smartAI
by VDI

WHITEPAPER

Jetzt lesen!

Industrial AI

Wie Künstliche Intelligenz die Ökonomie und das Engineering in die nächste industrielle Revolution führt

Industrial AI

Wie Künstliche Intelligenz die Ökonomie und das Engineering in die nächste industrielle Revolution führt

Künstliche Intelligenz (KI) dringt mit hohem Tempo in unsere beruflichen und privaten Lebensbereiche vor. KI-Werkzeuge ermöglichen erhebliche Leistungs- und Produktivitätssteigerungen. Sie verändern die Art und Weise, wie wir arbeiten, kommunizieren, Informationen aufbereiten, kreative Aufgaben lösen und technische Systeme entwickeln.

Kaum ein Thema prägt die aktuellen Diskussionen so stark wie die Auseinandersetzung mit KI und deren Nutzungsoptionen in der industriellen Praxis, im Engineering, im Handel und in der Logistik. Neun der zehn wertvollsten börsennotierten Unternehmen der Welt profitieren bereits unmittelbar von KI. Die Haupteinsatzgebiete lagen bisher im Bereich der B2C-Anwendungen und zunehmend auch in der Enterprise AI.

Gleichzeitig zeichnet sich eine neue Welle der KI-Innovation ab, die auch die industrielle Wertschöpfung grundlegend verändern kann. Neben den überwiegend digitalen Anwendungen der Enterprise AI gewinnen KI-Systeme an Bedeutung, die unter industriellen Bedingungen zuverlässig mit Anlagen, Maschinen und Prozessen der materiellen Welt zusammenwirken. Diese Entwicklung erweitert das Spektrum der Industrial AI erheblich.

Weltweit investieren Technologieunternehmen, Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen in industrielle KI, Robotik und zunehmend autonome Systeme. Insbesondere neue Entwicklungen in der KI-basierten Robotik eröffnen beträchtliche Potenziale, auch wenn ihre industrielle Einsatzreife jeweils gesondert nachzuweisen ist. KI wird damit zu einem wichtigen Teil der Infrastruktur industrieller Wertschöpfung und zu einem Faktor für Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz, Sicherheit und technologische Souveränität.

Zugleich sinken die Kosten für die Nutzung vieler leistungsfähiger KI-Modelle deutlich. Der Wettbewerbsvorteil liegt daher nicht allein im Zugang zu diesen Modellen, sondern insbesondere in ihrer verlässlichen Integration in industrielle Produkte, Prozesse und Maschinen sowie in der Verbindung mit industriellen Daten und Domänenwissen

Ziel: Orientierung geben - Begriffliche Klarheit schaffen

Auf diesem Entwicklungspfad bleiben zahlreiche Fragen offen: Wie wird Industrial AI in den kommenden Jahren industrielle Wertschöpfungsketten verändern? Wie kann es gelingen, die Nutzungspotenziale von KI in die Welt des mechatronischen Systems Engineering zu übertragen? Und welche Herausforderungen sind dabei zu bewältigen?

Gleichzeitig werden die mit der Industrialisierung von KI-Lösungen verbundenen Schlüsselbegriffe derzeit uneinheitlich verwendet. Für eine ingenieurwissenschaftliche und anwendungsbezogene Betrachtung ist dies unzureichend, da sich ohne trennscharfe Begriffe weder Technologien einordnen, noch Reifegrade und Anwendungen bewerten lassen.

Dieses Whitepaper soll daher Orientierung schaffen und dazu beitragen, Begrifflichkeiten im Umfeld des industriellen Einsatzes von KI-Methodenansätzen zu schärfen und diese im Gesamtkontext einzuordnen. Ein besonderer Fokus soll dabei der „Embodied AI“ und ihrer Integration in mechatronische Systeme gewidmet sein sowie am Beispiel aktueller Entwicklungen der Robotik veranschaulicht werden.

Weitere Ziele sind die Beantwortung der eingangs aufgeworfenen Leitfragen sowie eine Ableitung des Handlungs- und

Entwicklungsbedarfs für Ingenieurinnen und Ingenieure, Innovierende in Führungs- und Strategieverantwortung.

Die komplette industrielle Wertschöpfungskette im Blick

Industrial AI stellt einen bedeutenden Entwicklungs- und Wachstumsbereich dar. Sie beschreibt den Einsatz von KI entlang der gesamten industriellen Wertschöpfungskette – von Forschung und Entwicklung über Engineering, Produktion, Energie und Logistik bis hin zu Service und Recycling; den gesamten Lebenszyklus begleitend. Sie kombiniert maschinelles Lernen, generative KI, Robotik, digitale Zwillinge und IoT, um industrielle Prozesse datengetrieben, zunehmend autonom und kontinuierlich optimiert zu gestalten. Dabei steht der Anspruch im Vordergrund, KI-basierte Lösungen unter den Rahmenbedingungen industrieller Fertigung und Logistik und unter Wahrung der typischen Reifegrad-, Robustheits-, Sicherheits- und Taktanforderungen einzusetzen.

