

Autonome Systeme in der Produktion

Planungssystematik für die Entwicklung autonomer Systeme

Roman Dumitrescu, Thorsten Westermann, Tommy Falkowski,
Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Paderborn

Autonome Systeme werden perspektivisch alle Lebensbereiche durchdringen und haben das Potenzial, einen gesellschaftlichen Wandel auszulösen. Die Konzipierung dieser hochkomplexen Systeme erfordert leistungsfähige Entwicklungsansätze und -methoden, die disziplinübergreifend angewendet werden. Stellvertretend für die vielschichtigen Anwendungsbereiche von autonomen Systemen steht die industrielle Produktion, in der im Kontext von Industrie 4.0 bereits eine technologieinduzierte Transformation eingeleitet wurde.

Im Bereich Mobilität sind in den vergangenen Jahren enorme Innovationssprünge zu verzeichnen. Die Leistungsfähigkeit von Assistenzsystemen, besonders im Automobilssektor, wird immer mehr zu einem zentralen Verkaufsargument und erfährt eine zunehmende mediale Aufmerksamkeit sowohl im wissenschaftlichen als auch im nichtwissenschaftlichen Bereich. Die Umsetzung von autonomen Fahrzeugen erfordert die Weiterentwicklung und Integration modernster Technologien, die bspw. eine Situationserkennung und Entscheidungsfindung ermöglichen. Experteneinschätzungen über die Umsetzbarkeit solcher autonomen Systeme in der nahen Zukunft divergieren stark und werden durch gesellschaftliche bzw. ethische Fragestellungen begleitet [1]. Neben dem autonomen Fahren existieren weitere Anwendungsbereiche für autonome Systeme, die einen ebenso großen gesellschaftlichen Wandel auslösen können, allen voran die industrielle Produktion. Als Motor für den Wohlstand in Deutschland ist es von enormer Wichtigkeit, die Einsatz- und Nutzenpotenziale autonomer Systeme für die industrielle Produktion zu erkennen und die Umsetzung entsprechender Systeme systematisch zu planen. Die Entwickler solcher Systeme stehen dabei vor der Herausforderung, die steigende Komplexität im Entwicklungsprozess zu beherrschen.

Autonome Systeme für die Produktion

Der digitale Wandel im Maschinen- und Anlagenbau ist durch einen zunehmenden Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik geprägt. Es entstehen neue Möglichkeiten zum einen für die Verbesserungen einzelner Maschinen und Anlagen, zum anderen für die Leistungssteigerung kompletter Wertschöpfungsprozesse.

Die Vernetzung der technischen Systeme sowie die Verschmelzung von virtueller und physikalischer Welt werden dabei im Kontext der industriellen Produktion unter dem Begriff CyberPhysical Systems (CPS) zusammengefasst. CPS sind offene, vernetzte Systeme, die mittels Sensorik Daten über den Zustand der physikalischen Welt erfassen, diese interpretieren und für digitale Dienste verfügbar machen. Über Aktoren können die Systeme direkt auf Prozesse in der physikalischen Welt einwirken und damit das Verhalten von Komponenten, Anlagen und Diensten steuern [2]. Durch den zunehmenden Einsatz von CPS in der industriellen Produktion vollzieht sich derzeit ein tiefgreifender Wandel. Der Begriff Industrie 4.0 steht für diesen Wandel und bezeichnet eine neue Stufe der Organisation und Steuerung komplexer Wertschöpfungsnetzwerke [3]. CPS sind dabei die wesentlichen Wegbereiter, deren konsequente Weiterentwicklung in der Umsetzung von autonomen Systemen mündet.

Notwendig werden solche Systeme unter anderem aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten bei gleichzeitig sinkenden Fertigungskosten, welche sich nur mithilfe einer wandelbaren und flexiblen Fertigung umsetzen lassen. Das Ziel sind intelligente und vernetzte Fabriken, die in dynamischen Wertschöpfungsketten agieren und sich laufend selbst optimieren und so trotz individualisierter Produktion eine Senkung der Kosten ermöglichen. Solche intelligenten Fabriken werden auf den Einsatz autonomer Systeme und deren enger Verzahnung angewiesen sein.

