutung dieser Technologien für die Industrie der Zukunft zu verdeutlichen.

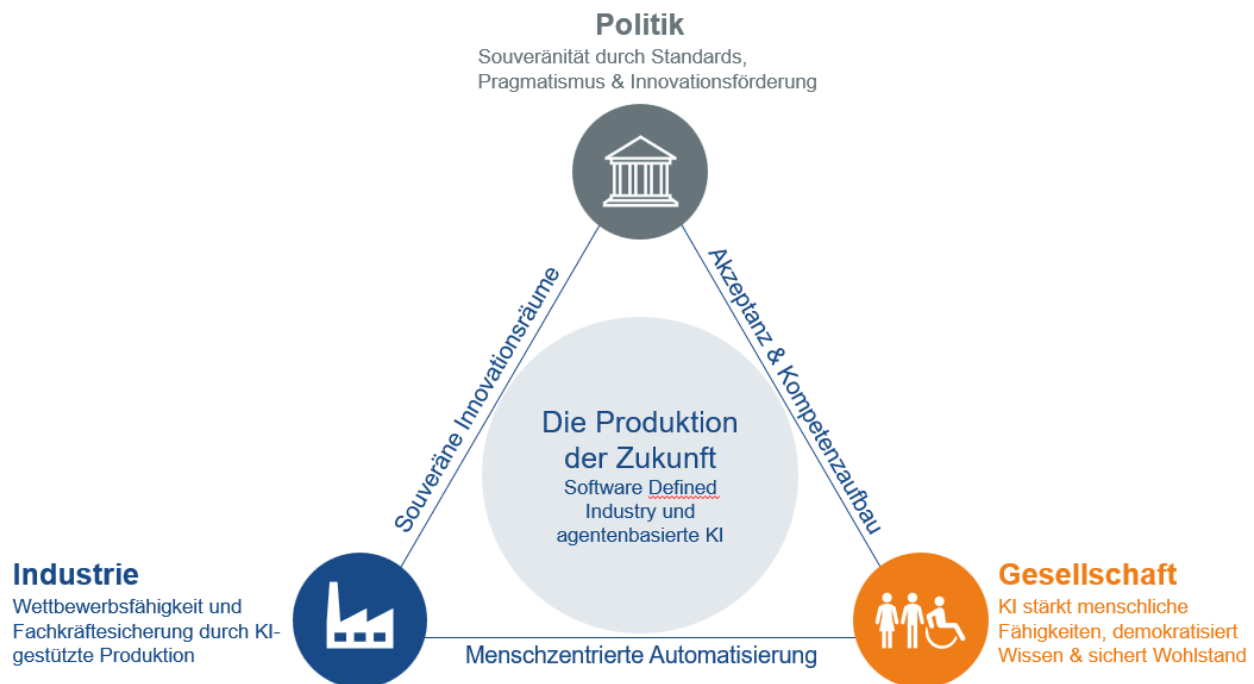


Abbildung 4 Die drei Perspektiven auf die Produktion der Zukunft

2.1 Industrie: Wettbewerbsfähigkeit und Fachkräftesicherung durch KI-gestützte Produktion

„Die Zukunftsfähigkeit der deutschen Industrie entscheidet sich an der Kombination aus Wettbewerbsfähigkeit und Fachkräftesicherung. Software Defined Industry und KI-gestützte Automatisierung sind die einzigen Hebel, um Produktivität massiv zu steigern und gleichzeitig den Fachkräftemangel abzufedern.“

Die deutsche Industrie steht vor einer doppelten Herausforderung: Einerseits geraten die Produktionskosten durch globale Wettbewerber wie die USA und China unter Druck, andererseits verschärft sich der Fachkräftemangel durch Demografie und den Rückgang an MINT-Absolventen. Klassische Hardware-Innovationen allein werden keine signifikanten Produktivitätssteigerungen mehr liefern. Nur durch eine softwarebasierte, flexible Produktionsarchitektur, die flächendeckend eingesetzt werden kann, kann die Industrie ihre Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern. Ziel ist es, Produktionsprozesse softwareseitig flexibel zu gestalten, sodass Anpassungen und Innovationen nicht mehr von teuren, physischen Eingriffen abhängen.

Treiber: Engineering durch digitale Zwillinge und KI

Digitale Zwillinge bilden Maschinen, Anlagen und Produktionslinien virtuell ab und machen sie in Echtzeit zugreif- und konfigurierbar. Dadurch sinkt der Engineering-Aufwand um bis zu 70 Prozent, da Änderungen zunächst virtuell simuliert und validiert werden können, bevor sie in den realen Betrieb übergehen. KI unterstützt dabei sowohl die Planung als auch die Inbetriebnahme. In der Praxis verkürzt dies Entwicklungszyklen, reduziert Stillstände und ermöglicht eine deutlich höhere Variantenvielfalt.

Treiber: Skill-basierte Produktionsmodule

Eine wesentliche Voraussetzung für SDI ist die skill-basierte Beschreibung von Produktionssystemen. Statt starrer Maschinenprogramme werden gekapselte Maschinenfähigkeiten („Skills“) definiert, die modular miteinander kombinierbar sind. Durch diese skill-basierte Modellierung wird das „Was“, also die Beschreibung der gewünschten Funktionalität, klar vom „Wie“, der konkreten technischen Umsetzung, getrennt. Maschinenfähigkeiten werden damit unabhängig vom zugrunde liegenden Anwendungscode definiert und können systemübergreifend eingesetzt, orchestriert und wiederverwendet werden. Die interoperable Beschreibung der Skills und die standardisierte Schnittstelle ermöglicht den herstellerübergreifenden Einsatz verschiedener Hard- und Software-Komponenten. Die Schnittstelle bildet die Brücke zwischen OT- und IT-Anwendungen und verbindet die Vorzüge klassischer Automatisierung mit der Flexibilität der IT-Welt. Zusätzlich kann KI Skills interpretieren und in Abhängigkeit von Produktionsanforderungen dynamisch orchestrieren. Dadurch werden Produktionslinien selbstkonfigurierend: Sie können sich bei einem Maschinenausfall oder bei neuen Produktanforderungen automatisch anpassen.

Treiber: Hybride Steuerungssysteme

Die Transformation zu KI-gesteuerten Produktionssystemen erfolgt nicht von heute auf morgen. Hybride Systeme, die klassische Steuerungen mit KI-Agenten kombinieren, ermöglichen erste Optimierungen ohne vollständigen Systemumbau. Dies reduziert das Risiko technischer Fehlanpassungen und schützt bestehende Investitionen. Gleichzeitig erlaubt eine schrittweise Integration in reale Produktionssysteme die Skalierbarkeit von SDI und agentenbasierten Produktionssystemen. Es können also zunächst einzelne Bereiche einer flexiblen Fertigung mit Ressourcenagenten und Produktagenten ausgestattet werden. Auf diese Weise entstehen hybride Systeme, die die Zuverlässigkeit klassischer Steuerungen und die Flexibilität lernender, adaptiver Software verbinden.

Treiber: Datenräume

Um Produktionsprozesse unternehmensübergreifend planen und steuern zu können, sind Datenräume ein wesentlicher Baustein. Datenräume schaffen eine dezentrale Infrastruktur, um Akteure unternehmensübergreifend miteinander zu verbinden und kommen dabei ohne zentrale Plattform aus. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette lassen sich so Produkte verfolgen und dynamisch mit den jeweils benötigten Produktions-, Transport- oder Lagerressourcen verknüpfen. Über den Datenraum können diese Ressourcen standort- und unternehmensübergreifend angeboten und koordiniert werden. Gleichzeitig werden relevante Informationen wie Verfügbarkeit, Auslastung oder Zustandsdaten bereitgestellt, um Prozesse effizient zu planen und beispielsweise Instandhaltungsmaßnahmen durch Remote-Zugriffe zu unterstützen..

Treiber: Demografie und MINT-Krise

Bis 2035 wird Deutschland mehrere Millionen Arbeitskräfte verlieren.³ Besonders betroffen sind Produktionsberufe und MINT-Fächer, insbesondere im Energie- und Elektrosektor.⁴ Ohne den Einsatz von KI-gestützten Assistenzsystemen droht ein Rückgang von Innovations- und Produktionsfähigkeit. Mit SDI können Unternehmen diesen Engpass abfedern: Routineaufgaben werden automatisiert, während Fachkräfte für wertschöpfende Tätigkeiten frei werden.