Ihre Grundlage bilden drei einzigartige Ressourcen der Industrie: umfangreiche Industriedaten aus Sensoren, Maschinen und Prozessleitsystemen, jahrzehntelang aufgebautes Engineering- und Domänenwissen sowie die physische Infrastruktur aus Anlagen, Fabriken, Energienetzen und Logistiksystemen. Industrial AI verbindet diese drei Welten zu intelligenten Systemen, die Entscheidungen unterstützen, Prozesse automatisieren und ganze Wertschöpfungsketten resilienter, produktiver, sicherer und nachhaltiger machen.

Von spezialisierter industrieller KI zu Basismodellen

Bereits vor dem Durchbruch der generativen KI konnten zahlreiche Einzelprozesse in Industrieunternehmen mithilfe neuronaler KI-Modelle verbessert oder vollständig automatisiert werden. Diese hochspezialisierten Anwendungen wurden für klar abgegrenzte Aufgaben entwickelt und häufig mit überwachten Lernverfahren trainiert. Dazu mussten oftmals große Mengen aufgabenspezifischer Daten gewonnen und annotiert werden. Zu den bekannten Einsatzgebieten gehören Personalwesen, Finanzen, Einkauf und Vertrieb; in der Fertigung beispielsweise sensorbasierte Qualitätskontrolle, vorausschauende Wartung sowie die Optimierung von Material- und Energieverbrauch.

Mit dem Durchbruch großer, auf der Transformer-Architektur basierender Sprachmodelle trat eine neue Generation von KI-Systemen hervor. Durch das Vortraining auf umfangreichen und vielfältigen Datenbeständen erwerben diese Modelle breites Welt- und Fachwissen und Fähigkeiten, die sich auf unterschiedliche Aufgaben übertragen lassen – auch auf solche, für die sie nicht eigens trainiert wurden. Vergleichbare Modelle wurden für Bilder, Videos, Zeitreihen und weitere Datenarten entwickelt. Weil sie als gemeinsame Grundlage zahlreicher Anwendungen dienen können, bezeichnet man sie als Basismodelle (Foundation Models).

Für spezielle Anwendungen können Basismodelle durch fortgesetztes Vortraining (Continued Pretraining) oder gezieltes Nachtrainieren (Fine-Tuning) angepasst werden. Häufig genügt es, zusätzliche Informationen und Beispiele mit der Anfrage bereitzustellen (In-Context Learning) oder relevante Inhalte aus externen Wissensquellen abzurufen (Retrieval-Augmented Generation, RAG). Anders als beim Nachtrainieren werden hierbei die Modellparameter nicht verändert.

Besonders bedeutsam sind multimodale Basismodelle, die unterschiedliche Datenarten gemeinsam verarbeiten und beispielsweise Sprache, Bilder und Videos miteinander verknüpfen. Solche Modelle können zu einem wichtigen technologischen Rückgrat der Industrial AI werden. Industrielle Multimodalität umfasst jedoch zusätzlich Sensordaten, Maschinenzustände, Steuerungssignale und zeitliche Prozessverläufe. Ihre Nutzung verlangt, physikalische, chemische, logistische und sensorische Zusammenhänge einschließlich zeitlicher Dynamik und kausaler Bedingungen zu berücksichtigen.

Es ist nicht zu erwarten, dass allgemeines Vortraining sämtliche Varianten komplexer Fertigungsprozesse und Produktionsumgebungen hinreichend abdeckt. Neben der Einbindung von Domänenwissen werden deshalb weitere Verfahren zur Anpassung benötigt, etwa fortgesetztes Vortraining mit industriellen Daten, Fine-Tuning, simulationsgestütztes und interaktionsbasiertes Lernen. Zugleich bleiben bewährte spezialisierte KI-Modelle für viele Aufgaben unverzichtbar: Sie liefern oft hohe Genauigkeit, geringe Latenz und verlässlich prüfbare Ergebnisse bei niedrigen Rechenkosten. Künftige industrielle KI-Systeme werden daher vielfach Basismodelle und Spezialmodelle in hybriden Architekturen verbinden. Ob und in welchem Umfang Basismodelle Spezialmodelle langfristig ersetzen werden, ist offen.

Industrial AI im Zusammenspiel mit Physical AI und Enterprise AI

Enterprise AI verbindet allgemeine und spezialisierte KI-Modelle mit Unternehmensdaten, Wissensgraphen, Geschäftsanwendungen und digitalen Workflows zu einem intelligenten Unternehmensökosystem. Agenten können Informationen analysieren, Aufgaben planen, Entscheidungen vorbereiten und komplexe Prozesse über Organisationsgrenzen hinweg koordinieren.

Der entscheidende Engpass liegt dabei häufig nicht im allgemeinen Leistungsvermögen der Modelle, sondern im Zugang zu unternehmensspezifischem Erfahrungswissen, Prozessen und Governance-Regeln, die Unternehmen über Jahre aufgebaut haben. Enterprise AI verändert damit nicht nur einzelne Aufgaben, sondern auch die Art, wie Unternehmen planen, entscheiden und zusammenarbeiten.

