

Physical AI in der Industrie 4.0

Auf dem Weg in die Fabrik der Zukunft

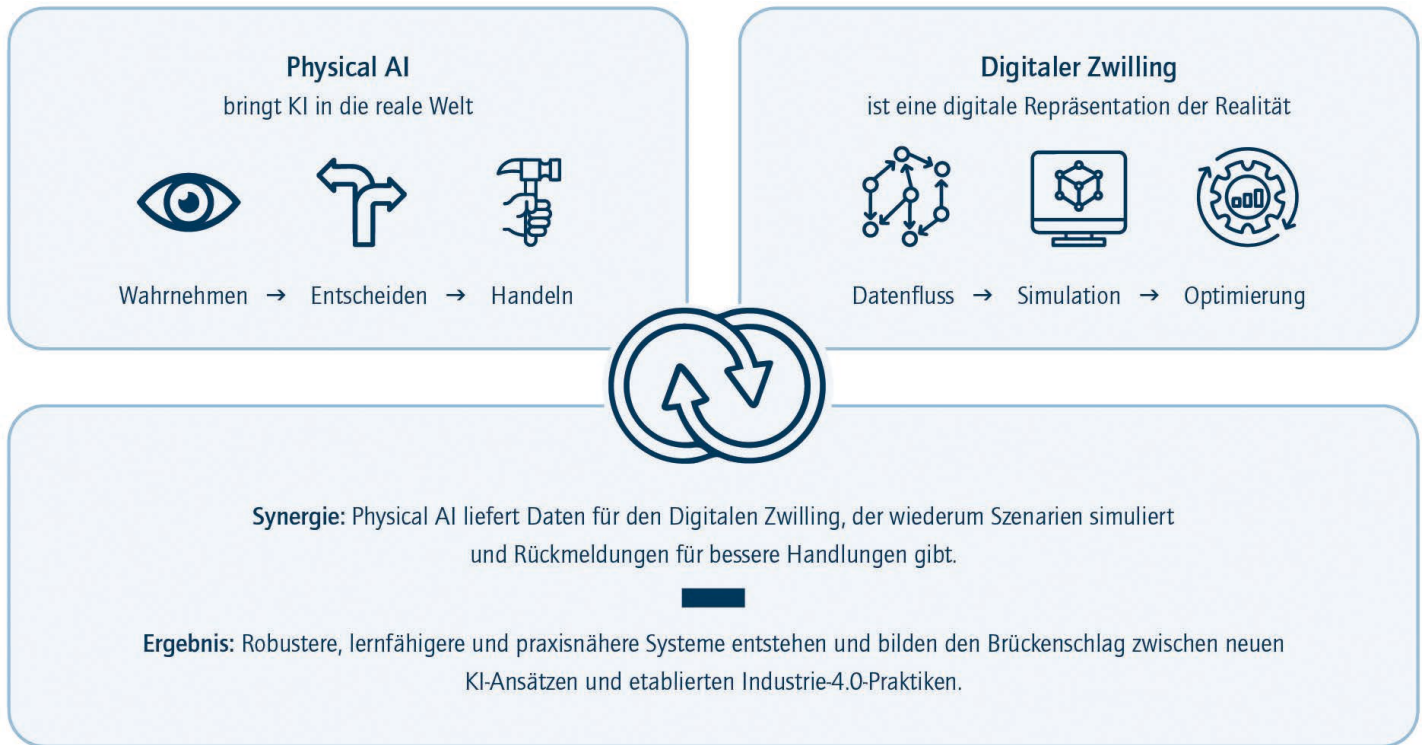


Bild 1: Synergie zwischen Physical AI und Digitalem Zwilling © acatech



© ABB AG/Andreas Henn

Autor:
Dr. Jan-Henning Fabian
Leiter des ABB Forschungszentrums
in Mannheim
acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.
www.acatech.de

Die neue Ausgabe von „ForschungInKürze“ des Forschungsbeirats Industrie 4.0 zeigt, welches Potenzial Physical AI für die Industrie 4.0 hat – und welche Voraussetzungen auf dem Weg zur autonomen Fabrik erfüllt sein müssen.

Künstliche Intelligenz (KI) ist längst Teil industrieller Wertschöpfung: Sie erkennt Muster in Daten, unterstützt Prognosen und hilft, Prozesse digital auszuwerten. Mit Physical AI rückt nun eine Form von KI in den Fokus, die nicht am Bildschirm endet. Sie wird in Maschinen, Anlagen und Robotern wirksam – dort, wo digitale Auswertung in physische Handlung übergeht. Produktionssysteme sollen dadurch ihre Umgebung wahrnehmen, Betriebsdaten interpretieren und daraus Handlungsoptionen für die reale Anlage ableiten können. Damit verschiebt sich der Fokus von KI als Analyzewerkzeug hin zu KI als Teil lernender, adaptiver industrieller Systeme.