³ <https://doku.iab.de/kurzber/2021/kb2021-25.pdf>

⁴ https://arbeitgeber.de/wp-content/uploads/2024/05/bda-arbeitgeber-news-mint_fruehjahrsreport_2024-2024_05_07.pdf

2.2 Gesellschaft: KI stärkt menschliche Fähigkeiten und demokratisiert Wissen

„Die Stärke des Produktionsstandorts Deutschland entsteht aus der Symbiose von Mensch und Maschine. KI-gestützte Systeme verstärken menschliche Fähigkeiten, demokratisieren technisches Wissen und sichern so Wohlstand und Beschäftigung.“

Produktionsarbeit verändert sich fundamental. Routineaufgaben werden zunehmend von KI-Systemen übernommen, während menschliche Expertise in kreativen, wertschöpfenden und überwachenden Tätigkeiten gefordert ist. Diese Verschiebung ermöglicht es, die Qualifikationslücke zu schließen, Einarbeitungszeiten zu verkürzen und komplexe Technologien breiter nutzbar zu machen. KI wird damit nicht zum Ersatz des Menschen, sondern zu einem Verstärker menschlicher Entscheidungsfähigkeit: Sie reduziert Komplexität, erkennt Muster und schlägt Optimierungen vor. Der Mensch trifft die letzte Entscheidung, aber auf Basis einer besseren Datenlage und mit höherer Handlungssicherheit.

Treiber: Mensch-Technik-Integration durch KI

KI-Systeme fungieren als Assistenzpartner, die Informationen verdichten und Entscheidungsvorschläge machen. So können Mitarbeiter sich auf wertschöpfende Aufgaben konzentrieren. Diese Integration steigert nicht nur Effizienz, sondern auch Selbstwirksamkeit, da Bediener in die Lage versetzt werden, komplexe Produktionssysteme sicher und intuitiv zu steuern. Vor allem der Einsatz von agentenbasierten KI-Lösungen ermöglicht die Automatisierung von Abläufen bei gleichzeitiger Einbindung des Menschen (Human in the Loop). So wird sichergestellt, dass der Mensch dabei in der Entscheidungs- und Validierungsschleife eingebunden bleibt, während repetitive oder standardisierte Prozessschritte von Agenten übernommen werden.

Treiber: Demokratisierung von technischem Wissen

KI-gestützte Assistenzsysteme ermöglichen, dass auch weniger erfahrene Mitarbeiter hochkomplexe Anlagen bedienen können. In der Instandhaltung verkürzt sich beispielsweise die Einarbeitungszeit neuer Techniker von mehreren Wochen auf wenige Tage. Gleichzeitig sinken Fehlerquoten signifikant. Dadurch wird technisches Expertenwissen, das bislang nur Spezialisten vorbehalten war, breiter verfügbar. Das Ergebnis ist eine breitere Anwendbarkeit komplexer Technologien, eine deutlich höhere Anpassungs-fähigkeit an neue Produkte und eine Demokratisierung technischer Expertise innerhalb des Unternehmens.

Treiber: Nutzerzentrierung

Die Gestaltung der Systeme entscheidet über ihre Akzeptanz. Intuitive Bedienung, gezielte und kontextabhängige Antworten sowie transparente Erklärungen der KI-Entscheidungen sind entscheidend, damit Mitarbeiter Vertrauen aufbauen und aktiv mit den Systemen interagieren. Nutzerzentrierung wird so zu einem Erfolgsfaktor, der die Demokratisierung technischer Expertise erst möglich macht.

2.3 Politik: Souveränität durch offene Standards, Pragmatismus und wettbewerbsfähige Rahmenbedingungen

„Europa/Deutschland kann seine technologische Souveränität nur durch ein innovationsfreundliches, standardisiertes und kostenseitig tragfähiges Umfeld sichern. Industrial AI muss pragmatisch reguliert, Energiekosten müssen gesenkt und offene Standards konsequent gefördert werden.“

Die Politik hat die Aufgabe, ein Umfeld zu schaffen, in dem neue Technologien marktfähig werden. In der Vergangenheit zeigte sich das in Deutschland deutlich in der Automobilindustrie, die über Jahrzehnte vom automobilaffinen Umfeld profitierte. Ähnlich muss für Industrial AI und Software Defined Industry eine passende Infrastruktur und Regulatorik geschaffen werden. Dazu gehört eine klare Standardisierung, eine abgestimmte Regulierung und die Sicherstellung der Energie- und Infrastrukturversorgung.

Treiber: Standardisierung & offene Schnittstellen

Eine der größten Herausforderungen liegt in der Interoperabilität. Standards wie die Asset Administration Shell (AAS), das Model Context Protocol (MCP) oder das Agent-to-Agent-Protokoll (A2A) sind Schlüsseltechnologien, um Datenflüsse und Agenteninteraktionen interoperabel zu gestalten. Nur mit solchen offenen Standards kann ein europäisches Ökosystem entstehen, das Insellösungen vermeidet und Skalierung ermöglicht.

Treiber: Regulatorik & AI Act

Der aktuelle AI-Act reguliert Industrial AI in Teilen doppelt, da bestehende sektorale Gesetze wie die Maschinen-Verordnung bereits Aspekte wie selbstlernendes Verhalten adressieren. Um Unternehmen nicht zu überfordern, ist eine Entflechtung notwendig: Industrial AI sollte nicht im allgemeinen AI-Act überreguliert, sondern in die sektorspezifische Regulierung integriert werden.

Treiber: Energiepolitik

Die hohen Energiekosten in Deutschland sind eine der größten Hürden für KI-Infrastrukturen. KI benötigt massive Rechenleistung, die in Cloud- und Edge-Rechenzentren zur Verfügung gestellt werden muss. Ohne eine Senkung der Stromkosten und eine verbesserte Infrastruktur für Rechenkapazitäten kann Industrial AI nicht wettbewerbsfähig umgesetzt werden.

Treiber: Innovationsförderung

Damit Deutschland seine Rolle als Leitanbieter ausbauen kann, sind gezielte Förderungen notwendig: Modellregionen, in denen neue Technologien erprobt werden, steuerliche Anreize für die Beteiligung an internationalen Standardisierungsgremien und Unterstützung für KMU beim Aufbau von KI- und Dateninfrastrukturen.

3 Software Defined Industry: Leitbild für die Produktion der Zukunft

Die nächste Entwicklungsstufe der industriellen Fertigung wird maßgeblich durch das Paradigma der **Software Defined Industry (SDI)** geprägt. Dieses Konzept überträgt das in der IT etablierte Prinzip der Trennung von Software und Hardware konsequent auf die gesamte industrielle Produktion. Die Steuerungslogik einer Anlage ist dabei nicht mehr fest mit ihrer physischen Hardware verknüpft, sondern als flexible, wiederverwendbare Software definiert. Automatisierungsfunktionen werden von der Hardware in die Software verlagert und ermöglichen so eine dynamischere Implementierung und Entwicklung neuer Funktionen.

Der entscheidende Vorteil: Produktionsprozesse lassen sich durch reine Softwareanpassungen und ohne physische Eingriffe in die Anlage verändern. **Wandlungsfähigkeit** wird so zur Kernkompetenz: Produktionssysteme können innerhalb kürzester Zeit auf neue Produkte, Losgrößen oder Prozessvarianten umgestellt werden. In einem Umfeld volatiler Märkte und geopolitischer Unsicherheiten wird diese Fähigkeit zum zentralen wirtschaftlichen Erfolgsfaktor. Unternehmen, die ihre Fertigung in Tagen oder Stunden neu konfigurieren können, reagieren nicht nur schneller auf Nachfrageänderungen, sondern erhöhen auch ihre Resilienz gegenüber Lieferkettenstörungen.

Technologisch stützt sich SDI auf **digitale Zwillinge**, also virtuelle Abbilder von Maschinen, Anlagen oder ganzen Produktionslinien, die sämtliche relevanten Eigenschaften und Funktionen in sogenannten **Verwaltungsschalen** (engl.: Asset Administration Shell, kurz: AAS) abbilden. Die somit interoperable Selbstbeschreibung eingesetzter Komponenten ermöglicht eine einfache, automatisierte Integration intelligenter Komponenten während der Planung neuer Anlagen sowie beim Austausch der Komponenten im Brownfield. Änderungen an Prozessen oder Parametern können zunächst in dieser sicheren, virtuellen Umgebung simuliert, getestet und validiert werden. Erst nach erfolgreicher Prüfung werden sie automatisiert in die produktive Steuerungssoftware überführt. Das reduziert Engineering-Aufwand, Inbetriebnahme-Zeiten und Kosten erheblich, während Entwicklungszyklen spürbar verkürzt werden.