Während Enterprise AI vor allem die Informationsverarbeitung, Wissensarbeit und betrieblichen Abläufe unterstützt, finden viele Kernprozesse der industriellen Wertschöpfung unmittelbar in der materiellen Welt und im Zeittakt der Produktion statt. Beide Anwendungsbereiche überschneiden sich, etwa bei der Planung und Koordination physischer Prozesse.

Für die Industrial AI stellt die Physical AI die Ausführungs- und Handlungsebene in der materiellen Welt bereit. Der Begriff Physical AI ist allerdings nicht auf industrielle Anwendungen beschränkt: Er umfasst KI-Systeme, die physische Zustände wahrnehmen, deren Veränderungen vorhersagen und Handlungen in der realen Welt beeinflussen oder ausführen. In industriellen Umgebungen verbindet sie etwa Sensordaten, Kamerabilder, Maschinenzustände, digitale Zwillinge und physikalische Modelle, um unter Echtzeit-, Sicherheits- und Robustheitsanforderungen zu handeln.

Eine verbreitete heutige Form des industriellen KI-Einsatzes besteht darin, dass ein vorab trainiertes Modell eine eng umgrenzte Funktion in einem physischen Prozess unterstützt, etwa bei der Qualitätsprüfung fehlerhafter Bauteile. Häufig liefern solche Modelle Klassifikationen, Prognosen oder Handlungsempfehlungen; die tatsächliche Wirkung auf den Prozess erfolgt über konventionelle Steuerungen oder menschliche Entscheidungen. Dabei ist zwischen der Rückkopplung von Wahrnehmung und Handlung und einer Veränderung der Modellparameter durch Lernen im laufenden Betrieb zu unterscheiden. Ein System kann in einem geschlossenen Regelkreis arbeiten, ohne online zu lernen.

Solche Systeme können in ihren jeweiligen Aufgabenfeldern sehr leistungsfähig sein. Zugleich bleibt die Übertragung auf neue Situationen und komplexe Handlungsfolgen eine Herausforderung. Beobachtungsdaten liefern zunächst statistische Zusammenhänge; kausale Beziehungen lassen sich daraus nur unter zusätzlichen Annahmen, mithilfe von Domänenwissen oder geeigneten experimentellen und interventionellen Verfahren erschließen. Die Forschung an World Models und Spatial Intelligence zielt darauf, die Vorhersage und Planung physischer Vorgänge weiterzuentwickeln und einen kontrollierten Umgang mit der materiellen Welt

zu ermöglichen.

Große Sprach- und Bildmodelle profitieren von sehr umfangreichen öffentlich verfügbaren Daten. Für die Dynamik mechatronischer Systeme und die Wirkungen konkreter Handlungen existieren dagegen oft keine vergleichbar großen, frei verfügbaren und unmittelbar übertragbaren Datensammlungen. Neben Simulationen und industriellem Domänenwissen bleiben deshalb geeignete Prozess- und Interaktionsdaten besonders wichtig.

Bei Robotern beispielsweise müssen daher anwendungsspezifisch Kraft-Weg-Verläufe, taktile Signale und Bewegungsdaten durch physische Handlung erzeugt werden. Neura Robotics hat dazu beispielsweise standardisierte Gyms als Trainingsumgebungen definiert, in welchen Greif- und Fügeprozesse beispielsweise explizit durch physische Handlungen und Menschen als Interaktionspartner erzeugt und für die Modellanpassung trainiert werden.

Eine besondere Form der Physical AI liegt vor, wenn KI in verkörperten Systemen wie Maschinen, Robotern oder Fahrzeugen eingesetzt wird, deren Wahrnehmung und Handlungsfähigkeit wesentlich durch ihre physische Gestalt, Sensorik und Aktorik bestimmt werden. Diese Form wird als Embodied AI bezeichnet.

Embodied AI bezeichnet KI in einem physischen, mit Sensorik und Aktorik ausgestatteten System, dessen Körper und Interaktion mit der Umgebung für die Lösung seiner Aufgaben wesentlich sind. Dazu können auch Systeme gehören, deren erlernte Fähigkeiten im Betrieb unverändert bleiben und die nicht über ein explizites internes Weltmodell verfügen.

Eine weiterführende Entwicklungsstufe verbindet diese Verkörperung mit aktiver Wahrnehmung, prädiktiver Weltmodellierung und Lernen aus eigenen Interaktionen. Marco Huber hat hierfür das Konzept der Advanced Embodied AI entwickelt und vorgeschlagen. Es bezeichnet im vorliegenden White Paper eine anspruchsvolle, lern- und modellgestützte Ausprägung verkörperter KI.

