Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–05–19

Offene Plattformen für automatisierte Produktionssysteme mit Industrierobotern

Durchgängige Steuerung und Simulation

L. Klingel, D. Littfinski, S. Chen, N. Brandt, M. Neubauer, C. Scheifele, A. Verl

ZUSAMMENFASSUNG Industrieroboter nehmen eine zentrale Rolle in der flexiblen Automatisierung von Produktionssystemen ein. Das Engineering dieser immer komplexer werdenden Systeme wird allerdings erschwert, da spezialisierte und oftmals herstellerabhängige Steuerungs- und Simulationslösungen verwendet werden. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche Anforderungen offene Steuerungs- und Simulationsplattformen in Zukunft erfüllen müssen, um ein durchgängiges Engineering von der Anforderungsphase bis in den Betrieb zu ermöglichen. Anhand einer beispielhaften Realisierung wird aufgezeigt, wie eine solche Lösung schon heute mithilfe offener industrieller Komponenten umgesetzt werden kann.

STICHWÖRTER

Simulation, Automatisierung, Industrieroboter

Continuous control and simulation – Open platforms for automated production systems with industrial robots

ABSTRACT Industrial robots play a central role in the flexible automation of production systems. However, engineering such increasingly complex systems becomes more difficult by the use of specialized and often manufacturer-specific control and simulation solutions. This article points out the requirements which open control and simulation platforms have to fulfill in the future to enable end-to-end engineering from requirements analysis through to operation. A case study exemplifies how such a solution can be implemented by using open industrial components.

1 Einleitung

Die fertigende Industrie ist seit geraumer Zeit mit steigender Komplexität und mit der Forderung nach erhöhter Flexibilität konfrontiert [1]. Die Gründe hierfür sind vielschichtig, lassen sich allerdings auf globale Trends wie die Individualisierung und volatile Märkte zurückführen [2]. Ein wichtiger Baustein, um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist der Einsatz von Industrierobotern, die sich durch eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden besonders für flexible Produktionssysteme eignen. Dieser Trend zeigt sich auch im Jahresbericht der „International Federation of Robotics“, der aufgezeigt, dass der Einsatz von Industrierobotern stetig wächst [3].

Für die Auslegung und Absicherung der komplexer werdenden Produktionssysteme, welche sich neben der erhöhten Anzahl an kinematischen Freiheitsgraden auch durch einen größer werdenden Anteil an Software auszeichnen, kommen spezielle Simulationssysteme zum Einsatz. Damit können beispielsweise in der frühen Phase der Produktionsplanung Abläufe und Erreichbarkeiten untersucht werden. In einer späteren Phase im Engineering kann in der sogenannten virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) das mechatronische Gesamtsystem inklusive realer Steuerungsabläufe simulativ getestet werden [4]. Diese virtuellen Methoden beschleunigen das Engineering, vor allem durch die resultierende Parallelisierbarkeit der Aufgabenfelder (Konstruktion, Hydraulik, Elektrik und Steuerungstechnik) im Engineering, welche früher meist sequenziell durchgeführt werden mussten [5].

Der Einsatz von Industrierobotern beschränkt sich bis dato vor allem auf größere Unternehmen. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) im Maschinen- und Anlagenbau ist es schwierig, Industrieroboter in deren Produkte zu integrieren, da lediglich das Know-How im Bereich der Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) vorliegt [6].

Zwar gibt es in großen Unternehmen meist Roboterspezialisten, jedoch bringt die strikte Trennung von SPS- und Roboterprogrammierern Probleme mit sich wie erhöhte Abstimmungsaufwände und nicht kontinuierliche Prozesse. Letzteres zeigt sich vor allem bei der virtuellen Absicherung dieser Systeme. Für die Planung und Auslegung von Industrierobotern kommen spezialisierte Simulationswerkzeuge zum Einsatz. In diesen werden Erreichbarkeiten, Kollisionen und weitere für die Robotik wichtige Parameter untersucht. Das Zusammenspiel der Roboter mit dem übergeordneten Automatisierungssystem wird aber erst später in der VIBN getestet. Für jedes Simulationswerkzeug ist mindestens ein Experte im Unternehmen erforderlich, und die Simulationsmodelle und -daten müssen über alle Werkzeuge hinweg konsistent und kompatibel gehalten werden, damit eine Integration stattfinden kann. Dies stellt Unternehmen bei der Einführung virtueller Methoden vor erhebliche Herausforderungen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-19, am 29.06.2024, 07:53:16
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

