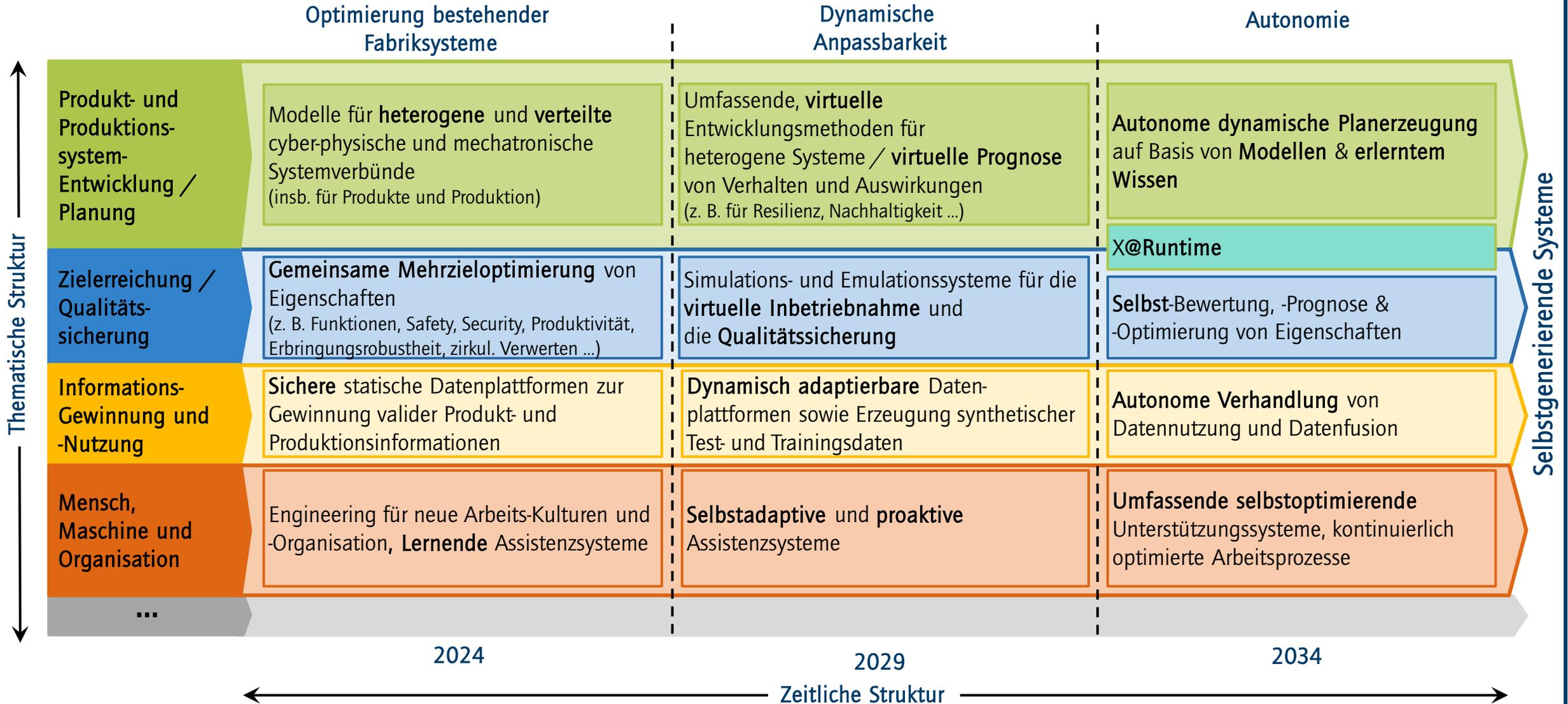


Die Engineering-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0

Präambel

Die vorliegende Engineering-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0 ist von einer eigens für die Roadmaperstellung eingesetzten Strategiekommission gemeinsam mit dem Forschungsbeirat erarbeitet worden. Ziele der Roadmap sind, Orientierung für die Arbeit des Forschungsbeirats zu bieten, einen „roten Faden“ für Expertisen, Impulsberichte und weitere Formate aufzuzeigen sowie die Kommunikation und Themenabstimmung mit der Plattform Industrie 4.0 und den beteiligten Ministerien zu vereinfachen. Die Roadmap adressiert einen Zeitraum von 10 Jahren (beginnend mit dem Jahr 2024), der in drei Hauptzeiträume unterteilt ist. Inhaltlich werden vier Hauptthemen unterschieden. Die in dem sich ergebenden Raster angeordneten Themenblöcke adressieren wichtige Forschungsfragestellungen, die unter der Annahme, dass bestimmte Entwicklungen eintreten werden, sinnvoll aufeinander folgen. Die Themenblöcke bilden einen Rahmen für konkrete Forschungsschwerpunkte, die innerhalb des angegebenen Zeitraums bearbeitet werden können. Die Forschungsschwerpunkte müssen als Verfeinerung der Themenblöcke noch erarbeitet und bis hin zu konkreten Forschungsarbeiten detailliert werden. Es ist davon auszugehen, dass dieser Verfeinerungsprozess für naheliegende Themenblöcke verlässlicher durchgeführt werden kann, als für weit in der Zukunft angeordnete Themenblöcke. Die Anordnung der Themenblöcke beschreibt die zeitliche Lage der Forschungsarbeiten, also nicht den Zeitpunkt der Verfügbarkeit der Ergebnisse. Da es sich hier aufgrund der Forschungsausrichtung des Forschungsbeirats um eine Forschungsroadmap handelt, ist insbesondere keine Information dazu enthalten, wann die Forschungsergebnisse praktisch umgesetzt sein werden.

Die Engineering-Roadmap des Forschungsbeirats Industrie 4.0



Grundannahmen und Struktur