Advanced Embodied AI beruht nach dem von Marco Huber vorgeschlagenen Konzept auf dem Zusammenwirken von vier Merkmalen:

- **Verkörperung:** Das mechatronische System besitzt einen physischen Funktionsträger, dessen Gestalt, Aktorik und Sensorplatzierung Teil der Problemlösung sind, nicht bloß Ausführungsperipherie. Neben der Integration von Sensorik, Aktorik, Mechanik und Algorithmik bedeutet Verkörperung, dass ein Teil der Aufgabenlösung in die Mechanik verlagert werden kann. Für den Maschinen- und Anlagenbau verlangt dies ein Co-Design von Hardware und Algorithmik.

- **Geschlossene sensomotorische Schleife:** Wahrnehmung und Handlung sind über die physische Welt gekoppelt. Das System kann die Konsequenzen eigener Eingriffe erfassen und für seine weiteren Handlungen berücksichtigen.

- **Interne Weltmodellierung:** Das System verfügt über prädiktive Repräsentationen von Umgebung, Prozess und eigenem Zustand und kann mögliche Handlungsfolgen und Alternativen intern bewerten.

- **Lernen durch Interaktion:** Das System kann seine Kompetenz auf Grundlage eigener Handlungen und ihrer beobachteten Konsequenzen weiterentwickeln, ergänzend zu vorab bereitgestellten Trainingsdaten. Der Handlungsspielraum bleibt industriell begrenzt: von der Parameteranpassung im freigegebenen Prozessfenster über die Auswahl validierter Fähigkeiten bis hin zur komplexeren Aufgabenplanung.

Advanced Embodied AI wird in industriellen Anwendungen auf absehbare Zeit unter

menschlicher Aufsicht und innerhalb spezifizierter Handlungsräume operieren. Wichtige Anwendungsfelder sind die Entwicklung smarter Produktionssysteme, autonomer mobiler Roboter (AMR) und neuartiger humanoider Roboter.

Damit verschieben sich der Nutzerfokus und die nötigen Kompetenzen von der Software- und Algorithmen-Entwicklung in den ingenieurwissenschaftlichen Bereich, erweitert um die Herausforderung, technische Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Produkte und Dienstleistungen im Einsatzumfeld der industriellen Produktion und Logistik nachzuweisen. Eine immense Chance für den Ingenieurstandort Deutschland!

Industrial AI und Enterprise AI ergänzen und überschneiden sich. Während Enterprise AI vor allem Unternehmensfunktionen, Wissensarbeit und Geschäftsprozesse adressiert, umfasst Industrial AI die gesamte industrielle Wertschöpfung einschließlich Engineering, Produktionsplanung, Fertigung und Service. Die Verwaltung von Anlagen, Flotten und Gebäuden zeigt, wie eng digitale Unternehmensprozesse und physische industrielle Abläufe verbunden sein können.

Das Zusammenspiel der Konzepte

Die drei Perspektiven (vgl. Abb. 1) lassen sich für die Architektur eines zunehmend autonomen Industrieunternehmens wie folgt miteinander verbinden:

- **Industrial AI umfasst KI-Anwendungen entlang der industriellen Wertschöpfungskette und richtet sich auf den geschäftlichen sowie technischen Nutzen.**
- **Physical AI stellt für die Industrial AI die Ausführungs- und Handlungsebene in der materiellen Welt bereit; Embodied AI bezeichnet dabei verkörperte, physisch interagierende KI-Systeme.**
- **Enterprise AI unterstützt und orchestriert Wissensarbeit, Geschäftsprozesse und Entscheidungsabläufe in der Unternehmens-IT**

Siehe Abbildung 1: Referenzarchitektur eines zunehmend autonomen Industrieunternehmens – Zusammenspiel von Industrial AI, Physical AI und Enterprise AI auf Seite 10.

Im Zusammenspiel dieser Perspektiven liegt ein Kern der nächsten industriellen Transformation: Enterprise AI unterstützt die Orchestrierung unternehmerischer Abläufe, Industrial AI adressiert die industrielle Wertschöpfung, und Physical AI ermöglicht Wahrnehmung und Handlung in der materiellen Welt.

Die Integration dieser Perspektiven eröffnet die **Vision des Autonomous Enterprise** – eines Unternehmens, in dem Menschen und KI-Fabriken, Energienetze, Lieferketten und Geschäftsprozesse gemeinsam steuern. Die bisher deterministisch geprägte Automationspyramide wird dabei um lernende und probabilistische Komponenten erweitert. Bewährte funktionale Ebenen, Schnittstellen und die Anforderungen an Datenverfügbarkeit, Reaktionszeiten und Sicherheit bleiben weiterhin wichtig.

KI im Körper – Robotik als Pionierdisziplin der Embodied AI

Konventionelle Robotik verfügt bereits über differenzierte sensorische Rückkopplung, adaptive Regelung und hohe Präzision. Ein humanoider Roboter ist zunächst jedoch eine Bauform und nicht bereits der Nachweis weitreichender intelligenter Fähigkeiten. Embodied AI beginnt dort, wo KI-Fähigkeiten mit der physischen Verkörperung und der Interaktion mit der Umgebung funktional verbunden werden; Advanced Embodied AI geht darüber hinaus und verknüpft Verkörperung, sensomotorische Rückkopplung, interne Weltmodelle und Interaktionslernen.