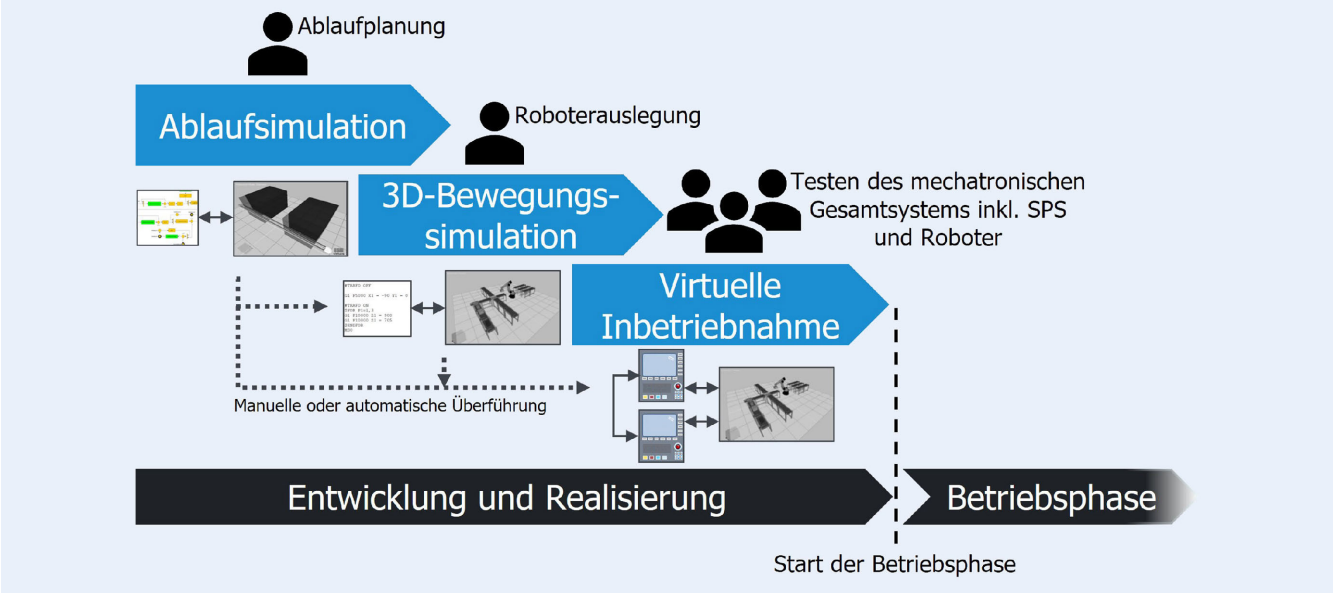


Bild 1. Aktuelles simulationsbasiertes Engineering von Automatisierungssystemen. *Grafik: ISW, in Anlehnung an [4]*

Dieser Beitrag stellt einen durchgängigen Ansatz für die kombinierte SPS- und Robotersteuerung sowie virtuelle Planung, Absicherung und Inbetriebnahme vor. Kapitel 2 zeigt den aktuellen Stand der Technik bei der Entwicklung von Produktionssystemen mit Industrierobotern auf und definiert Anforderungen an eine durchgängige Lösung. In Kapitel 3 wird auf dieser Basis ein Konzept vorgestellt und in Kapitel 4 eine Realisierung präsentiert. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und dem Ausblick auf weitere Arbeiten in diesem Themenbereich.

Der in diesem Beitrag präsentierte Ansatz zeichnet sich durch die Zusammenführung des Engineerings und der Steuerung von SPS und Robotik aus. Dies ermöglicht durch virtuelle Methoden eine neuartige kontinuierliche Planung, Auslegung und Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen mit Industrierobotern.

2 Aktuelles Vorgehen und Anforderungen an zukünftige Lösungen

Die Vorgehensweise beim Engineering von Automatisierungssystemen mit Industrierobotern basiert aktuell auf mehreren, voneinander weitestgehend getrennten Schritten (**Bild 1**).

Im ersten Schritt werden die Abläufe auf Fabrikebene anhand der Ablaufsimulation überprüft. Der Fokus liegt hierbei auf der Intralogistik und dem Materialfluss [7]. Die Bewegungsabläufe der Industrieroboter werden in sogenannten 3D-Bewegungssimulationen ausgelegt [8]. Wie sich aus der Bezeichnung herleiten lässt, werden hier bereits 3D-Modelle verwendet. Im Gegensatz zur Ablaufsimulation werden bei der 3D-Bewegungssimulation erste Roboterprogramme eingesetzt, die mithilfe der Simulation getestet werden und auf Erreichbarkeit und Kollisionen überprüft werden können. Der vollständige Produktionsprozess sowie das komplette Steuerungssystem inklusive SPS- und Robotersteuerung wird aber erst in der VIBN getestet, je nach Konfiguration der VIBN unter Verwendung der realen Steuerungshardware [9]. Zwischen den jeweiligen Schritten treten meist starke Brüche auf und es entstehen Mehrfachaufwände und inkonsistente Daten. Außerdem werden sowohl eine SPS als auch Robotersteuerungen benötigt.