Die vorliegende Roadmap basiert auf der Annahme, dass ein zentraler Gegenstand von Industrie 4.0 die Erreichung einer wettbewerbsfähigen, transparenten, flexiblen und gleichermaßen wertschöpfungsdeckenden Produktion und Produktbereitstellung im Feld ist. Dies ist allerdings kein Selbstzweck – vielmehr dient es der Erreichung von Zielen. Dazu gehören beispielsweise die Herstellung individueller Produkte, die Erhöhung der Resilienz gegenüber internen und externen Einflüssen, die Reaktion auf geänderte Kundenwünsche oder Eigenschaften von Ausgangsmaterialien oder auch die Optimierung im Sinne der Durchsatzerhöhung, Maschinenauslastung oder der Vermeidung von Flaschenhälsen sein. Es geht darum, eine stets optimale Kombination der erforderlichen Eigenschaften zu erreichen, insbesondere Produktivität sicherzustellen, Nachhaltigkeit zu optimieren und Sicherheit zu gewährleisten. Darüber hinaus gibt es heute bereits Produkte, die im Wesentlichen manuell hergestellt werden müssen, weil der Herstellungsprozess einen Grad der Anpassbarkeit erfordert, der mit dem aktuellen Stand der Technik nicht erreicht werden kann. So sind beispielsweise in der Pharmazie Therapeutika für schwerwiegende Erkrankungen bekannt, die automatisiert nur unter Nutzung von Industrie 4.0-Fähigkeiten erzeugt werden können. Die zentralen Fähigkeiten dafür sind autonome Anpassbarkeit und Transparenz des Herstellungsprozesses.

Die Realisierung einer durchgängigen horizontalen und vertikalen Kommunikation, einhergehend mit der Schaffung großer Transparenz auf Basis von Daten bildet eine wichtige Basis für die Flexibilisierung. Außerdem ist ein seit Beginn der Arbeiten zu Industrie 4.0 besonderes wichtiger Aspekt die bestmögliche Integration des Menschen in Industrie 4.0, d.h. insbesondere die optimale Aufteilung der Arbeit zwischen Mensch und Maschine, einhergehend mit bestmöglicher Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine sowie der angemessensten Unterstützung des Menschen durch die Technik. Dabei müssen neue Arbeits-Kulturen und -Organisationen beachtet werden.