Der Einsatz von KI dehnt sich gerade mit hohem Tempo in die *smarte Robotik* und die physische Welt der Automation aus. Die traditionelle Automatisierung erweitert und wandelt sich. Während klassische Industrieroboter über Jahrzehnte primär abgeschirmt und programmierbasiert betrieben wurden, entstehen zunehmend kognitive Systeme, die Menschen direkt wahrnehmen, ihre Absichten interpretieren und auf Sprache, Gestik, Berührung oder Demonstrationen reagieren. Die Zukunft liegt in der Kombination aus Präzision und Zuverlässigkeit bewährter industrieller Automatisierung und den Fähigkeiten KI-gestützter Systeme.

Treiber dieser Entwicklung sind Fortschritte in der Nutzung von KI beim maschinellen Sehen (Machine Vision), der Sprachverarbeitung (NLP, Natural Language Processing), der Integration und Nutzung taktiler Sensoren sowie bei mobilen und kraftgeregelten Robotersystemen, die mit der echten, der physischen Welt, interagieren oder diese betrachten. Sie nehmen ihr Umfeld über verschiedene Sensoren und Kameras wahr und erschließen so wichtige kognitive Fähigkeiten: Sehen - Hören - Fühlen - Wahrnehmen - Aktionen ableiten - autonom arbeiten. Diese Stationen charakterisieren den Entwicklungspfad, den viele innovative Firmen eingeschlagen haben.

Vor allem die humanoiden Roboter elektrisieren mit beeindruckenden, meist einstudierten Bewegungen. Sie gehen auf zwei Beinen, tanzen, springen und greifen Gegenstände auf Messen, in Videos und einfachen Demonstrationen. Ihr schneller Entwicklungsfortschritt führt zu beachtlichen Technologieschüben in der klassischen Prozessautomation, der ortsfesten Industrierobotik, bei Autonomen Mobilen Robotern, die selbsttätig sicher navigieren und autonom arbeiten, und in der Servicerobotik.

KI muss in Robotersystemen unter realen Einsatzbedingungen zuverlässig wirken. Große vortrainierte Modelle können dabei breites Vorwissen über Objekte, Sprache und Aufgabenstrukturen bereitstellen. Ihr Beitrag reicht von Wahrnehmung und Kommunikation bis zur Planung von Handlungsfolgen, etwa mithilfe von Vision-Language-Action-Modellen. Für Advanced Embodied AI ist entscheidend, wie diese Fähigkeiten mit Sensorik, Aktorik, internen Weltmodellen und interaktionsbasiertem Lernen verbunden werden.

Aus Beobachtungsdaten vortrainierte Modelle besitzen nicht automatisch verlässliche Kenntnisse über die Wirkungen eigener Eingriffe. Solche Zusammenhänge können mithilfe physikalischer Modelle, Simulation, gezielter Datenerhebung und praktischer Interaktion erschlossen und überprüft werden. Für die Anpassung an konkrete Anwendungen kommen unter anderem Fine-Tuning, Imitation Learning und weitere interaktionsbasierte Lernverfahren infrage. Neura Robotics baut hierzu Applikationslabore (Neura Gyms) auf, in denen Handhabungs-, Füge- und Montageprozesse mit menschlicher Beteiligung erfasst und für die Modellanpassung genutzt werden können.

Entscheidend im Gesamtkontext ist die Orchestrierung der vielen Roboteranwendungen. Was künftig zählt, sind nicht nur präzise Roboterkinematiken, neueste Vision-Language-Action-Modelle oder ein auf die Anwendung abgestimmtes maschinelles Lernen, sondern die Generalisierung und Verbesserung der Trainingseffizienz sowie die Einbettung der Systemarchitekturen und Komponenten in leistungsstarke Ökosysteme. In der Robotik zeichnet sich diese Ökosystembildung derzeit bereits ab. Die Modellierung des Werkzeugeinsatzes und dessen Skalierung erfordert die unmittelbare Interaktion von Roboterarm und Endeffektor sowie die Zerlegung der Manipulationsaufgabe in generalisierte, transferierbare Handlungsphasen, deren Zusammenwirken orchestriert werden muss.

Künstliche Intelligenz bildet dabei die entscheidende Verbindungsschicht, die Kontextebene, auf die es ankommt. Für deren Orchestrierung ist Prozess- und ingenieurtechnisches Erfahrungswissen zwingend erforderlich, um das Feintuning der Aktoren und die Modularisierung der an ihrer Ansteuerung

beteiligten vortrainierten KI-Modelle zur schnellen einsatzreife zu bringen.