Autonomous Systems in Production – Toward a Planning and Development Methodology

The performance of assistance systems, especially in the automotive sector, has become an unique selling point. The trend toward Autonomous driving represents the expected impact of innovation resulting from the exploitation of the latest technologies. Besides autonomous driving, other areas of application for autonomous systems could trigger social change – the prime example being industrial production. The following article presents a planning approach tailored to the complex engineering task of planning and designing autonomous systems for industrial applications.

Keywords:

Autonomous systems, systems engineering, cyberphysical systems, industrial internet of things



Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu ist Direktor am Fraunhoferinstitut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn, wo er den Fachbereich Produktentstehung leitet und ist Geschäftsführer Strategie, FuE des Spitzenclusters it's OWL.



Dr.-Ing. Thorsten Westermann leitet eine Forschungsgruppe zum Thema Produkt-Service-Systeme im Bereich Produktentstehung des Fraunhofer-Instituts für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn.



M. Sc. Tommy Falkowski arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhoferinstitut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn und ist Referent für Strategie, Forschung und Entwicklung beim Spitzencluster it's OWL.

roman.dumitrescu@iem.fraunhofer.de
www.iem.fraunhofer.de

Ein prominentes Beispiel sind fahrerlose Transportsysteme, die eine bedarfsgerechte und effiziente Bereitstellung von Waren ermöglichen. Durch die Integration von maschinellen Lernverfahren und Ansätzen wie der Schwarmintelligenz werden diese Systeme zukünftig auch ohne zentrale Leitstellen auskommen und ihre Aufgaben vollständig autonom und dezentral abwickeln können. Durch eine dynamische Vernetzung der einzelnen Teilsysteme (Maschinen und Anlagen, Transport- und Wartungssysteme, Auftragsabwicklungssysteme etc.) ohne die Notwendigkeit von menschlichem Eingreifen, wird der Weg zu einer vollständig autonomen und standortübergreifenden industriellen Fertigung im Sinne der intelligenten Fabrik geebnet.

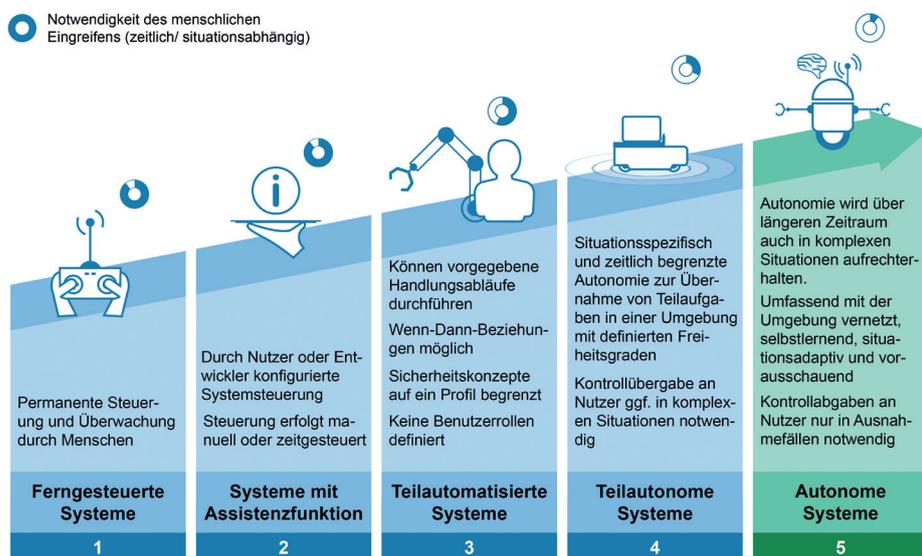
Ein weiteres Anwendungsbeispiel für autonome Systeme in der Produktion sind Maschinen und Anlagen, die laufend den eigenen Zustand sowie die Umgebungsdaten erfassen und auf Basis von Datenanalyse- und maschinellen Lernverfahren die Fertigungsprozesse bedarfsgerecht rekonfigurieren und optimieren können, um so flexibel auf eingehende Aufträge zu reagieren. Ein reales Beispiel aus der industriellen Anwendung sind Industriezentrifugen, sog. Separatoren. Separatoren dienen zur mechanischen Trennung von mehreren Phasen mit unterschiedlichen Dichten im zugeführten Rohprodukt. Im Projekt „Separator i4.0“, an dem das Fraunhofer IEM als Forschungspartner beteiligt war, wurde ein solcher Separator von einem mechatronischen System zu einem intelligenten, technischen System weiterentwickelt, welches bereits Grundzüge von Autonomie umsetzt. Dieses Projekt dient im folgenden Beitrag als Anwendungsbeispiel für die Konzeption und Umsetzung autonomer Systeme in der industriellen Produktion.