Die Grenzen klassischer Automatisierung

Klassische Automatisierung ist stark, wenn Abläufe stabil, Zustände bekannt und Reaktionen eindeutig vorgegeben sind. In komplexen Produktionsumgebungen reicht das jedoch nicht immer aus: Anlagen müssen Energie- und Materialflüsse koordinieren, Qualität sichern, Kosten berücksichtigen, Ausfallzeiten vermeiden und

auf veränderte Rahmenbedingungen reagieren. Gerät ein Prozess aus dem Gleichgewicht oder treten unerwartete Störungen auf, muss der Mensch häufig eingreifen.

Vom Datenstrom zur Steuerungsoption

Physical AI setzt genau an dieser Stelle an. Sie bezeichnet den Einsatz Künstlicher Intelligenz in cyber-physischen Systemen, die mit der realen Welt interagieren. In der Produktion bedeutet das: Maschinen, Anlagen oder Roboter nehmen Daten aus ihrer Umgebung und aus angrenzenden Systemen auf, etwa zu Prozesszuständen, Energieflüssen, Materialverhalten oder externen Randbedingungen. KI-Modelle setzen diese Informationen zueinander in Beziehung:

- Welche Abweichung ist relevant?
- Welche Zielgröße hat Priorität?
- Welche Reaktion wäre unter den aktuellen Bedingungen sinnvoll?

Aus Datenerfassung wird so eine Grundlage für Steuerungsentscheidungen. Eine besondere Rolle kann dabei Agentic AI übernehmen. Gemeint sind KI-Systeme, die auf Basis formaler Zielvorgaben, aktueller Systemzustände und externer Einflussgrößen mögliche Steuerungsoptionen bewerten und in konkrete Vorschläge übersetzen.

Der Handlungsraum bleibt dabei klar begrenzt: Zielwerte, Sicherheitsvorgaben, Freigabeprozesse und Verantwortlichkeiten legen fest, was das System darf. Physical AI führt also nicht zu frei agierenden Anlagen, sondern zu Systemen, die Situationen kontextbezogen bewerten und passende Reaktionen vorbereiten oder innerhalb definierter Grenzen ausführen können.

Der Digitale Zwilling als Prüfstand

Damit KI nicht blind in physische Prozesse eingreift, braucht sie ein belastbares Modell der Anlage. Diese Rolle übernimmt der Digitale Zwilling. Er bildet Maschinen, Anlagen oder Prozesse virtuell ab und verbindet dieses Modell kontinuierlich mit Daten aus dem laufenden Betrieb. So entsteht eine digitale Repräsentation, die Zustände, Wechselwirkungen und mögliche Systemreaktionen spiegelt.

Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass Handlungsoptionen nicht unmittelbar an der realen Anlage erprobt werden müssen. Sie können zunächst im Digitalen Zwilling simuliert und bewertet werden. Erst danach werden Handlungsempfehlungen oder Steuerungsparameter an das physische System zurückgespielt (Bild 1).

So entsteht ein Rückkopplungskreislauf zwischen realer und digitaler Welt. Betriebsdaten aktualisieren den Digitalen Zwilling; Simulationen und Optimierungen verbessern die Entscheidungsgrundlage für den Betrieb. Perspektivisch können ausführbare Digitale Zwillinge diesen Prozess verstärken, indem sie direkt mit Steuerungs- und Regelungssystemen verbunden sind.

Wie Physical AI in eine Prozessanlage integriert werden kann

Bild 2 zeigt, wie der Kreislauf aus realer Anlage, Digitalem Zwilling und Agentic AI in einer automatisierten Prozessanlage funktioniert. Die reale Anlage liefert Betriebsdaten – etwa zu Temperatur, Druck, Füllständen oder Energieflüssen – an die virtuelle Ebene. Dort werden sie mit Modellwissen und externen Faktoren wie Strompreis, Nachfrage oder Optimierungskriterien verknüpft. Der Digitale Zwilling wird so zum Prüfstand für mögliche Eingriffe, bevor Steuerungsimpulse in den laufenden Betrieb zurückgespielt werden.

Aus Messwerten werden damit Szenarien: Was passiert, wenn die Energiezufuhr gedrosselt, Temperatur oder Druck angepasst oder die Anlagenleistung verändert wird? Bewertet wird nicht nur ein einzelner Zielwert, sondern ein Zielkonflikt: Kosten, Energieverbrauch, Durchsatz und Anlagenverfügbarkeit müssen gleichzeitig berücksichtigt werden.