Die Umsetzung von SDI erfordert jedoch eine inkrementelle, tiefgreifende **Modernisierung der Operational Technology (OT)**:

- Bestehende Steuerungsarchitekturen müssen modularisiert und abstrahiert werden.
- Kommunikationsprotokolle müssen unabhängig von spezifischer Hardware funktionieren.
- Die Integration von IT- und OT-Sicherheitskonzepten wird unverzichtbar, um Angriffsflächen zu minimieren.

Zur Orchestrierung dieser Netzwerke dienen Software-Agenten, die leistungsfähige Sprachmodelle als Werkzeuge für ihre Aufgaben einsetzen, wodurch sie als sogenannte KI-Agenten bezeichnet werden können. Diese **KI-Agenten** sind autonome Systeme, die auf Basis von Sensordaten und externen Eingaben eigenständig Entscheidungen treffen und direkt umsetzen können. Wie bereits eingangs beschrieben sind klassische Agenten, bestehend aus Modulen für Lernen, Wahrnehmung, Selbstregulation, Planung, Kommunikation, Koordination etc., in der industriellen Forschung seit Jahrzehnten etabliert. Bekannt ist insbesondere der Reinforcement-Learning-Ansatz, der stark mit dem Agentenansatz verbunden ist.

Der aktuelle Fortschritt liegt also in der Kombination dieser Architekturen mit leistungsfähigen Sprachmodellen oder spezialisierten SLMs. Besonders interessant ist die agentenbasierte KI, bei denen mehrere spezialisierte Agenten gemeinsam auf ein Ziel hinarbeiten. Diese Agenten bearbeiten ihre Teilziele parallel und kommunizieren konstant den Fortschritt untereinander. In der Produktion sind das typischerweise ganze Schwärme von **Produkt- und Ressourcenagenten**. Einsatzbereiche für Agentic AI und für den Einsatz digitaler Zwillinge werden in Kapitel 5 näher beleuchtet. Durch ihre Vernetzung können diese KI-Produkt- und KI-Ressourcenagenten eine kontinuierliche Optimierung über den gesamten Produktions- und Wertschöpfungsprozess hinweg gewährleisten.

Produktagenten planen sich entsprechend ihres Arbeitsplans und weiterer Angaben aus dem digitalen Zwilling auf Ressourcenagenten ein. Die Ressourcenagenten wiederum repräsentieren einzelne Handarbeitsplätze, Maschinen, Fertigungsinseln, Produktionslinien, Pufferlager oder Transporteinheiten. Sie bewerben sich auf Basis der Eigenschaften ihres digitalen Zwillings auf Arbeits-, Transport- oder Lagerschritte,

optimieren ihren Schedule und sorgen für die Ausführung, indem sie bestimmte Skills ansteuern. Einzelne Skills kapseln interoperabel Fähigkeiten von Maschinen unterschiedlicher Hersteller. Beispielsweise kann das eine Abfolge von Aktor-, Sensor-, SPS- und/oder Roboter-Aufrufen sein. Unabhängig von der eingesetzten Komponente auf der Feldebene schafft die eingeführte Skill-Ebene die Verbindung zwischen der OT- und IT-Welt. Nach unten werden Maschinenfähigkeiten gekapselt und standardisiert beschrieben und über eine standardisierte Schnittstelle verfügbar gemacht. Verschiedene Systeme aus der IT-Welt sind nun in der Lage mit den Maschinen zu kommunizieren. So kann die gleiche Nutzerschnittstelle zur Bedienung von Anlagen und Komponenten verschiedener Hersteller eingesetzt werden. Zusätzlich können intelligente KI-Services eingesetzt werden, die Maschinen überwachen, steuern und, wenn notwendig, umparametrieren können. Für die unternehmensübergreifende Einbindung von Skills in Produktionsprozesse (also über Datenräume hinweg) werden sogenannte Serviceagenten in das Gesamtsystem integriert. Die in der nachfolgenden Abbildung gezeigte SmartFactory Referenzarchitektur⁵ erklärt das Zusammenspiel aus Produktagenten, Ressourcenagenten, Serviceagenten, Verwaltungsschalen und Skills und wurde von der SmartFactory-KL entwickelt.

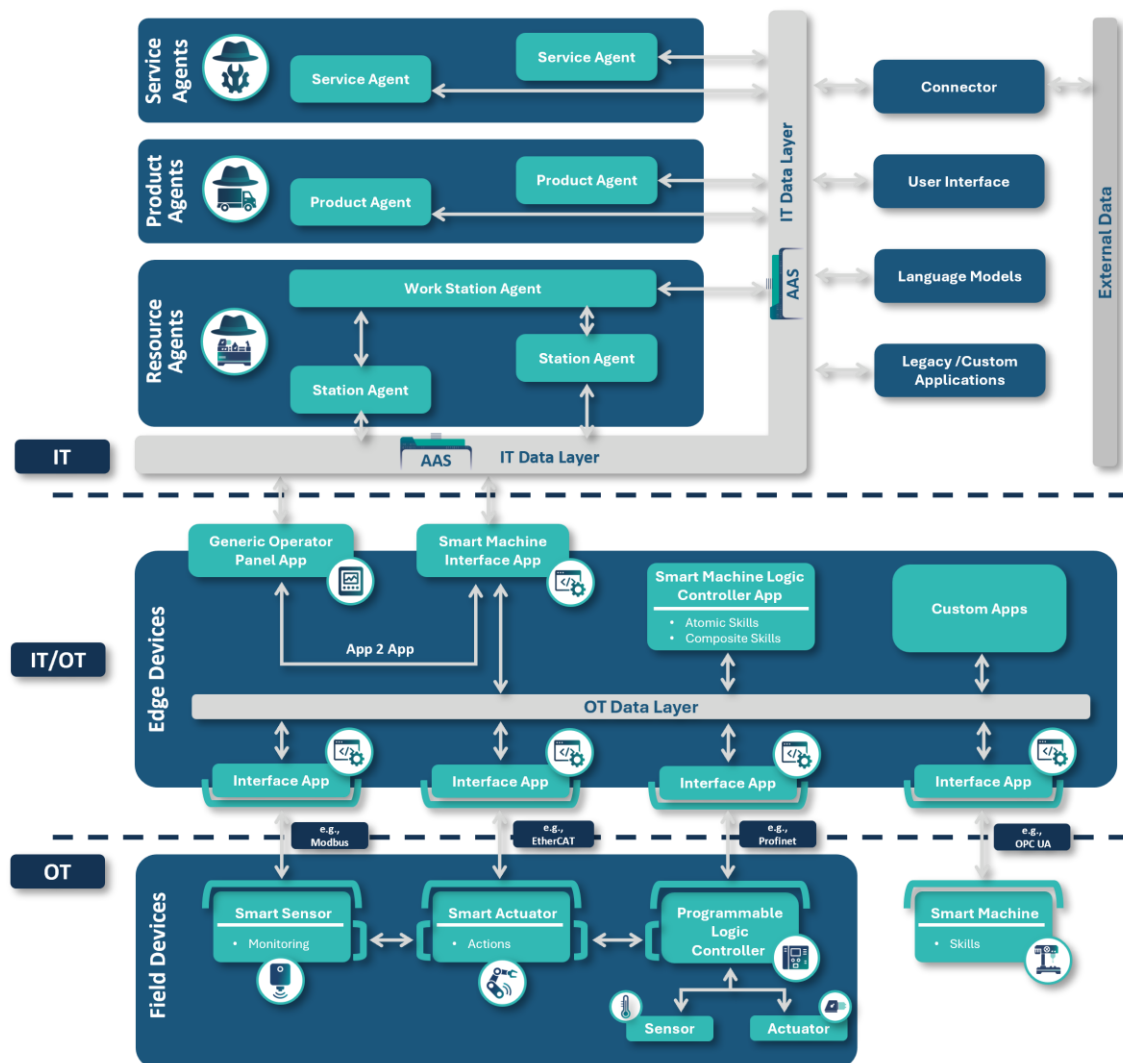


Abbildung 5 Referenzarchitektur verschiedener Agententypen, AAS und Skills⁵

3.1 Integration und Governance: Herausforderungen von SDI und KI-Agenten

Die Einführung von Software Defined Industry (SDI) und agentenbasierter KI (Agentic AI) eröffnet enorme Potenziale, ist aber mit vielschichtigen Herausforderungen verbunden. Diese betreffen nicht nur

⁵ Jungbluth et al. (2025), SmartFactory Referenzarchitektur: Standardisierte Vernetzung von IT und OT. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17609902>

technologische Aspekte, sondern insbesondere organisatorische, ökologische und governancebezogene Dimensionen. Trotz dieser Perspektiven stehen Unternehmen vor zentralen Herausforderungen:

1. Technische Reife vs. organisatorische und ökosystemische Reife

Auf technologischer Ebene sind agentenbasierte KI-Bausteine längst einsatzfähig. Edge- und Cloud-Computing, digitale Zwillinge sowie Multiagenten-Frameworks sind vorhanden und skalierbar. Dennoch scheitert die breite Umsetzung häufig an ökosystemischen Faktoren: unzureichende Datenqualität, mangelnde IT/OT-Integration, fehlende Kompetenzen sowie schwache Governance.⁶ Dies verdeutlicht die Diskrepanz zwischen technologischer Reife (TRL) und organisatorischer Reife (ORL). Eine Lücke, die gezielt geschlossen werden muss, damit Pilotprojekte in den industriellen Betrieb übergehen können.