Aus den Schwächen dieses aktuellen Vorgehens ergeben sich lebenszyklusübergreifende Anforderungen an offene und durchgängige Automatisierungslösungen und ihr simulationsbasiertes Engineering. Eine wichtige Anforderung an Automatisierungssysteme sind offene Architekturen, vor allem in der Steuerungstechnik. Nur so lassen sich proprietäre Systeme auflösen und flexible Lösungen aufbauen. Im Bereich numerischer Steuerungen (CNC) existieren solche Ansätze, ein Beispiel hierfür ist „Osaca“ [10].

Um anwendungsspezifisch ein optimales Steuerungssystem einsetzen zu können, sind vor allem offene Schnittstellen hin zu den Antrieben notwendig. Im Bereich der Industrierobotik sind diese offenen Architekturen selten. Roboter werden hier meist in Kombination mit der Steuerung und Software des Herstellers verkauft. Ein nicht offener Ansatz in der Steuerungstechnik wirkt sich wiederum stark auf das Engineering aus. Es entstehen hersteller- und werkzeugabhängige Brüche und die durchgängige Verwendung von virtuellen Methoden wird erschwert.

Optimalerweise sollten die in Bild 1 dargestellten Simulationsphasen inklusive der verschiedenen Konfigurationen in der VIBN fließend ineinander übergehen [11]. Für die Robotik bedeutet das, dass eine intuitive komponentenbasierte Modellierung möglich ist und vor allem das Einlernen (Teachen) von Bewegungen im 3D-Modell unterstützt wird. Aus solchen Steuerungsmodellen sollten dann Konfigurationen und Programme für die Bewegungssteuerung und die SPS automatisiert abgeleitet werden. Des Weiteren sollen virtuelle Methoden zur Optimierung von Taktzeiten, Roboterpositionierungen und -konfigurationen dienen. Für letzteres ist es etwa notwendig, die Dynamik des Robotersystems in der Simulation abzubilden, die zum späteren Zeitpunkt ebenfalls in der Bewegungssteuerung Verwendung findet. Dieses Beispiel macht die enge Verknüpfung der Steuerung und des Engineerings komplexer Systeme wie etwa Roboterzellen deutlich. Im nächsten Kapitel wird ein Konzept zur durchgängigen Steuerung und Simulation mit einem offenen Systemansatz vorgestellt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-19, am 29.06.2024, 07:53:16
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