Auf dieser Grundlage kann Agentic AI geeignete Steuerungsoptionen ableiten als Empfehlung für das Betriebsteam oder, innerhalb klar definierter Grenzen, als automatisierte Anpassung. Der Unterschied zur klassischen Automatisierung liegt genau darin: Die Anlage folgt

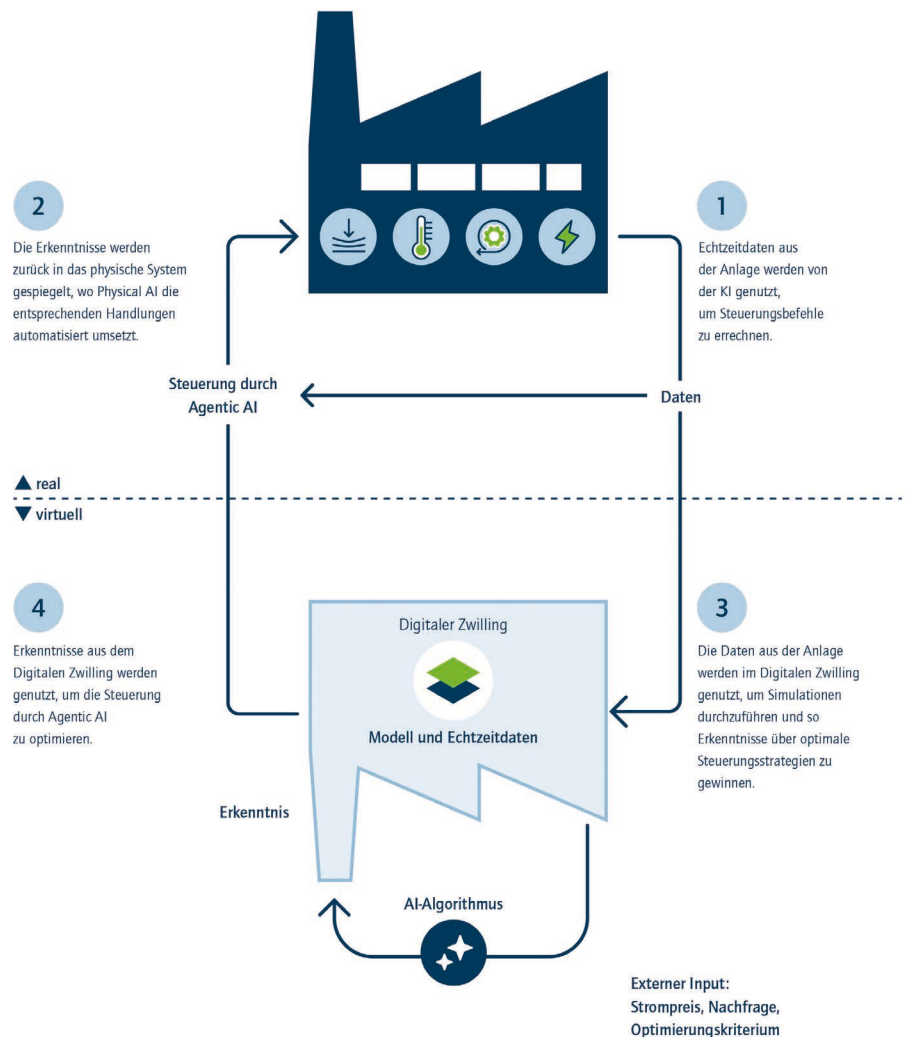


Bild 2: Schema einer automatisierten Prozessanlage mit Digitalem Zwilling und der Steuerung durch Agentic AI © acatech

nicht mehr nur festen Regeln für einzelne Messwerte. Sie bewertet eine komplexe Betriebslage und passt ihr Verhalten daran an.

Robuste Modelle als Erfolgsfaktor

Der industrielle Einsatz von Physical AI steht und fällt mit der Qualität der Modelle. Viele heutige KI-Systeme funktionieren zuverlässig unter den Bedingungen, für die sie trainiert wurden. Physical AI benötigt dagegen Modelle, die sich an neue Umgebungen, Maschinen und Situationen anpassen lassen. Eine adaptive Anlage sollte nicht für jede neue Aufgabe oder veränderte Prozesssituation vollständig neu trainiert werden müssen.

Hier setzen Verfahren wie Continuous Learning, Transfer Learning, Few-Shot Learning und Cross-Domain Learning an. Sie sollen KI-Anwendungen flexibler und robuster machen. Für industrielle Anwendungen kann das bedeuten, dass Maschinen mit minimalem Zusatztraining neue Werkstücke fertigen oder veränderte Abläufe bewältigen.

Sim-to-Real-Gap

Eine aktuell noch große Herausforderung ist der Sim-to-Real-Gap, also die Differenz zwischen Simulation und realer Anlage. Modelle, die in Tests oder Laborumgebungen funktionieren, müssen im Betrieb mit Sensorrauschen, Materialverschleiß, Störfaktoren und dynamischen Umweltbedingungen umgehen.