2. Begriffsklärung

Der Begriff „AI-Agent“ wird zunehmend inflationär genutzt. Dabei fehlt oft der Bezug zu den klassischen Prinzipien der Agentenarchitektur.⁷ Lösungen werden als „agentenbasiert“ vermarktet, obwohl sie lediglich aus konventionellen Automatisierungskomponenten oder einfachen KI-Services bestehen. Diese unsaubere Abgrenzung („Agent Washing“) führt zu unrealistischen Erwartungen, Vertrauensverlust und Fehlallokation von Investitionen. Eine klare Definition der Kernkomponenten von Agentenarchitekturen, von Wahrnehmung, Planung, Kommunikation, Koordination bis hin zu Ausführung ist deshalb unerlässlich.

3. Know-how-Defizite und Integrationsbarrieren

Marktanalysen zeigen, dass viele Projekte bereits an der Modellierung komplexer Multiagentensysteme scheitern.⁶ Fehlendes Fachwissen, mangelnde Integration in bestehende IT-/OT-Landschaften und unklare Mehrwertdefinitionen führen dazu, dass laut Gartner bis 2027 über 40 Prozent der aktuell gestarteten Projekte eingestellt werden. Hinzu kommen hohe Anforderungen an Datensouveränität, Interoperabilität zwischen Systemen und Anwendungen sowie Unsicherheiten im Vertrags- und Lizenzmanagement. Diese Barrieren unterstreichen die Notwendigkeit offener, souveräner Datenökosysteme wie **Manufacturing-X**⁸, die Interoperabilität und Datensouveränität systematisch adressieren.

4. Strategische Technologieentscheidung

Klassische Agentenarchitekturen bestehen aus einer ganzen Reihe von Mechanismen: Wahrnehmung, Entscheidungslogik, Planung, Koordination, Aktor-/Sensorintegration. Neuartige LLMs halten zunehmend Einzug in diese Systeme, vor allem in die Kommunikations- und Koordinationskomponenten, wo sie starre Protokolle durch natürlichsprachliche Interaktion ersetzen (z. B. mit LangChain, AutoGen oder CrewAI). Parallel dazu ermöglicht das Model Context Protocol (MCP) die Integration von Agenten in industrielle Tools und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Die Herausforderung besteht allerdings darin, zunächst das Problem auf dem Shop Floor zu analysieren, die Kernkomponenten der relevanten Produkt- oder Ressourcenagenten zu identifizieren und dann zu entscheiden, ob klassische Agentensysteme (z. B. nach VDI/VDE 2653) ausreichend sind oder ob LLM-/SLM-basierte Ansätze Mehrwert stiften. Perspektivisch ist zu erwarten, dass LLMs zunehmend auch in weitere Komponenten (z. B. Reinforcement Learning in Entscheidungsmodulen) vordringen. Aktuell besteht jedoch ein Abwägungsprozess zwischen Kosten, Implementierungskomplexität und Abhängigkeit von proprietären Modellen.

5. Onboarding von KI-Agenten in bestehende IT/OT-Umgebungen

Hierbei entstehen typische technische Herausforderungen: Firewall- und Port-Konfigurationen müssen angepasst, Dokument-Synchronisations-Konnektoren eingerichtet und Zero-Touch-Onboarding-Verfahren etabliert werden. Darüber hinaus ist eine semantische Datenbereitstellung erforderlich,

⁶ <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-06-25-gartner-predicts-over-40-percent-of-agentic-ai-projects-will-be-canceled-by-end-of-2027>

⁷ <https://www.reuters.com/business/over-40-agentic-ai-projects-will-be-scrapped-by-2027-gartner-says-2025-06-25/>

⁸ <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html>

damit Agenten die übermittelten Informationen korrekt interpretieren können. Diese Schritte sind ressourcenintensiv und erfordern ein eng abgestimmtes Zusammenspiel zwischen IT, OT und Engineering.

6. LLM-basierte Entwicklung von KI-Agenten

Während klassische Automatisierung meist deterministisch programmiert wird, eröffnet LLM-basierte Entwicklung neue Möglichkeiten: Generierung von Code, Tool-Integration und semantische Kommunikation zwischen Agenten. Gleichzeitig entstehen neue Abhängigkeiten, etwa von Modell-Updates oder proprietären Frameworks. Unternehmen müssen entscheiden, ob sie auf Open-Source-Frameworks (z. B. LangChain, AutoGen, CrewAI) setzen oder auf geschlossene Plattformen etablierter Anbieter.

7. DevOps und Deployment von KI-Agenten

Die operative Einführung von Agentenarchitekturen erfordert neue Ansätze für DevOps: Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD) von Agenten, Monitoring, Rollback-Mechanismen und Governance-Richtlinien. Besonders herausfordernd ist, dass KI-Agenten im Unterschied zu klassischen Steuerungen adaptiv und selbstlernend agieren. Dies verlangt kontinuierliches Monitoring, Auditing und klar definierte Verantwortlichkeiten.

3.2 Potenziale für den Standort: Produktivität, Resilienz und Souveränität

Die Einführung von Software Defined Industry (SDI) und KI-Agenten ist nicht allein eine technologische Weiterentwicklung, sondern ein strategischer Schritt zur langfristigen Sicherung von Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Innovationskraft. Der Nutzen entfaltet sich auf mehreren Ebenen: vom einzelnen Anwender über die gesamte Industrie bis hin zur gesellschaftlichen und politischen Dimension.

Vom Anwender bis zur gesamten Industrie: Das bringt der Einsatz konkret

Für produzierende Unternehmen steht die **operative Effizienz** traditionell im Zentrum strategischer Entscheidungen. SDI und KI-Agenten verschieben diese Effizienzgrenze deutlich, indem sie es ermöglichen, Produktionsprozesse mit bislang unerreichter Geschwindigkeit und Präzision anzupassen.

Im Kern bedeutet dies, dass neue Produktvarianten ohne aufwändige Hardwareanpassungen oder langwierige Umrüstprozesse in bestehende Fertigungsumgebungen integriert werden können. Die Steuerungslogik wird einfach softwareseitig aktualisiert, wodurch Rüstzeiten von Tagen auf Stunden oder sogar Minuten reduziert werden. KI-Agenten agieren dabei als intelligente, autonome Funktionsbausteine: Sie erfassen kontinuierlich Prozess- und Umgebungsdaten, erkennen Abweichungen oder Optimierungspotenziale durch maschinenspezifische KPI-Analysen und leiten eigenständig Maßnahmen ein. Sie übernehmen repetitive Aufgaben beispielsweise in Bereichen des Engineerings, der Operations oder des Services und können so zu einer Optimierung der Prozesse beisteuern. Ihre Fähigkeiten reichen von der dynamischen Anpassung der Produktionsplanung in Echtzeit über die vorausschauende Wartung bis hin zur autonomen Koordination komplexer Materialflüsse. Sie ergänzen damit zunächst die klassischen zentralen Leitsysteme. In der Praxis führt dies zu einer deutlichen Reduktion ungeplanter Stillstände, zu sinkenden Ausschussquoten, schnelleren Durchlaufzeiten und zu einer besseren Auslastung vorhandener Maschinenkapazitäten.

Darüber hinaus verkürzt sich die Time-to-Market neuer Produkte signifikant. Unternehmen können flexibel auf kurzfristige Kundenanforderungen oder Marktveränderungen reagieren, ohne dass umfangreiche Reengineering-Prozesse erforderlich sind. Die Entscheidungsfindung wird datengetrieben und erfolgt auf der Grundlage aktueller, konsistenter Prozessinformationen, was nicht nur die Effizienz, sondern auch die Qualität der Produktion nachhaltig verbessert. Zudem führt der Einsatz von KI-Agenten langfristig zu einer Entlastung von Mitarbeitern bezogen auf Stress und Selbstwirksamkeit und befähigen auch weniger qualifizierte Mitarbeiter, komplexe Aufgaben zu übernehmen.