Die Flexibilisierung und damit einhergehende unterschiedliche Stufen der Skalierung erfordern eine zunehmende Wandelbarkeit der Produktion. Dementsprechend unterscheidet die Roadmap drei Zeiträume innerhalb der kommenden 10 Jahre, die durch unterschiedliche Ziele für die Wandelbarkeit gekennzeichnet sind. An den Zeitraum, der durch Forschungsarbeiten zur Optimierung bestehender Fabrikssysteme charakterisiert ist, schließt sich ein Zeitraum an, in dem die Forschung auf die Erreichung einer dynamischen Anpassbarkeit zielt. Während hier Menschen auf Basis geeigneter Techniken den Wandel der Produktion und des Produktbetriebs gestalten und dabei die erforderlichen Eigenschaften sicherstellen, zielen die Forschungen der dritten Phase auf Wandelbarkeit durch autonome Fähigkeiten der Produktion und der Produkte im operativen Betrieb ab.

Um diese Fähigkeiten zu erreichen, müssen geeignete Engineeringmethoden und -techniken für die Produkte und die Produktion verfügbar sein. Das betrifft insbesondere die Produkt- und Produktionssystem-Entwicklung, die Sicherstellung der erforderlichen Zielerreichung, die gestuft entwickelbaren Funktionsumfänge und die dazugehörigen neuen digitalen Formen der Qualitätssicherung (zunehmend auf dafür geeigneten digitalen Plattformen), die Informations-Gewinnung und -Nutzung und den Aspekt neuer Arbeitskulturen und Arbeitsorganisationen einschließlich der optimalen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine sowie der bestmöglichen Unterstützung des Menschen durch die Technik.

Themenblöcke

Modelle für **heterogene** und **verteilte** cyber-physische und mechatronische Systemverbünde (insbesondere für Produkte und Produktion)

Produktionsumgebungen sind Systeme im Sinne einer weit gefassten Definition, nach der Systeme technische Bestandteile und die involvierten Personen einschließlich z. B. der Logistik umfassen. Außerdem handelt es sich hier um hierarchische Systeme von Systemen innerhalb einer Produktionsumgebung sowie entlang von Lieferketten. Das Engineering der technischen Bestandteile erfordert die Involvierung mehrerer Disziplinen – z. B. Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik als auch operative Serviceerbringung. Weitere Disziplinen wie die Arbeitswissenschaft und Ergonomie können hinzutreten. Darüber hinaus kann es erforderlich sein, weitere Aspekte – z. B. Geschäftsmodelle – zu berücksichtigen, um Kosten-Nutzen-Analysen durchführen zu können. In den involvierten Disziplinen gibt es unterschiedliche Herangehensweisen und dementsprechend unterschiedliche Modellierungen. Auf Basis dieser Modelle kann das Engineering innerhalb einer Disziplin gestaltet werden. Disziplinen-übergreifende Engineering-Fragestellungen für das Gesamtsystem lassen sich aber nur adressieren, wenn die unterschiedlichen Modelle zu einem validen Ganzen verbunden werden können. Forschungsfragestellungen betreffen die Kombinierbarkeit von Modellen im Hinblick auf bestimmte Fragestellungen sowie Verfahren zur Modellerstellung – z. B. unter Nutzung verlässlicher LLM – und zur Modelldarstellung – z. B. mit geeigneten digitalen Zwillingen. Neben der Erreichung technischer Ziele kommt der Sicherstellung von Produktivität und Nachhaltigkeit eine hohe Bedeutung zu.

Gemeinsame Mehrzieloptimierung von Eigenschaften (z. B. Funktionen, Safety, Security, Produktivität, Erbringungsrobustheit, zirkulares Verwerten und Nutzen ...)