Die heute bereits in den Entwicklungsabteilungen gelebte Verzahnung des in der Mechatronik verinnerlichten Systemansatzes der zunehmenden Verschmelzung von Hard- und Software, Sensorik mit KI-basierenden Methoden und dem Ökosystemgedanken aus der Informatik zu smarten Systemen und deren intelligentem Zusammenspiel unter industriellen Rahmenbedingungen, stellt eine wichtige Erfolgsvoraussetzung dar, mit der sich der Standort Deutschland eine führende Rolle im Feld der Industrial AI erschließen kann.

Das Zusammenspiel von Industrial AI und den Ingenieurwissenschaften

Die Ingenieurwissenschaften und die bewährte ingenieurwissenschaftliche Praxis mit ihrer besonderen Stärke, industrielle Prozesse sorgfältig zu analysieren und durch das strukturierte, systemorientierte Vorgehen zur Lösung technischer Probleme im industriellen Einsatzumfeld bei gleichzeitiger Erfüllung mit der dort üblichen Zuverlässigkeit beizutragen, sind sehr gefragt. Die Ingenieurinnen und Ingenieure müssen auf dem Feld der Industrial AI das Heft des Handelns in die Hand nehmen. Sie müssen als wichtiges Bindeglied zwischen der den Fortschritt von KI bisher prägenden Informatik und den Verantwortlichen für die automatisierte Produktion und Logistik wirken und ihre Stärken in den Prozess der Industrialisierung von KI einbringen.

Die Ingenieurdisziplinen müssen zum Beispiel ihr Wissen um physikalische Gesetze und Modelle auf der Basis grundlegender Prinzipien (Thermodynamik, Mechanik, Regelungstechnik) einbringen, um vortrainierte KI-Modelle an die jeweiligen Einsatzherausforderungen zu adaptieren. Sie müssen die Generalisierung der Modelle unterstützen und zur raschen Validierung im Versuch beitragen.

Im Gegenzug erweitert die Industrial AI die ingenieurtechnische Praxis um datengestützte digitale Modelle von Werkzeugen und Prozessen, um Simulationen, digitale Zwillinge, vorausschauende Wartung und Prozessoptimierungen, die auch Messgrößen nutzbar machen, welche für Ingenieure zuvor nicht effizient modellierbar waren.

Die Physical AI (Roboter, autonome Maschinen, verkörperte Agenten) schließt wiederum den Kreis, indem sie gelernte Wahrnehmungs- und Planungsfunktionen in jene Regelungshierarchien, Aktuatoren und Sicherheitskonzepte integriert, deren Formalisierung die Ingenieurwissenschaften seit einem Jahrhundert vorantreiben.

Das größte Innovationspotenzial liegt in hybriden Ansätzen - etwa physikalisch fundierten und simulationsbasierten Modellen, modellbasiertem Reinforcement Learning unter strikten Nebenbedingungen sowie Systems-Engineering-Lebenszyklen, bei denen gelernte Komponenten nicht als „Black Boxes“, sondern als technische Bauteile mit definierten Anforderungen, Prüfverfahren und Rückverfolgbarkeit behandelt werden.

Somit kann die Industrial AI auch ohne jede Übertreibung als eine neue Entwicklungsstufe der Ingenieurwissenschaften betrachtet werden. Die Transformation dahin hat zwar gerade erst begonnen, aber sie wird so schnell ablaufen, dass sie immense Herausforderungen für Ausbildung und Weiterbildung mit sich bringt.

Nötig: Kompetenzen zur Realisierung der Industrial AI rasch entwickeln

Die rasanten technologischen Entwicklungen und die damit verbundenen Veränderungen der Arbeitswelt erfordern, dass Menschen kontinuierlich neue Fähigkeiten erlernen und sich anpassen. Neben rein fachlichen Qualifikationen gewinnen Digital- und KI-Kompetenzen sowie ein grundlegendes Verständnis für Daten, digitale Zusammenhänge, Systemintegration und ein ganzheitliches

Systems Engineering an Bedeutung.

Gesucht sind Menschen, die komplexe Zusammenhänge schnell durchdringen und ihr technisches Wissen auf konkrete Anwendungsfelder der Industrial AI übertragen können. Jetzt geht es darum, KI- und Digitalkompetenzen mit industrieller Erfahrung und dem Applikationswissen aus der Produktion - der physischen Wertschöpfung - sinnvoll und schnell zu verknüpfen. Daran entscheidet sich, ob aus einzelnen Pilotprojekten eine skalierbare KI-Transformation und ein tragfähiger Wettbewerbsvorteil für unsere Wirtschaft wird.

Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau ist in diesem Wettrennen überaus vorteilhaft positioniert. Er verdankt seine Spitzenstellung einem gewachsenen Verständnis physikalischer Prozesse und dessen Überführung in präzise, hochverfügbare Maschinen. Dieses spezielle Domänenwissen aus der jahrelangen Auseinandersetzung mit der zuverlässigen Automation von Fertigungs- und Logistikprozessen ist ein unschätzbar großes Asset, das es im weltweiten Wettbewerb um die Industrialisierung der KI rasch zu nutzen gilt.