Damit wird klar: Der Nutzen für Anwender geht weit über klassische Produktivitätssteigerungen hinaus. SDI und KI-Agenten schaffen die Voraussetzungen für agile, resiliente und hochgradig kundenorientierte Produktionssysteme, die auch in einem dynamischen und unsicheren Marktumfeld bestehen können.

Für Industrieunternehmen geht der Nutzen von SDI und KI-Agenten weit über reine Effizienzgewinne hinaus. Sie eröffnen **neue, skalierbare Geschäftsmodelle**, die das bisherige Verständnis industrieller Wertschöpfung grundlegend erweitern. Ein zentrales Beispiel ist „Production-as-a-Service“ (PaaS): Statt physische Maschinen zu kaufen, buchen künftig Kunden bzw. deren Produktagenten selbstständig Produktionskapazitäten, -zeit oder -qualität. Diese Entwicklung senkt die Einstiegshürden für kleinere Marktteilnehmer, während Anbieter durch flexible Kapazitätssteuerung ihre Anlagen besser auslasten und zusätzliche Einnahmequellen erschließen.

Ein weiterer strategischer Vorteil liegt in der **Monetarisierung von Produktionsdaten**. Durch die systematische Erfassung und Analyse dieser Daten lassen sich datengetriebene Services entwickeln: von vorausschauender Wartung über adaptive Qualitätskontrolle bis hin zu KI-gestützten Optimierungsdiensten für Produktionsprozesse. Hersteller, die ihre Maschinen und Anlagen mit solchen Mehrwertdiensten verknüpfen, binden Kunden langfristig und positionieren sich als ganzheitliche Lösungsanbieter.

Gerade für die exportorientierte deutsche Industrie entsteht hier ein Wettbewerbsvorteil: Die Fähigkeit, Produktionssysteme weltweit softwareseitig an lokale Marktbedingungen, Normen oder regulatorische Anforderungen anzupassen, verkürzt Markteinführungszeiten erheblich. Gleichzeitig bleiben hohe Qualitätsstandards und markenspezifische Produktionsmerkmale unabhängig vom Standort der Fertigung gewahrt. Damit können Unternehmen sowohl ihre globale Reichweite ausbauen als auch ihre Premiumposition im internationalen Wettbewerb festigen.

Gesellschaft und Politik profitiert von einem stärkeren Wirtschaftsstandort Deutschland

Auf gesellschaftlicher Ebene leisten SDI und KI-Agenten einen wesentlichen Beitrag zur **Stärkung des Produktionsstandorts**, insbesondere in Hochlohnländern wie Deutschland. Die Fähigkeit, Fertigung hochflexibel, automatisiert und digital gesteuert zu betreiben, macht es wirtschaftlich attraktiv, Produktionskapazitäten im Inland zu halten oder zurückzuverlagern. Dies sichert bestehende Arbeitsplätze und schafft zugleich neue, zukunftsorientierte Berufsbilder, etwa für KI-Systemtrainer, Datenanalysten, Experten für digitale Zwillinge oder Spezialisten für cyber-physische Produktionssysteme. Menschen und Maschinen in einem produktiven Dialog zusammenarbeiten zu lassen, ist ein zentraler Punkt angesichts des Fachkräftemangels in Deutschland.

Darüber hinaus fördern diese Technologien eine ressourcenschonendere und nachhaltigere Produktionsweise. Präzise Prozesssteuerung und kontinuierliche Optimierung senken den Material- und Energieverbrauch, reduzieren Ausschussquoten und ermöglichen eine effizientere Nutzung vorhandener Anlagen. Gleichzeitig lassen sich Transportwege verkürzen, indem Produktion näher am Absatzmarkt stattfindet. Ein Effekt, der sowohl CO₂-Emissionen verringert als auch Lieferketten resilienter macht.

Aus politischer Perspektive eröffnet SDI die Möglichkeit, technologische Souveränität gezielt auszubauen. Durch die Unabhängigkeit von proprietären, außereuropäischen Steuerungssystemen und durch die Förderung offener Standards können Abhängigkeiten von globalen Zulieferketten reduziert werden. Europa gewinnt damit Handlungsspielräume, um eigene Produktionsstandards, Sicherheitsanforderungen und ethische Leitlinien zu definieren und sich im internationalen Wettbewerb nicht nur als Marktteilnehmer, sondern als Gestalter der industriellen Zukunft zu positionieren.

4 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Umsetzung

Damit SDI und Agentic AI ihr Potenzial voll entfalten können, müssen technologische, politische, ökonomische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen ineinandergreifen. Die Leitthesen verdeutlichen, dass diese Dimensionen nicht isoliert zu betrachten sind: Technologische Exzellenz ist nur sinnvoll, wenn die Politik ein innovationsfreundliches Umfeld schafft, die Industrie investiert und die Gesellschaft Vertrauen und Akzeptanz entwickelt.



Abbildung 6 Gemeinsam durch Industrie, Politik und Gesellschaft hin zu Produktivität, Resilienz und Souveränität

4.1 Technische Basis: Interoperabilität, Datenräume und strategische Governance

Der erfolgreiche Einsatz von KI-Agenten, digitalen Zwillingen und KI-gestützten Produktionssystemen hängt entscheidend von einer soliden technischen Basis ab. Es geht dabei weniger um radikale Disruption bestehender Strukturen als um den gezielten Ausbau und die intelligente Nutzung bereits vorhandener Technologien und Standards. Nur wenn die technischen Voraussetzungen stimmen, können Unternehmen die Potenziale neuer Systeme voll ausschöpfen und gleichzeitig Risiken minimieren.

Interoperabilität zwischen IT- und OT-Systemen

Die Grundlage für leistungsfähige KI-gesteuerte Produktionssysteme ist die nahtlose Verzahnung von IT- und OT-Strukturen. IT-Systeme wie ERP, MES oder PLM müssen zuverlässig mit den operativen Steuerungen der Produktionsanlagen kommunizieren können. Die AAS spielt hier eine Schlüsselrolle. Sie fungiert als standardisierter digitaler Zwilling nach Industrie-4.0-Prinzipien und bildet Maschinen, Anlagen und Prozesse in einer einheitlichen, herstellerübergreifenden Struktur ab. Die AAS stellt sicher, dass Daten automatisierbar und skalierbar bereitgestellt werden. KI-Agenten können diese Daten konsolidieren, analysieren und zur Steuerung der Produktionsprozesse nutzen. In Kombination mit Datenökosystemen wie Manufacturing-X wird ein sicherer und wirtschaftlicher Rahmen für den Datenaustausch zwischen Unternehmen geschaffen. Dadurch können KI-Anwendungen auf breiter Basis eingesetzt werden, ohne dass Insellösungen entstehen. Dies entspricht Leitthese 1: Nur wenn Systeme interoperabel und flexibel sind, kann die Industrie ihre Produktivität steigern und Fachkräfte entlasten.

Standardisierte Datenmodelle für autonome Entscheidungen

Damit Agenten Produktionsprozesse dynamisch steuern können, braucht es standardisierte Beschreibungen von Anforderungen (Requirements) und Fähigkeiten (Skills). Requirements beschreiben die technischen Anforderungen von Produkten, Prozessen und Anlagen und Skills bilden die Fähigkeiten einzelner Maschinen oder Systeme ab. Fehlen solche Beschreibungen, sind autonome Optimierungen stark eingeschränkt, da die Agenten die Systeme nicht zuverlässig interpretieren könnten. Standards wie das Model Context Protocol

(MCP) und das Agent-to-Agent-Protokoll (A2A) ermöglichen darüber hinaus die Orchestrierung mehrerer Agenten und die Integration in bestehende Softwarelandschaften. Das MCP ermöglicht die Integration von KI-Agenten in industrielle Tools, unterstützt Tool-Discovery, entkoppelte Kommunikation zwischen Agenten und Tools sowie die Nutzung etablierter Webstandards wie HTTP, JSON-RPC und Server-Sent Events. Ergänzend dazu ermöglicht das A2A-Protokoll die direkte Zusammenarbeit mehrerer Agenten, etwa in Form von Multi-Agent-Kollaboration oder gemeinsamem Task-Management. Während MCP vor allem die Tool-Integration regelt, liegt der Fokus von A2A auf der standardisierten Kommunikation und Koordination zwischen autonomen Agenten.