Industrie 4.0-Systeme müssen eine Kombination von Eigenschaften besitzen, die oft nicht wechselwirkungsfrei sind. Typische Beispiele sind die Wechselwirkungen zwischen Funktionsoffenheit bzw. -erweiterbarkeit und Security, Security und Safety oder auch zwischen Safety und Verfügbarkeit. Ein im Normalfall sicheres System im Sinne von Safety kann durch einen Security-Vorfall Gefahren entwickeln, die ursprünglich nicht vorhanden waren. Eine getrennte Optimierung von Security und Safety wird derartige Zusammenhänge oft nicht identifizieren. Safety kann häufig durch eine umfassende Diagnostik mit entsprechenden Reaktionen erhöht werden, was oft zu Lasten der Verfügbarkeit geht, da im Zweifel eigensichere Zustände eingenommen werden, in denen das System seine Funktion nicht mehr erfüllt. Dies hat negative Auswirkungen auf Produktivität. Für viele Eigenschaften gibt es Zielkorridore, die es einzuhalten gilt. Wie die Wechselwirkungen zwischen Eigenschaften analysiert werden können, ist zu erforschen.

Dazu gehören die Erkennung und Reaktion aus Cyber-Angriffen im Sinne der Security, die Fähigkeit, sichere Systeme im Sinne der Safety auch dann zu gewährleisten, wenn Technologien genutzt werden, die im aktuellen Stand der Technik Safety-Analysen erschweren (z. B. Machine Learning) sowie das Verständnis cross-sektoraler Wertschöpfung durch die gemeinsame Betrachtung von z. B. Material, Informationen und Energie.

Sichere statische Datenplattformen zur Gewinnung valider Produkt- und Produktionsinformationen

Informationen bilden die Grundlage für Entscheidungsprozesse. Ohne geeignete, valide Daten zur Gewinnung von Informationen kann Industrie 4.0 nicht funktionieren. Entscheidend für die Bereitstellung von Daten wird der Schutz der Daten und die Kontrollierbarkeit der Datennutzung sein – also die Erzeugung abgesicherter Informationsräume und die Existenz einschlägiger Standards. Wie dies technisch ausgestaltet werden kann, ist zu erforschen.

Engineering für neue Arbeits-Kulturen und Organisation, **Lernende** Assistenzsysteme

Die Arbeitsprozesse und die sie umgebende Organisation werden sich auf dem Weg zu und in der weiteren Evolution von Industrie 4.0 verändern. Dies wird nicht ohne Auswirkung auf das Engineering der Produkte und Produktionssysteme bleiben. Im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) spielen die Aufteilung von Arbeit zwischen Mensch und Maschine sowie eine optimale Unterstützung des Menschen durch die Technik eine zentrale Rolle. Das Ziel ist die Schaffung lernender Assistenzsysteme, die den Arbeitsprozess beobachten und ihre Unterstützung auf den jeweiligen individuellen Menschen ausrichten. Als querschnittender Belang durch alle MMI-Themen sind die Usability bzw. User Experience zu beachten. Es ist auch Forschung zu geeigneten Interaktionsmechanismen zwischen Workern und kollaborativen Robotern sowie in der hybriden Team-Robotik erforderlich.

Umfassende, **virtuelle** Entwicklungsmethoden für heterogene Systeme / **virtuelle Prognose** von Verhalten und Auswirkungen (z. B. für Resilienz, Nachhaltigkeit ...)

Um Systeme dynamisch rekonfigurieren zu können, ist es erforderlich, das Verhalten nach der Veränderung zuverlässig prognostizieren zu können. Es geht um die Erzeugung von Antworten auf die Fragen „Wird durch eine Veränderung das erwünschte Ziel erreicht?“ und „Bleibt Verhalten unverändert?“. Selbstverständlich sind auch diese Fragen für das Gesamtsystem zu beantworten. Daher baut dieser Themenblock auf den Forschungsarbeiten zu „Modelle für heterogene Systeme“ auf. Im zunehmend gekoppelten Zusammenwirken von bisher in der Fabrik oder im Feld aufgezeichneten operativen Daten und den in der Entwicklung bisher genutzten digitalen und virtuellen Modellen können in Zukunft digitale Zwillinge oder gar ihr netzwerkartiges Zusammenwirken eine neue geeignete Repräsentationsform für die zugrundeliegenden Verhaltensmuster technischer Systeme sein. Ein wichtiges Ziel ist es, die komplizierten Zusammenhänge zwischen technischen Eigenschaften der Produkte und Produktionssysteme und z. B. Nachhaltigkeitsaspekte, Klimaneutralität, Produktivität und Wertschöpfung zu beschreiben.