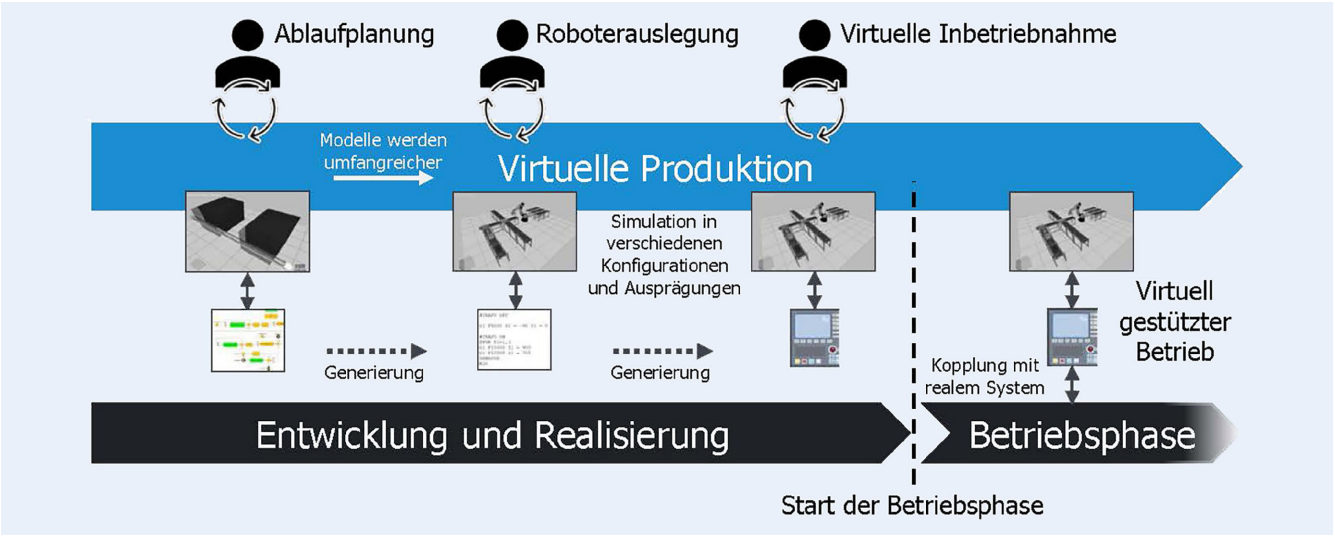


Bild 2. Ansatz für eine durchgängige Steuerung und Simulation. *Grafik: ISW*

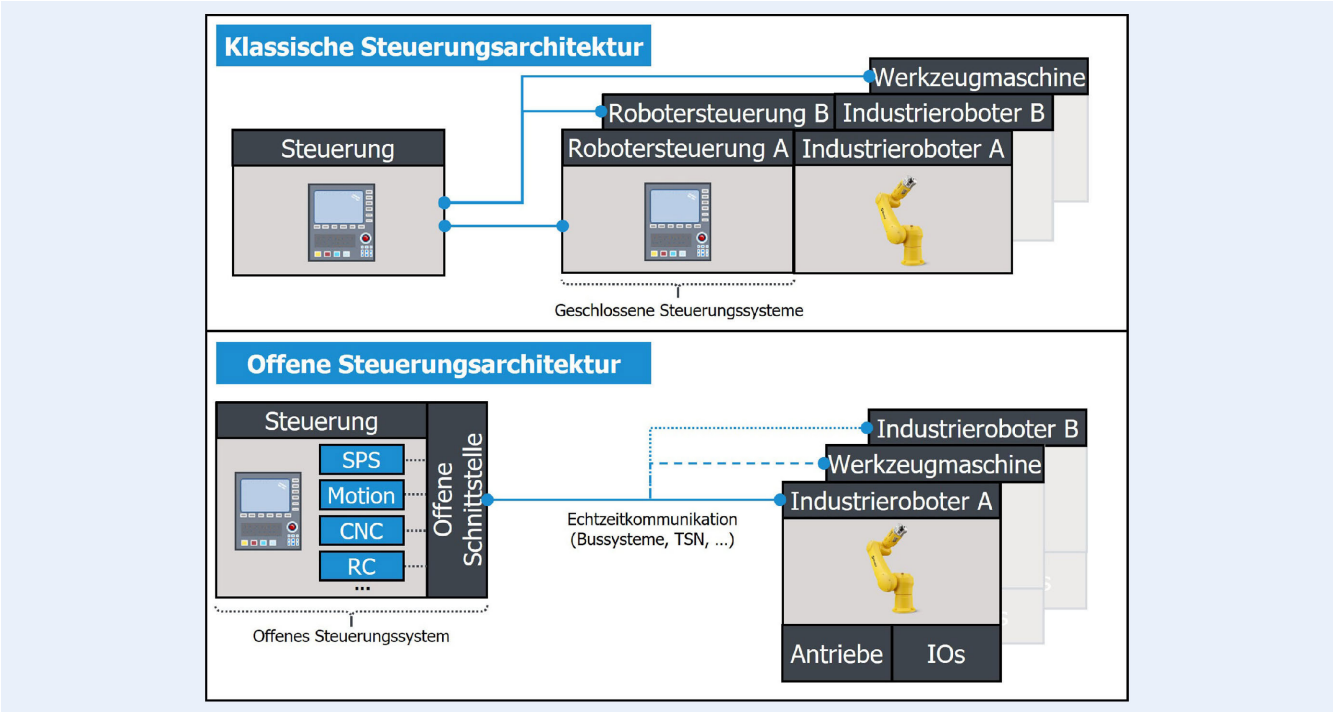


Bild 3. Offene industrielle Steuerungsplattformen.
SPS: Speicherprogrammierbare Steuerung; Motion: Einfache Bewegungssteuerung; CNC: Computerized Numerical Control; RC: Robot Control
Grafik: ISW

3 Durchgängige Steuerungs- und Simulationsplattformen

Um ein durchgängiges digitales Engineering und die einfache Steuerung von Automatisierungssystemen mit Industrierobotern zu ermöglichen, ist ein ganzheitlicher Ansatz notwendig. Dieser ist in **Bild 2** dargestellt.