Der Digitale Zwilling kann diese Lücke verkleinern, indem er Datenfeedback aus der realen Welt kontinuierlich in das Modell integriert und die Basis für Simulationen und Entscheidungen liefert. Rückmeldungen aus der Realität werden kontinuierlich berücksichtigt, damit sich das System selbst verbessern kann.

Vertrauen wird zur technischen Voraussetzung

Je stärker KI-Systeme in physische Prozesse eingreifen, desto wichtiger werden Sicherheit, Erklärbarkeit und Nachvollziehbarkeit. In industriellen Anwendungen genügt es nicht, dass ein System eine plausible Entscheidung trifft.



Bild 3: Entwicklungsstufen auf dem Weg zu Physical AI im Kontext von Industrie 4.0 © acatech

Unternehmen müssen verstehen können, warum eine Maßnahme vorgeschlagen oder ausgelöst wurde – besonders wenn sie Auswirkungen auf Produktqualität, Anlagenverfügbarkeit, Arbeitssicherheit oder Umwelt hat.

Dafür braucht es technische und organisatorische Mechanismen. Logging, Audit-Trails und KI-Monitoring können Entscheidungen dokumentieren und Abweichungen sichtbar machen. Standards und Zertifizierungsverfahren können Vertrauenswürdigkeit nachweisen. Ebenso wichtig sind klare Verantwortungsstrukturen: Wer gibt autonome Funktionen frei, wann muss ein Mensch eingreifen und wie werden unerwartete Systemreaktionen bewertet?

Der Mensch bleibt im Zentrum

Physical AI verändert die Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine. Routinehandlungen können stärker automatisiert werden. Der Mensch wird dadurch aber nicht überflüssig, im Gegenteil. Seine Rolle verschiebt sich: Fachkräfte legen Zielgrößen fest, bewerten Handlungsvorschläge, geben sicherheitskritische Funktionen frei und entscheiden in Grenzsituationen.

Besonders wichtig ist ihr Erfahrungswissen. Viele Beschäftigte kennen Anlagenverhalten, Grenzfälle und implizite Muster, die in keiner Datenbank vollständig erfasst sind. Dieses Wissen muss in digitale Modelle einfließen, damit Physical AI auch aus praktischer

Prozesskenntnis lernt. Zugleich müssen Menschen nachvollziehen können, was die KI tut. Dafür braucht es intuitive Schnittstellen, erklärbare Entscheidungen und neue Formen der Zusammenarbeit.

Schrittweise zur Fabrik der Zukunft

Physical AI steht in der industriellen Anwendung noch am Anfang. Viele Grundlagen für Datenmanagement und Digitale Zwillinge sind bereits vorhanden; auch Sensor-, Maschinen- und Prozessdaten werden vielfach erfasst und vernetzt. Die Einbindung von KI in physische Systeme befindet sich jedoch noch im Forschungsstadium. Demonstratoren und Modellfabriken zeigen Potenziale, skalierbare Anwendungen sind bislang nicht verbreitet.

Der Weg zur autonomen Fabrik führt über mehrere Stufen: Von der Datensammlung über dynamische Digitale Zwillinge und KI-Training in virtuellen Testumgebungen bis hin zur aktiven Steuerung physischer Anlagen durch KI-Systeme. Dafür braucht es klare Leitplanken für Agentic AI, belastbare Modelle sowie leistungsfähige Daten-, Rechen- und Simulationsinfrastrukturen.

Die Fabrik der Zukunft entsteht nicht durch einen einzelnen Technologiesprung. Sie entwickelt sich schrittweise – aus vernetzten Daten, belastbaren Digitalen Zwillingen, robusten KI-Modellen, sicherer Infrastruktur und menschlicher Expertise (Bild 3). Wenn diese Elemente zusammenwirken, kann Physical AI zu einem wichtigen Baustein werden, um industrielle Produktion flexibler, energieeffizienter und resilienter zu gestalten.

Wer schreibt:

Dr. Jan-Henning Fabian ist Mitglied des Forschungsbeirats Industrie 4.0 und leitet seit April 2014 das ABB Forschungszentrum in Mannheim. Die Forschungsschwerpunkte dort umfassen zukünftige Lösungen in der Prozess-, Fabrik- und Gebäudeautomation, Software-Architekturen im Bereich der industriellen Automation sowie Komponenten und Systemaspekte im Kontext der Energiewende. Das Forschungsteam setzt dabei gezielt Techniken der Künstlichen Intelligenz ein und treibt die Entwicklung autonomer Systeme für industrielle Applikationen voran. ◀

Link zur Publikation in „ForschungInKürze“:
<https://www.acatech.de/publikation/forschungsbeirat-physical-ai-industrie/>