Entwicklungsstufen technischer Systeme hin zu autonomen Systemen in der Produktion

Im Kontext der technischen Systeme erfordert der Begriff der Autonomie eine genauere Erläuterung. Autonome Systeme bezeichnen Systeme, die Aufgaben selbstständig und in weiten Teilen ohne menschliche Eingriffe ausführen können. Von heutigen automatisierten Systemen unterscheiden sich autonome Systeme durch ihre hohe Anpassungsfähigkeit. Hierzu zählen neben Robotern auch Fahrzeuge, Produktionsanlagen, Gebäude und Softwaresysteme. Abhängig von der Häufigkeit der notwendigen Eingriffe und Entscheidungen durch einen Menschen, kann zwischen verschiedenen Entwicklungsstufen unterschieden werden [4]. Das Spektrum reicht dabei von ferngesteuerten Systemen, bei denen der Mensch alle Entscheidungen trifft, bis hin zu vollautonomen Systemen, die auch über lange Zeiträume die selbstständige Aufgabenerfüllung und Anpassung an wechselnde Umgebungen und Situationen aufrechterhalten können [5]. Bild 1 stellt die einzelnen Entwicklungsstufen für technische Systeme hin zu autonomen Systemen dar.

Im Kontext der industriellen Produktion sind technische Systeme, analog zu einzelnen Fahrzeugen im Straßenverkehr, immer Teil von übergeordneten Systemen. Diese übergeordneten Produktionssysteme werden im Zuge der Digitalisierung immer komplexer und die Systemgrenzen (unter einer Systemgrenze versteht man eine Abgrenzung zwischen dem System und seinem Umfeld) müssen weiter gefasst werden. Gründe sind der steigende Vernetzungsgrad, die Integration externer Datenverarbeitungssysteme und die Einbindung digitaler

Bild 1: Entwicklungsstufen technischer Systeme hin zu Autonomen Systemen (in Anlehnung an [5]).



Dienste. Bestand ein Produktionssystem früher nur aus den einzelnen Anlagen einer Produktionslinie und ggf. einer übergeordneten Steuerung, erweitern sich die Systemgrenzen zukünftiger flexibler Produktionsanlagen durch die Aufnahme zusätzlicher Sensorik, lokaler und externer Datenverarbeitung, angebundener Logistiksysteme sowie ggf. global verteilter Fertigungsanlagen. Die Flexibilität erfordert den Einsatz von Systemen mit höheren Entwicklungsstufen bzw. von autonomen Systemen, um eine Koordination der Systeme und einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten.