Was jetzt zu tun ist

Unternehmen benötigen klare Governance-Strukturen und interdisziplinäre Teams, die Produktion, IT und Fachbereiche enger verzahnen als in klassischen Digitalisierungsprojekten. Führung bedeutet dabei, den Einsatz intelligenter Systeme zu steuern sowie das Zusammenspiel von Mensch, Maschine und KI zu orchestrieren, Lernen zu ermöglichen und kontinuierliche Weiterentwicklung organisatorisch zu verankern.
Aufgabe der Ingenieurinnen und Ingenieure ist es, KI aus Pilotanwendungen herauszuholen und in großem Maßstab in die industrielle Fertigung zu integrieren. Doch dieser Übergang wird nicht so schnell vonstattengehen, wie viele glauben.

Entscheidend ist es, den Hype von der Praxis zu trennen und zunächst die richtigen technologischen Grundlagen für diese nächste Stufe der Automatisierung zu schaffen. Erfolgreiche Pionierprojekte reichen auf diesem Entwicklungspfad nicht aus, sie stellen aber einen wichtigen, in seiner Relevanz nicht zu unterschätzenden Anfang dar.

Für den Schritt vom Pionierprojekt zur Akzeptanz im produktiven Einsatz müssen Anbieter von Industrial AI zusätzlich die technische Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ihrer Produkte und Dienstleistungen nachweisen und den aktuellen Rechtsrahmen im Blick haben. Eine offene Flanke stellen insbesondere die besonderen Anforderungen lernender und adaptiver KI-Systeme an Safety und Security dar. Bestehende Normen und Verfahren zur Maschinen- und funktionalen Sicherheit bilden eine wichtige Grundlage. Zusätzliche Herausforderungen entstehen etwa durch die Absicherung von Modelländerungen, Manipulationsschutz, sichere Updates sowie nachweisbar sichere Interaktion zwischen Robotern, Anlagen und Menschen.

Für adaptive und im Feld weiterlernende KI-Komponenten sind Fragen der Freigabe, Wiederfreigabe und Konformitätsbewertung noch nicht in allen Konstellationen hinreichend geklärt. Europäische KI- und Maschinenregulierung sowie bestehende Sicherheitsstandards sind zu berücksichtigen; entscheidend ist die Entwicklung praktikabler Prüf- und Nachweisverfahren für Änderungen des Systemverhaltens über den gesamten Lebenszyklus.

Nötig ist auch eine Intensivierung der firmen- und branchenübergreifenden Zusammenarbeit im Engineering und bei der Systemintegration. Verkörperte Systeme erfordern die gemeinsame Auslegung von Mechanik, Sensorik und Algorithmik. Zwar existieren dafür Vorgehensmodelle, Schnittstellenstandards und Werkzeuge; für die durchgängige Integration lernender Komponenten bestehen jedoch weiterhin erhebliche Standardisierungs- und Entwicklungsbedarfe.

Eine der größten Herausforderungen bleibt die Datengrundlage. Insbesondere Advanced Embodied AI benötigt Interaktionsdaten aus zahlreichen gleichartigen oder ähnlichen Anlagen sowie geeignete Simulationen. Betreiber, Hersteller und Integratoren haben unterschiedliche Interessen an Erhebung, Nutzung und Weitergabe dieser Daten. Tragfähige Modelle gemeinsamer Datennutzung und geeignete technische Schutzmechanismen müssen daher weiterentwickelt werden.