Integration bestehender Systeme

Ein zentraler Erfolgsfaktor ist die Fähigkeit, bestehende Softwarelandschaften nahtlos einzubinden. Alte Systeme müssen nicht abrupt ersetzt werden. Stattdessen sollten offene Schnittstellen geschaffen werden, die MES-, ERP- oder PLM-Systeme mit KI-Agenten verbinden. Hierbei ist eine modulare Architektur mit offenen, dokumentierten APIs entscheidend, um den bidirektionalen Datenaustausch zwischen Systemen und Agenten flexibel zu gestalten. Durch diese evolutionäre Integration können Unternehmen zunächst erste Optimierungen durch KI erzielen, ohne laufende Prozesse zu gefährden oder bestehende Investitionen zu riskieren. Hybride Systeme, die klassische Steuerungen mit KI-Intelligenz kombinieren, ermöglichen ein schrittweises Lernen sowohl der Systeme als auch der Mitarbeitenden. Gleichzeitig werden Risiken reduziert, und der Wissenstransfer innerhalb des Unternehmens wird gesichert.

Bereits erreichte Fortschritte wie Modularisierung, Flexibilisierung von Produktionsanlagen und standardisierte Kommunikationsprotokolle bieten ein stabiles Fundament, das durch die API-gestützte Architektur gezielt erweitert wird. Entscheidend ist jedoch, diese Elemente nicht isoliert zu betrachten, sondern als Teil eines integrierten, evolutiven Migrationspfads, der klassische Steuerungen und KI-gestützte Systeme nahtlos verbindet.

Sicherheits- und Governance-Anforderungen

Mit zunehmender Vernetzung und KI-Nutzung steigt auch die Bedeutung robuster Sicherheits- und Governance-Strukturen. Datenintegrität, -souveränität, Zugriffskontrolle und sichere Schnittstellen müssen gewährleistet sein, um Betriebsstörungen, Manipulationen oder unerwünschte Datenzugriffe zu verhindern. KI-Systeme benötigen klare Regelwerke, die Entscheidungen nachvollziehbar machen und Fehlerquellen minimieren. Compliance-Aspekte, insbesondere Datenschutz, Nachvollziehbarkeit und industrielle Sicherheitsstandards, müssen von Beginn an in Architektur- und Systemdesigns integriert werden.

Ein zentraler Bestandteil dieser Governance ist der Aufbau offener und souveräner Datenökosysteme. Initiativen wie Manufacturing-X, Catena-X oder GAIA-X schaffen hierfür die Rahmenbedingungen, indem sie standardisierte Datenräume und föderierte Zugriffsrechte bereitstellen. Sie ermöglichen es, Produktions- und Prozessdaten sicher über Unternehmensgrenzen hinweg auszutauschen, ohne die Kontrolle über die eigenen Daten zu verlieren. Damit wird nicht nur Interoperabilität gefördert, sondern kann auch das Vertrauen in KI-basierte Systeme gestärkt werden. Eine Grundvoraussetzung für Skalierbarkeit und Akzeptanz von SDI- und Agentic-AI-Anwendungen. Je nach Einsatzszenario müssen KI-Agenten zudem in unterschiedlichen Deployment-Umgebungen lauffähig sein: On-Premise-Installationen (z. B. für HMI-Integration), Cloud-basierte Architekturen mit zentraler Steuerung und schnellen Updates sowie Edge-Deployments, die lokale Autonomie und Echtzeitfähigkeit gewährleisten. Die Wahl des geeigneten Modells hängt stark von Sicherheits- und Latenzanforderungen, Datenhoheit und Unternehmensrichtlinien ab. Nur wenn Sicherheit, Governance und Datenökosysteme ganzheitlich zusammengedacht werden, kann der Betrieb langfristig stabil, gesetzeskonform und wirtschaftlich erfolgen.

4.2 Sozioökonomische Faktoren: Investitionen, Qualifizierung und Akzeptanz

Neben der technologischen und politischen Dimension spielt auch der ökonomische und gesellschaftliche Rahmen eine entscheidende Rolle für die erfolgreiche Umsetzung von Software Defined Industry (SDI) und Agentic AI. Denn wie in den Leitthesen dargelegt, wird die Zukunftsfähigkeit der Industrie nicht allein durch Maschinen und Software bestimmt, sondern durch die Fähigkeit, Wohlstand, Beschäftigung und Innovationskraft in Einklang zu bringen.

Ökonomisch betrachtet bedeutet SDI zunächst hohe Investitionen in Infrastruktur, Standards und Qualifizierung. Damit diese Investitionen getätigt werden, braucht es klare Transformationspfade, die Risiken minimieren und Unternehmen Planungssicherheit geben. Besonders wichtig ist, dass kleine und mittlere Unternehmen (KMU) nicht abgehängt werden. Förderprogramme und gemeinsame Plattformen – etwa Manufacturing-X – können dabei helfen, den Zugang zu Technologien zu erleichtern und Einstiegshürden zu senken. Gleichzeitig entstehen durch SDI und KI-Agenten neue Geschäftsmodelle, wie Production-as-a-Service oder datenbasierte Zusatzdienste, die zusätzliche Einnahmequellen eröffnen und die Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern.

Gesellschaftlich eröffnen sich durch den Wandel Chancen, aber auch Herausforderungen. Der Einsatz von KI-Agenten führt zu einer Automatisierung von Routinearbeiten und gleichzeitig zu einer Aufwertung menschlicher Tätigkeiten. Menschen werden stärker in kreativen, wertschöpfenden und überwachenden Aufgaben gefragt sein. Dies erfordert allerdings umfassende Qualifizierungsmaßnahmen: vom schnellen Onboarding neuer Fachkräfte bis hin zu Weiterbildungsprogrammen für bestehende Belegschaften. Nur so kann der Fachkräftemangel, wie in Leitthese 1 beschrieben, abgefedert werden.

Zudem ist Akzeptanz entscheidend. Vertrauen in KI-Systeme entsteht durch Transparenz, Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen und die Einbindung der Mitarbeiter in die Gestaltung. Nutzerzentrierte Systeme, die Menschen in ihrer Arbeit unterstützen, statt sie zu ersetzen, sichern die gesellschaftliche Akzeptanz. Politische und unternehmerische Verantwortung liegt darin, die Transformation sozial ausgewogen zu gestalten: Arbeitsplätze müssen gesichert und neue Beschäftigungsfelder geschaffen werden, um den Wohlstand in Deutschland und Europa langfristig zu sichern. In diesem Sinne ist die Verbindung von ökonomischer Wettbewerbsfähigkeit und gesellschaftlicher Teilhabe, wie Leitthese 2 beschreibt, die Grundlage für eine zukunftsfähige Industrie.

4.3 Regulatorischer Rahmen: Standardisierung, unternehmerische Freiheit und Energiepolitik

Technologische Exzellenz allein reicht nicht aus, um die Führungsrolle im Bereich Industrial AI langfristig zu sichern. Deutschland und Europa benötigen ein innovationsfreundliches Umfeld, das den schnellen Transfer von Forschungsergebnissen in marktfähige Anwendungen ermöglicht. Politische Rahmenbedingungen wirken hier als Hebel, der die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie maßgeblich beeinflusst. Leitthese 3 hebt hervor, dass technologische Souveränität nur durch Standardisierung, innovationsfreundliche Regulierung und wettbewerbsfähige Energiepolitik möglich ist.

Dynamische Standardisierungspolitik und Internationale Normung

Ein zentraler Hebel für den Erfolg industrieller KI liegt in der Standardisierungspolitik. Standards müssen nicht nur gesetzt, sondern kontinuierlich weiterentwickelt werden, um mit dem rasanten Tempo technologischer Innovation Schritt zu halten. Offene Standards wie AAS, MCP oder A2A sind Schlüsseltechnologien, um Interoperabilität zu sichern. Deutschland muss daher seine Unternehmen aktiv in internationale Normungsgremien einbringen. Steuerliche Anreize für die Teilnahme an Gremien wie CEN/CENELEC JTC21 oder ISO/IEC JTC 1/SC 42 würden sicherstellen, dass deutsche Interessen in der globalen KI-Governance sichtbar vertreten sind. Eine aktive Mitgestaltung internationaler Standards ist entscheidend, um Wettbewerbsvorteile zu sichern und gleichzeitig die Einhaltung europäischer Qualitäts-, Sicherheits- und Datenschutzstandards zu gewährleisten.

Pragmatische Regulierung

AI-bezogene Vorgaben sollten nicht mehrfach in unterschiedlichen Rechtsrahmen geregelt werden, um die Umsetzung in der Praxis zu erleichtern. Die Herauslösung der „Industrial AI“ aus dem allgemeinen AI-Act und deren Integration in bestehende sektorale Regelwerke, wie etwa die Machinery Regulation, könnte den Regulierungsprozess verschlanken, praxisgerechter gestalten und die Markteinführung innovativer Anwendungen beschleunigen. Darüber hinaus müssen Fristen im AI-Act an die Verfügbarkeit harmonisierter europäischer Normen (heNs) angepasst werden. Eine Mindestfrist von 24 Monaten würde Unternehmen die notwendige Planungssicherheit geben, insbesondere beim Einsatz von KI-Systemen in kritischen Infrastrukturen.