Bei unserem Industriebeispiel wurde ein Separator, der in die Stufe 1 eingeordnet werden konnte (vollständig manuelle Einstellung durch Bediener, keine eigen-



Bild 2: Vorgehen bei der systematischen Planung von autonomen Systemen.

ständige Anpassung im Betrieb) so weiterentwickelt, dass er eigenständig erkennt, wenn ein suboptimaler Betriebszustand vorliegt. Der Separator wurde hierzu mit Sensorik ausgestattet und die Messwerte durch eine selbst entwickelte Software ausgewertet. Abhängig vom erfassten Betriebszustand kann der Separator nun eigenständig die Betriebsparameter anpassen, um den optimalen Betriebspunkt einzustellen. Der so modifizierte Separator entspricht nun der Stufe 3, da er vorgegebene Handlungsabläufe selbstständig durchführen kann. Bis zu dieser Stufe ist eine Integration mit weiteren Systemen in der Prozesskette noch nicht zwingend erforderlich. Das System umfasst den mechanischen Aufbau, die Elektronikkomponenten sowie die Software (für den Fall einer lokalen Datenverarbeitung). Spätestens für einen teilautonomen Betrieb wird eine Vernetzung mit angrenzenden Systemen aus der Wertschöpfungskette erforderlich. Im Fall des Separators werden Daten über die vorgeschalteten Prozesse benötigt, um eine bedarfsgerechte und proaktive Anpassung des Betriebszustands zu ermöglichen. Wird der Separator zum Beispiel in einem Brauprozess eingesetzt, so könnte bedarfsgerecht die Leistung reduziert werden, wenn die vorgeschalteten Prozesse nicht vollständig ausgelastet sind.

Mit der Einführung teilautonomer Systeme in die Wertschöpfung nimmt die Komplexität des Gesamtsystems signifikant zu: Es reicht nun nicht mehr aus, ein einzelnes System wie den Separator im Prozess zu betrachten. Eine isolierte Umsetzung von autonomen Systemen in der Produktion wäre insofern auch nicht zielführend, da der zu erwartende Leistungszuwachs in keiner Relation zum Aufwand stünde. Erst durch eine integrierte Weiterentwicklung eines Gesamtsystems bzw. eines Systemverbundes können die Potenziale autonomer Systeme für die Produktion ausgeschöpft werden. Dies erfordert entsprechende Vorgehen und Methoden im Rahmen der Entwicklung, die eine Handhabbarkeit der hohen Komplexität ermöglichen.

Planung von autonomen Systemen

Der Wandel technischer Systeme erfolgt nicht adhoc und einheitlich für alle Systeme. Vielmehr werden sich die Systeme im Zuge einer schrittweisen Transformation verändern, die sukzessive entlang der zuvor beschriebenen Entwicklungsstufen verläuft (Bild 1). Dabei erschließt sich der Nutzen nicht erst mit der höchsten Entwicklungsstufe, sondern bereits entlang sämtlicher Leistungsstufen. Eine strukturierte Leistungssteigerung erfordert eine systematische Planung, die drei wesentliche Schritte umfasst: Leistungsbewertung, Zieldefinition und Leistungssteigerung (Bild 2). Dieser Planungsprozess ist essenziell, um bei jeder Entwicklungsstufe bereits die richtigen Maßnahmen für aufbauende Stufen zu treffen.

Ausgangspunkt einer systematischen Planung von autonomen Systemen ist die Leistungsbewertung, d. h. eine objektive Bemessung des Ausgangszustands. Hierzu erfolgt zunächst eine Systemanalyse, im Rahmen derer der Betrachtungsgegenstand festgelegt (z. B. Separator) und sämtliche Informationen darüber beschafft werden. Hilfreiche Informationsquellen sind u. a. Systemmodelle, Stücklisten, Zeichnungen oder Schaltpläne. Daraus lassen sich Aussagen über die bestehende Sensorik und Aktorik, die Leistungsfähigkeit der Informationsverarbeitung oder vorhandenen Kommunikations- und Mensch-Maschine-Schnittstellen treffen. Auf Basis der Informationen kann nun eine Systembewertung durchgeführt werden, in der das System in die Entwicklungsstufen eingeordnet wird. Zur Bewertung ist die Anwendung eines Reifegradmodells (z. B. [6]) empfehlenswert, die eine objektive und vergleichbare Aussage über die aktuelle Leistungsfähigkeit des betrachtenden Systems ermöglicht. Das Resultat der Leistungsbewertung für den Separator war die Leistungsstufe 1 „Ferngesteuerte Systeme“, da diese zwar umfassende Betriebsdaten erfasst, diese aber weder für Auswertungen noch für eine selbstständige Entscheidungsfindung nutzt.