Simulations- und Emulationssysteme für die **virtuelle Inbetriebnahme** und die **Qualitätssicherung**

Ziel dieses Themenblocks ist zu erforschen, wie die Ergebnisse der Arbeiten zur „Gemeinsamen Mehrzieloptimierung von Eigenschaften“ so in Modelle übertragen werden können, dass sie bei der Konfiguration oder Rekonfiguration virtuell und automatisiert angewendet werden können. Vor einer anstehenden Veränderung ist auf Basis von Modellen festzustellen, welche Eigenschaften sich in welcher Weise verändern und ob das akzeptiert werden kann oder diese Modifikation in einen nicht erlaubten Bereich führen würde. Hierbei werden zwei Aspekte für die weitere Forschung entscheidend

sein: (a) in welchen Stufen sollen Verlässlichkeiten unternehmens- und organisationsübergreifend geschaffen werden, um die Modellvielfalt und Wirkweisen der komplexeren Systeme von morgen zu beherrschen und (b) welche dafür notwendigen digitalen (Syntax-)Mechanismen sowie semantische Beschreibungformen und darauf aufzusetzende, smart ineinandergreifende Standards sind zielführend?

Dynamisch adaptierbare Datenplattformen sowie Erzeugung synthetischer Test- und Trainingsdaten

Wenn sich die Industrie 4.0-Produktion verändert, so müssen die Datenplattformen entsprechend angepasst werden, weil andere oder modifizierte Daten nötig sind, Daten nicht mehr erzeugt oder modifizierte Auswertungen benötigt werden. Wie diese Flexibilität in Datenplattformen unter Beibehaltung wichtiger Eigenschaften – z. B. Zugriffs- bzw. Nutzungskontrolle der Daten – realisiert werden kann, ist zu erforschen. Die bisher eher grundlagenorientiert angedachten Semantikbeschreibungen in Form von Ontologien, Wissens- und Kausalitätsgraphen sind hingegen für die zukünftige angestrebte intensive Nutzung von Datenplattformen und -räumen noch nicht ausreichend und müssen im Hinblick auf dynamisch vernetzte KI-Komponenten maßgeblich durch maschinell verständliche Funktionsspezifikationen und physikalisch korrekte Inferenzen ergänzt sowie in der weiteren Forschung industriereif erüchtigt werden.

Selbstadaptive und **proaktive** Assistenzsysteme

Die „Lernenden Assistenzsysteme“ sollen lernen, sich bei unverändertem Produktionsablauf an unterschiedliche Arbeitsweisen von Workern anzupassen und geeignet zu assistieren. Die „Selbstadaptiven Assistenzsysteme“ sollen neben der Adaption an unterschiedliche Worker auch eine Adaption an veränderte Produktionsabläufe leisten, die z. B. durch eine Rekonfiguration entsteht. Automatisierungen des Engineering selbst in Form von umfassenderen Assistenzsystemen und autonomen Entscheidungsfindungen wird die weitere Forschung auf diesem Gebiet stark prägen. Durch eine automatische Planerkennung sollen die Assistenzsysteme die nächsten vom Menschen angestrebten Schritte frühzeitig erkennen, um diese schon vorausschauend zu unterstützen und mittelfristig eine Null-Fehler-Produktion zu ermöglichen.

Autonome dynamische Planerzeugung auf Basis von **Modellen** und **erlerntem Wissen**

Gegenstand dieses Themenblocks ist es zu erforschen, wie die planerischen und steuernden Eingriffe des Menschen in die Industrie 4.0-Produktion und Entwicklung so automatisiert werden können, dass sie durch die Anlage eigenständig durchzuführen sind. Es geht also um die Schaffung eines weitgehend autonomen technischen Systems, z.T. sogar durch autonome Entwicklungswerkzeuge wie z. B. Bots. Dafür werden geeignete koppelbare Modelle – ggf. ebenfalls entsprechend geeignete digitale Zwillinge bzw. Netzwerke von digitalen Zwillingen – erforderlich sein. Außerdem soll sich das System selbst beobachten und ständig autonom hinzulernen. Dabei sind die Lieferketten mit zu betrachten.