Breites Innovationsförderungsspektrum

Innovationsförderung darf sich nicht auf große Sprachmodelle (LLMs) beschränken, sondern muss das gesamte industrielle KI-Ökosystem berücksichtigen. Dazu zählen Edge-AI-Lösungen, industrielle Spezialanwendungen, Agentic AI und die Bereitstellung relevanter Schlüsselkomponenten. Nur eine ganzheitliche Förderung stellt sicher, dass Unternehmen praxisnahe Lösungen entwickeln und die technologische Unabhängigkeit Europas gestärkt wird.

Energiepolitik als Wettbewerbsfaktor

Ein oft unterschätzter Faktor für Industrial AI ist die Energiepolitik. Hohe Strompreise und unzureichende Energieinfrastruktur hemmen den Aufbau notwendiger Rechenkapazitäten. Eine gezielte Senkung der Stromkosten und der Ausbau stabiler, leistungsfähiger Energieversorgung sind zentrale Voraussetzungen, um industrielle KI wettbewerbsfähig umzusetzen. Ohne diese Maßnahmen drohen Standortnachteile gegenüber globalen Wettbewerbern, die über günstigere Energie und leistungsfähige Rechenzentren verfügen.

Politische Rahmenbedingungen sind ein wesentlicher Bestandteil der Industrial-AI-Strategie. Dynamische Standardisierung und aktive internationale Normungsarbeit, praxisnahe Regulierung, gezielte Innovationsförderung und energiepolitische Unterstützung bilden das Fundament, auf dem industrielle KI erfolgreich implementiert werden kann. Nur wenn diese Faktoren aufeinander abgestimmt sind, können Unternehmen die Chancen von KI-gesteuerten Produktionssystemen voll ausschöpfen und gleichzeitig technologische Souveränität und Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern.

5 Referenzszenarien: Wo KI-Agenten heute schon Mehrwert versprechen

Die Wirkung von KI-Agenten und digitalen Zwillingen zeigt sich besonders anschaulich in konkreten Anwendungsszenarien:

- **Adaptive Produktionslinien:** In einem mittelständischen Automobilzulieferbetrieb werden KI-Agenten eingesetzt, um Fertigungszellen in Echtzeit an wechselnde Produktvarianten anzupassen. Statt mehrstündiger Rüstzeiten kann die Umstellung innerhalb weniger Minuten erfolgen, ohne dass menschliche Eingriffe notwendig sind. In diesem Szenario arbeitet beispielsweise der Hardware-Configuration-Agent (HWCN) eng mit dem Electronic Agent zusammen: Während der HWCN Agent Hardwarekonfigurationen an neue Produktionsaufträge anpasst, prüft der Elektronik Agent Schaltpläne und korrigiert Unstimmigkeiten automatisch. Das Ergebnis sind nahezu unterbrechungsfreie Umrüstprozesse bei gleichbleibend hoher Produktionsqualität. Die Agenten können dabei zusätzlich auf Maschinenausfälle reagieren, alternative Produktionspläne erstellen und Stillstände minimieren. Dies erhöht die Resilienz komplexer Wertschöpfungsketten.
- **Vorausschauende Wartung und Selbstheilung:** Durch die Kombination von digitalen Zwillingen mit KI-gestützter Fehlerdiagnose kann eine Produktionsanlage drohende Ausfälle frühzeitig erkennen und durch automatische Umplanung der Produktionsaufträge Engpässe vermeiden. Der Security Inspector Agent ergänzt diese Funktion, indem er kontinuierlich OT-Assets auf Sicherheitslücken prüft. So werden nicht nur technische Defekte, sondern auch potenzielle Angriffsflächen erkannt und entschärft. Das erhöht die Anlagenverfügbarkeit, senkt Wartungskosten und reduziert Sicherheitsrisiken gleichzeitig.
- **Engineering-as-a-Service:** Ein Maschinenbauunternehmen nutzt digitale Zwillinge, um Kundenanlagen bereits vor der physischen Fertigung virtuell zu konfigurieren und zu testen. Dies reduziert den Aufwand für Inbetriebnahmen drastisch und senkt Kosten wie auch Lieferzeiten. Hier spielt der Automation Engineering Agent eine zentrale Rolle: Er generiert SPS-Code, HMI-Visualisierungen und technische Dokumentationen automatisch aus den Konstruktionsdaten. Ergänzt wird dies durch den Generative Engineering Agent, der Bauteile auf Basis von Anforderungen und Simulationsergebnissen entwirft und optimiert. Die Verbindung beider Agenten verkürzt Entwicklungszyklen drastisch und ermöglicht eine präzise, fehlerarme Umsetzung. Zusätzlich kann der Einsatz von KI während der Konzeptionsphase die Komponentenauswahl unterstützen, indem Anforderungen, verfügbare Bauteile und historische Projektdaten analysiert und geeignete Komponenten vorgeschlagen oder Varianten simuliert werden können.
- **Hybride Steuerungssysteme und Lieferkettenkoordination:** Bestehende SPS-Strukturen werden durch KI-Agenten ergänzt, die Optimierungsvorschläge in Echtzeit umsetzen. So werden klassische Steuerungen schrittweise zu selbstlernenden, adaptiven Systemen weiterentwickelt. In diesem Kontext unterstützt der Product-Configurator-Agent den gesamten Prozess von der Kundenanforderung bis zur Systemintegration: Er schlägt passende Steuerungskonfigurationen vor, verknüpft diese mit dem ERP-System und stellt sicher, dass die resultierenden Anlagen optimal auf den Produktionsprozess abgestimmt sind. In globalen Netzwerken optimieren Agenten somit Materialflüsse, kommunizieren direkt mit mehreren Systemen und passen Transportwege dynamisch an. Lieferketten werden dadurch resilienter und effizienter.
- **Produkt- und Ressourcenagenten, AAS, Skills und MCP:** Produktagenten planen sich entsprechend ihres Arbeitsplans selbstständig auf Module einer Fertigungsinsel ein. Hierzu interagieren sie mit den zugehörigen AAS. Die Ressourcenagenten der Module sorgen anschließend für die Abarbeitung der eingeplanten Arbeitsschritte, indem sie die Skills über die OPC UA Schnittstelle ausführen. Über das MCP kann mit den Agenten über natürliche Sprache interagiert werden, sei es, um Abfragen oder um Anweisungen durchzuführen.

6 Handlungsempfehlungen: Was jetzt zu tun ist

Um das in den Thesen und ihren Treibern sowie in den Rahmenbedingungen beschriebene Potenzial von KI-Agenten, digitalen Zwillingen und KI-gestützten Produktionssystemen vollständig zu realisieren, sind koordinierte Maßnahmen auf technischer, politischer und wirtschaftlicher Ebene notwendig. Die Umsetzung erfordert ein abgestimmtes Vorgehen von Technologieanbietern, Industrieunternehmen und politischen Entscheidungsträgern.

6.1 Für die Industrie

1. Technische Interoperabilität sichern

Interoperabilität und Standards aktiv implementieren: AAS, MCP oder A2A sowie Basiskomponenten von Datenökosystemen nicht nur kennen, sondern auch produktiv nutzen.

2. Evolution statt Disruption

Evolutionären Transformationspfad entwickeln und Roadmaps mit klaren Meilensteinen für Hybrid-Systeme definieren und adaptieren.

3. Fachkräfte durch KI entlasten

Skill-basierte Produktionsmodelle und Assistenzsysteme einführen, die Routineaufgaben übernehmen, um die Arbeitslast von Fachkräften zu reduzieren.

4. Neue Geschäftsmodelle

Production-as-a-Service und datengetriebene Serviceangebote entwickeln, um zusätzliche Wertschöpfung zu generieren.

6.2 Für die Gesellschaft

1. Qualifizierung und Bildung

Breite digitale und KI-Weiterbildungsprogramme sind notwendig, um sowohl bestehende Fachkräfte als auch neue Generationen für den Umgang mit KI-gestützten Systemen fit zu machen.

2. Vertrauen und Akzeptanz

Gesellschaftliche Akzeptanz entsteht nur, wenn Technologien transparent sind. Systeme müssen z.B. über offene Datenökosysteme vertrauenswürdig anwendbar sein und Entscheidungen nachvollziehbar erklären können. Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer müssen aktiv in die Einführung neuer Technologien eingebunden werden.