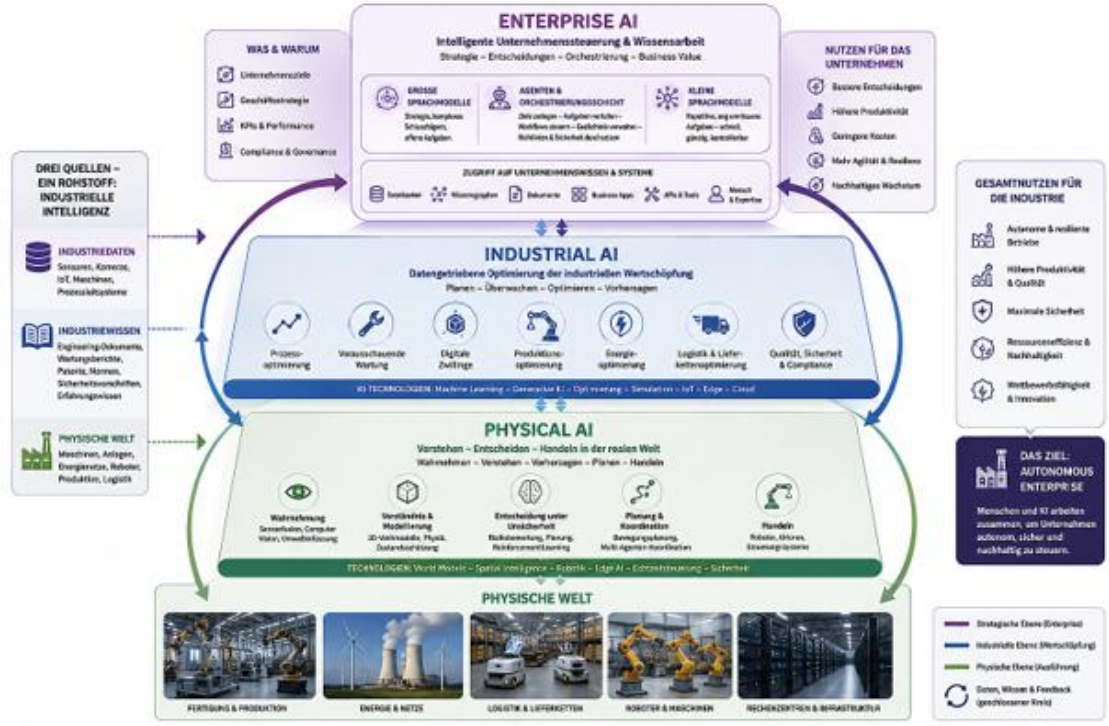

Abb. 1: Referenzarchitektur eines zunehmend autonomen Industrieunternehmens – Zusammenspiel von Industrial AI, Physical AI und Enterprise AI

Autoren



Prof. Dr. Hans Uszkoreit, Scientific Director, DFKI GmbH Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI)

Prof. Dr. Feiyu Xu, Univ.-Professor of Industry AI at German University of Digital Science, Board Members, Senior Advisor

Prof. Dr.-Ing. Marco Huber, Wissenschaftlicher Direktor Digitalisierung und Künstliche Intelligenz, Fraunhofer IPA

Prof. Dr.-Ing. Markus Glück, Robotik und Automatisierungstechnik, Hochschule Aalen, Fakultät Optik & Mechatronik

Die Autoren sind Mitglieder des smartAI Councils, einem Innovations- und Expertenbeirat des VDI Wissensforums. Sie tragen zur Arbeit dieses Gremiums mit Innovationsimpulsen zur Beantwortung ingenieurwissenschaftlicher Fragestellungen rund um die Industrialisierung von Künstlicher Intelligenz bei.

Im smartAI Council bündelt das VDI Wissensforum Begleitaktivitäten zur Kompetenzentwicklung auf dem Feld der industriellen Einsatzpraxis von Künstlicher Intelligenz (KI) – der „Industrial AI".
Die Themen des Councils sind breit gefächert. Sie umspannen Fragestellungen von der branchenübergreifenden Begleitung aktueller technologischer Entwicklungen auf Anwendungsfeldern der KI bis zur Aufbereitung von Handlungsempfehlungen für deren industrielle Nutzung, die Entwicklung nötiger Anwenderkompetenzen, die Förderung des fachlichen Austauschs und die Initiative ingenieurwissenschaftlicher Begleitaktivitäten zur Bewertung aktueller Marktentwicklungen und Unterstützung von Startups inklusive deren Finanzierungsmöglichkeiten.

Das smartAI Council als innovativer Impulsgeber setzt auf das branchenübergreifende Heben von Synergiepotenzialen. Es fördert den bilateralen Austausch und die Vernetzung von Experten aus Industrie, Forschung, Personalentwicklung und Finanzwesen, die in der Entwicklung und Nutzung von Künstlicher Intelligenz (KI) aktiv sind.

Ziel ist es, neu aufkommende Trends und Technologien frühzeitig zu identifizieren, daraus pragmatisch Impulse und Handlungserfordernisse für Forschungs-, Finanzierungs- und Transferaktivitäten abzuleiten und diese in anwendungserprobte, konkrete und branchenübergreifend nutzbare Einsatzempfehlungen zu überführen. Das Council setzt Akzente in Bildung und Praxisdemonstration und trägt aktiv zur Versachlichung von KI-Debatten durch fundierte Fachbeiträge bei.

Ein wesentliches Element der Arbeit des Councils sind vierteljährlich, teilweise hybrid stattfindende Sitzungen mit Impulsvorträgen zu wechselnden Leitthemen. Das Council unterstützt zudem flankierend die Organisation des jährlich stattfindenden VDI-Fachkongresses „smartAI" und dessen thematischer Weiterentwicklung.

Mehr zum *smartAI* Kongress

Am 24./25.11.2026 führt der VDI-Anwenderkongress „smartAI" in Baden-Baden zum zweiten Mal Experten aus Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft zusammen, die ihre Erfahrungswerte über die Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) mit den Teilnehmenden in Vortragsreihen, Deep Dives, interaktiven Austauschformaten und bei Podiumsdiskussionen teilen. Angeboten wird auch dieses Jahr wieder ein hochinteressanter, branchenübergreifender Diskurs zur Nutzung von KI in Produktion, Medizin, Defense und Robotik an. Eine Startup Challenge rundet das jährliche Treffen der smartAI Community gelungen ab.