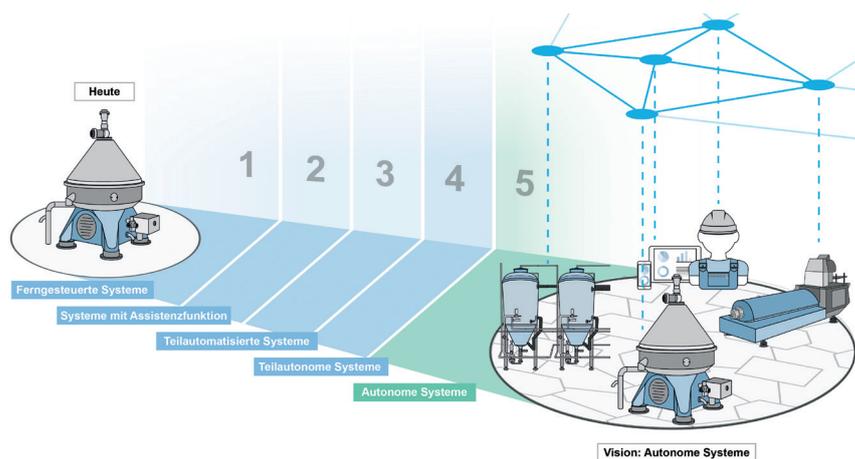


Bild 3: Schrittweise Weiterentwicklung eines Separators hin zu einem autonomen System.

Nach Abschluss der Systembewertung folgt die Zieldefinition. Die anzustrebende Entwicklungsstufe ist nicht zwangsläufig die maximal mögliche. Vielmehr ist die Zielleistungsstufe an konkreten Verbesserungszielen für das System auszurichten. Verbesserungsziele beschreiben konkrete Absichten, zu welchem Zweck die Leistungssteigerung dienen soll. Beispielhafte Ziele für den Separator sind die Erhöhung der Systemverfügbarkeit, die Reduzierung von Ausschuss sowie die Verbesserung der Dienstleistungseffizienz. Aus einer Reihe möglicher Verbesserungsziele werden die wichtigsten Ziele ausgewählt und priorisiert. Anhand der festgelegten Ziele kann nun die anzustrebende Entwicklungsstufe ausgewählt werden. Für den Separator wurde die Zielleistungsstufe 3 „Teilautomatisierte Systeme“ ausgewählt, die den Separator dazu befähigen soll, vorgegebene Handlungsabläufe, wie z. B. die Einstellung des Zulaufdrucks und der Drehzahl, selbstständig vorzunehmen.

Die dritte Phase (Leistungssteigerung) hat das Ziel, die Lücke zwischen der derzeitigen Leistungsfähigkeit und dem ermittelten Zielfeifegrad zu schließen. Dazu gilt es zunächst, die Systemelemente zu identifizieren, die eine hohe Relevanz für die Erreichung der Verbesserungsziele haben. Beispielsweise waren für den Separator die Verbesserung der Informationsverarbeitung, der Sensorik und der Aktorik von besonderer Bedeutung, um die angestrebte Leistungsstufe zu erreichen. Weniger bedeutend war an dieser Stelle das Kommunikationssystem, da eine Vernetzung mit anderen Systemen entlang des Prozesses noch nicht im Fokus stand. Die einzelnen Schritte zur Verbesserung des Systems sind anschließend in eine zeitliche Reihenfolge zu bringen. Dies erfolgt in Form einer Roadmap, die neben der Reihenfolge auch die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen darstellt. Das Resultat aus der letzten Phase ist nun ein konkreter Plan für

die schrittweise Weiterentwicklung des Separators hin zu einem autonomen System (Bild 3).