3. Soziale Verantwortung und Teilhabe

Die Einführung von SDI darf nicht zu einer Spaltung zwischen hochqualifizierten Experten und einer abgehängten restlichen Belegschaft führen. Unternehmen und Politik sind gefordert, neue Formen der Mitbestimmung, soziale Sicherungssysteme und flexible Arbeitsmodelle zu entwickeln, um den Wandel für alle positiv zu gestalten.

6.3 Für die Politik

1. Standardisierung europäisch und strategisch vorantreiben

Die Förderung der deutschen sowie europäischen Normungsarbeit muss ausgebaut werden, um Abhängigkeiten von US und China zu reduzieren und die Teilnahme an internationaler Normungsarbeit sicherzustellen.

2. Regulatorische Klarheit schaffen

Doppelregulierung muss vermieden werden. Industrielle KI sollte aus dem AI-Act rausgenommen werden, insoweit sie bereits von sektoraler Regulierung (bspw. Maschinen-Verordnung) abgedeckt ist.

3. Energiepolitische Weichen stellen

Politische Maßnahmen zur Senkung von Energiekosten, zum Ausbau leistungsfähiger Netze und Recheninfrastrukturen (inkl. EdgeAI) sowie zur Bereitstellung erneuerbarer Energien sind eine zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige Industrial-AI-Strategie.

4. Innovationsförderung breit anlegen

Fördermaßnahmen sollten das gesamte industrielle KI-Ökosystem abdecken. Darunter fallen auch Modellregionen und Testfelder für SDI und agentenbasierte KI, in denen Industrie, Forschung und KMU zusammenarbeiten.

 Industrie	 Politik	 Gesellschaft
<ol style="list-style-type: none">1. Technische Interoperabilität sichern2. Evolution statt Disruption3. Fachkräfte durch KI entlasten4. Neue Geschäftsmodelle	<ol style="list-style-type: none">1. Standardisierung europäisch und strategisch vorantreiben2. Regulatorische Klarheit schaffen3. Energiepolitische Weichen stellen4. Innovationsförderung breit anlegen	<ol style="list-style-type: none">1. Qualifizierung und Bildung2. Vertrauen und Akzeptanz3. Soziale Verantwortung und Teilhabe
Doppelversprechen: Produktivitätssteigerung und Abfederung des Fachkräftemangels	Klarer Gestaltungsauftrag	Mensch-Maschine-Dialog neu definieren

Abbildung 7 Handlungsempfehlungen

7 Fazit: Der entscheidende Moment für den Schritt zur Software Defined Industry

Dieses White Paper hat gezeigt: Die Technologien sind technisch gereift, erste erfolgreiche Pilotprojekte belegen den Mehrwert. Doch der Weg in die breite industrielle Nutzung ist komplex und mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Entscheidend ist, diese Chancen und Risiken realistisch einzuordnen und konkrete Handlungsfelder abzuleiten.

Für die Industrie bedeutet SDI ein doppeltes Versprechen:

Produktivität kann signifikant gesteigert werden – nicht nur durch Effizienzgewinne, sondern auch durch neue Geschäftsmodelle wie „Production-as-a-Service“ oder datengetriebene Services. Gleichzeitig wird der Fachkräftemangel abgefedert, da Routineaufgaben automatisiert werden und Fachkräfte sich stärker auf wertschöpfende Tätigkeiten konzentrieren können. Die Industrie muss diesen Wandel aktiv gestalten: durch schrittweise Migration in hybride Systeme, konsequente Standardisierung, den Aufbau neuer Geschäftsmodelle und die Qualifizierung der eigenen Belegschaft.

Für die Gesellschaft eröffnet sich eine Chance, den Mensch-Maschine-Dialog neu zu definieren:

SDI und agentenbasierte KI entlasten Beschäftigte von monotonen Aufgaben, erhöhen die Transparenz und verbessern die Entscheidungsgrundlagen. Gleichzeitig entstehen neue Berufsbilder – vom KI-Systemtrainer bis zum Digital-Twin-Spezialisten. Damit dieser Wandel akzeptiert wird, müssen Vertrauen, Nachvollziehbarkeit und Transparenz im Zentrum der Systemgestaltung stehen. Nur wenn KI als „Assistenzpartner“ erlebt wird, stärkt sie das Gefühl von Selbstwirksamkeit und Teilhabe.

Für Politik und Regulierung entsteht ein klarer Gestaltungsauftrag:

Technologische Souveränität setzt voraus, dass offene Standards gefördert, Doppelregulierungen vermieden und Energiepreise für industrielle Anwendungen wettbewerbsfähig gestaltet werden. Europa kann sich hier als globaler Normsetzer profilieren – vorausgesetzt, Politik und Industrie treiben Standardisierung und internationale Governance aktiv voran. Gleichzeitig müssen Förderinstrumente insbesondere den Mittelstand adressieren, um Skalierung und Teilhabe im gesamten industriellen Ökosystem zu ermöglichen.

Die kommenden Jahre werden entscheidend dafür sein, ob Deutschland seine Position als führender Industriestandort behaupten und ausbauen kann. Der Einsatz von KI-Agenten und digitalen Zwillingen ist mehr als eine technologische Option – er ist eine strategische Notwendigkeit. Erfolgreiche Umsetzung erfordert die Koordination von Industrie, Gesellschaft und Politik. Gelingt diese Koordination, kann die deutsche Industrie nicht nur ihre eigene Wettbewerbsfähigkeit sichern, sondern auch international Maßstäbe setzen. Dies betrifft sowohl technologische Exzellenz als auch die Umsetzung eines ganzheitlichen, nachhaltigen Industrial-AI-Ökosystems, das Standards, regulatorische Klarheit und Energiepolitik in Einklang bringt.

Die industrielle Produktion steht an einem Wendepunkt, der über die künftige Wettbewerbsfähigkeit ganzer Volkswirtschaften entscheidet. Mit der Software Defined Industry (SDI) und agentenbasierten KI-Systemen (Agentic AI) wird ein Paradigmenwechsel eingeläutet, der weit über klassische Industrie-4.0-Konzepte hinausgeht. Die Trennung von Hard- und Software, die Einführung standardisierter Datenmodelle und die Nutzung verteilter KI-Agenten für einzelne Produkte und Ressourcen schaffen Produktionssysteme, die flexibel, resilient und adaptiv arbeiten können.

Wer jetzt investiert, schafft die Grundlage für Resilienz, Innovationsführerschaft und neue Märkte.

Wer zögert, riskiert Abhängigkeiten von außereuropäischen Anbietern und den Verlust strategischer Handlungsspielräume.

Autoren und Mitwirkende

Das White Paper wurde im ZVEI Fachverband Automation von der Task Force "Produktion der Zukunft" erarbeitet. Folgende Unternehmen und Institutionen waren hierbei beteiligt:

- Stefan Basenach, ABB AG
- Martin Hankel, Bosch Rexroth AG
- Dr.-Ing. Heiko Stichweh, Lenze SE
- Johannes Kalhoff, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG
- Olaf Graeser, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG
- Dr. Hans Krattenmacher, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG
- Rainer Brehm, Siemens AG
- Dr. Michael Schrapp, Siemens AG
- Erik Scepanski, Siemens AG
- Dr. Jan Stefan Michels, Weidmüller Interface GmbH & Co. KG
- Prof. Dr. Martin Ruskowski, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) / Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
- Stephan Hamm, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) / Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
- Dr. Henning Gösling, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) / Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
- Simon Jungbluth, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) / Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
- Alexis Bernhard, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) / Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
- Pascal Rübel, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) / Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
- Ruslan Bernijazov, Fraunhofer IEM
- Arno Kühn, Fraunhofer IEM
- Tommy Falkowski, Fraunhofer IEM
- Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, Fraunhofer IEM
- Dr. Thomas Clausen, ZVEI e.V.
- Marius Meiß, ZVEI e.V.
- Angelina Marko, ZVEI e.V.
- Tamara Stahl, ZVEI e.V.

Impressum

ZVEI e. V. • Verband der Elektro- und Digitalindustrie • Amelia-Mary-Earhart-Str. 12 • 60549 Frankfurt a. M.
Lobbyregisternr.: R002101 • EU Transparenzregister ID: 94770746469-09 • www.zvei.org

Kontakt

Gunther Koschnick • Bereichsleiter Industrie • Bereich Industrie

Tel.: +49 69 6302-318 • Mobil: +49 162 2664-907 • E-Mail: gunther.koschnick@zvei.org

Datum: 05.11.2025