X@Runtime

X@Runtime ist ein Oberbegriff, der die Verschiebung von Engineering- und Qualitätssicherungs-Tätigkeiten von der Entwicklung in die Laufzeit beschreibt. Ziel ist es, diese Tätigkeiten zu automatisieren und während der Laufzeit durch das technische System autonom durchführen zu lassen. Ein Beispiel ist „Planung@Runtime“, also die automatisierte Erzeugung eines Herstellungsplans für ein bestimmtes Produkt. Ein anderes Beispiel ist „Safety@Runtime“, also die Bewertung der Sicherheit während der Laufzeit durch das technische System. X@Runtime hat sowohl einen Bezug zur „Autonomen dynamischen Planerzeugung“ als auch zur „Selbst-Bewertung, -Prognose und -Optimierung von Eigenschaften“.

Selbst-Bewertung, -Prognose und -Optimierung von Eigenschaften

Die komplizierte systemweite Sicherstellung der geforderten Eigenschaften muss bei einem weitgehend autonomen technischen System durch das System selbst durchgeführt werden. Wenn ein Produktionsplan automatisch erzeugt wird, so muss z. B. auch automatisch festgestellt werden, ob dieser Plan sicher durchzuführen ist, ob er wirtschaftlich realisiert werden kann, die Produktivität gewährleistet ist, usw. Gegenstand dieses Themenblocks ist die Erforschung von Lösungen, die es ermöglichen, die virtuelle Sicherstellung von Eigenschaften und somit auch die „Virtuelle Inbetriebnahme und Qualitätssicherung“ dem technischen System selbst zu übertragen.

Autonome Verhandlung von Datennutzung und Datenfusion

Die Autonomie des Industrie 4.0-Systems macht es notwendig, die Datenbereitstellung und Datennutzung immer wieder anzupassen. Das kann sinnvoll nur automatisiert durchgeführt werden. Eine Forschungsfragestellung ist, wie die Intentionen von Datenbereitstellern und Datennutzern so beschrieben werden können, dass daraus automatisiert konkrete Regeln z. B. für die automatische Nutzungskontrolle abgeleitet werden können.

Umfassende selbstoptimierende Unterstützungssysteme, kontinuierlich optimierte Arbeitsprozesse

Der hohe Grad an Autonomie führt zu häufigen Veränderungen von Abläufen und Arbeitsprozessen, die durch entsprechend leistungsfähige Unterstützungssysteme aufgefangen werden müssen, um die in der Produktion arbeitenden Menschen nicht zu überlasten und bestmöglich zu unterstützen. Forschungsfragestellungen betreffen hier z. B. Möglichkeiten zur automatisierten Erzeugung eines virtuellen Trainings für einen neuen Produktionsplan oder auch kognitive Assistenzsysteme, die proaktiv Vorschläge für geänderte Arbeitsprozesse erzeugen.

Informationen zum Forschungsbeirat Industrie 4.0

Der Forschungsbeirat Industrie 4.0 beobachtet und bewertet als Sensor von Entwicklungsströmungen die Leistungsprofilentwicklung von Industrie 4.0 in mittel- bis langfristiger Perspektive. Zudem versteht er sich als Impulsgeber für künftige Forschungsthemen und Förderer des interdisziplinären Dialogs. In seinen Publikationen formuliert der Forschungsbeirat neue, vorwettbewerblich beantwortbare Forschungs- und Entwicklungsbedarfe sowie Handlungsoptionen für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0.

Die Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft begleiten in diesem strategischen und unabhängigen Gremium die Plattform Industrie 4.0, ihre Arbeitsgruppen und die beteiligten Bundesministerien, insbesondere das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Impressum

V.i.S.d.P.:
Forschungsbeirat Industrie 4.0
c/o acatech, Karolinenplatz 4, 80333 München

Kontakt
Forschungsbeirat Industrie 4.0
c/o acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Kristina Fornell
Referentin Kommunikation
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0)89/52 03 09-865
www.acatech.de / fornell@acatech.de