Erfolgsfaktor Systems Engineering

Die Autonomie beeinflusst nicht nur zukünftige Systeme, sondern auch die Art und Weise, wie diese entstehen. Es verändern sich Prozesse, Methoden, Organisationsstrukturen und die Form der Zusammenarbeit, da der Entwurf autonomer Systeme das Zusammenwirken zahlreicher Fachdisziplinen voraussetzt. Die stark ausgeprägte Interdisziplinarität stellt für klassisch strukturierte Organisationen eine große Herausforderung dar. Die Umsetzung autonomer Systeme erfordert darüber hinaus, sehr vielen Entwicklungsaspekten wie Funktionalität, Verhalten, Resilienz, Security, Sustainability, Usability, Herstellbarkeit, Wartbarkeit etc. gerecht zu werden. Die Absicherung dieser Aspekte im Entwurf stellt sicher, dass die tatsächlichen Systemeigenschaften mit den geforderten Eigenschaften übereinstimmen und das System in allen Betriebssituationen in der Zielumgebung verlässlich funktioniert. Für autonome Systeme ist das eine noch ungeklärte Fragestellung, da nicht alle Situationen zur Entwicklungszeit vollständig antizipiert werden können. Die durchgehende Validierung der Systeme erhöht zusätzlich die Komplexität und schafft die Notwendigkeit der Absicherung auch über den Entstehungsprozess hinweg.

Ein Ansatz der den genannten Herausforderungen im Anspruch gerecht wird, ist das Systems Engineering. Systems Engineering hat das Ziel, Disziplinen, Entwicklungsaufgaben und vielfältige Aspekte zu integrieren und die Akteure in der Entwicklung komplexer Systeme zu orchestrieren. Es versteht sich als durchgängige, fachdisziplinübergreifende Disziplin zur Entwicklung multidisziplinärer Systeme. Systems Engineering hat seinen Ursprung in der Systemtheorie und hat sich stetig weiterentwickelt. Auslöser war stets ein Komplexitätszuwachs in der Problemstellung. Systems Engineering bildet eine fundierte Ausgangsplattform für eine zwingend erforderliche, ganzheitliche Produktentstehungsmethodik für autonome technische Systeme und kann nach Klärung aller technologischen Herausforderungen der entscheidende Erfolgsfaktor in der Entwicklung von autonomen Systemen werden.

Schlüsselwörter:

Autonome Systeme, Systems Engineering, Cyber-Physical Systems, Industrie 4.0

Literatur

- [1] Walker, J.: The Self-Driving Car Timeline – Predictions from the Top 11 Global Automakers. URL: <https://www.techemergence.com/self-driving-car-timeline-themselves-top-11-automakers/>, Abrufdatum 25.07.2018.
- [2] Broy, M.: Cyber-Physical Systems. Berlin Heidelberg 2010.
- [3] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftprojekt Industrie 4.0 – Deutschlands Zukunft als Industriestandort sichern, Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft, Arbeitskreis Industrie 4.0. Ort 2013.
- [4] SAE International: https://www.sae.org/standards/content/j3016_201401/preview/, Abrufdatum 31.07.2018.
- [5] Dumitrescu, R.; Gausemeier, J.; Slusallek, P.; Cieslik, S.; Demme, G.; Falkowski, T.; Hoffmann, H.; Kadner, S.; Reinhart, F.; Westermann, T.; Winter, J.: Autonome Systeme. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin 2018.
- [6] Westermann, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierter Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation. Universität Passau 2017.