Dabei wird der komplette Lebenszyklus eines Automatisierungssystems von seinem virtuellen Abbild begleitet. Die einzelnen Schritte im Engineering, wie Ablaufplanung, Roboterauslegung und VIBN, sind in diesem Konzept nicht sequenziell ablaufende Schritte, sondern lediglich verschiedene Ausprägungen des mit dem realen System anwachsenden virtuellen Systems, im Falle eines Produktionssystems der virtuellen Produktion. Dieser durchgängige Ansatz im Engineering wird erst durch eine offene Steuerungsarchitektur möglich, da so nicht zwischen unterschiedlichen proprietären Softwarelösungen gewechselt werden muss. Vor allem ist es notwendig, dass ein System aus einer Steuerung angesteuert werden kann und keine gesonderte Robotersteuerung benötigt wird. Dies erlaubt es wiederum KMUs auch ohne tiefgreifende Robotikexpertise auf Industrieroboter zurückzugreifen. Im optimalen Fall können Steuerungsprogramme, wie etwa die Roboterbewegungen, direkt in der virtuellen Produktion im 3D-Modell geteacht werden. Auf Basis dieser Steuerungsmodelle

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-19, am 29.06.2024, 07:53:16
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

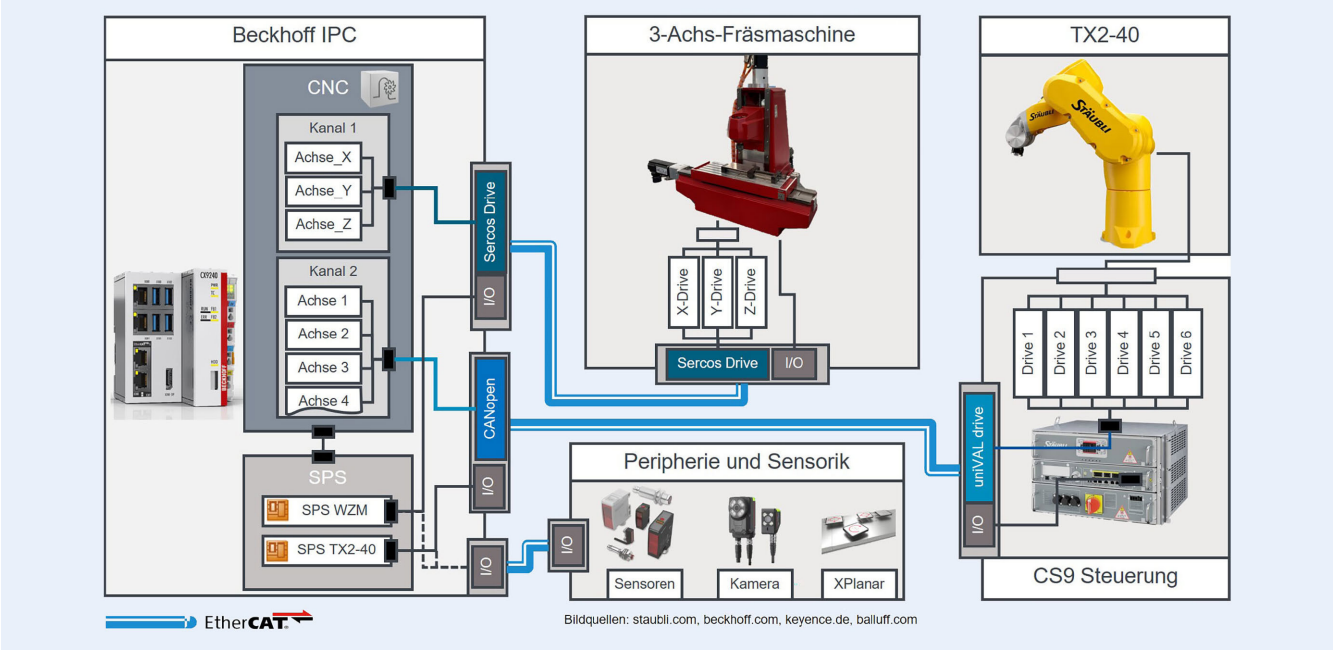


Bild 4. Steuerungsarchitektur des Realisierungsbeispiels mit „Stäubli TX2–40" und 3-Achs-Fräsmaschine. *Grafik: ISW*

kann wiederum ausführbarer Code generiert werden. Zusätzlich erlaubt der durchgängige Ansatz die Überführung der Simulation in die Betriebsphase. So kann ein virtuell gestützter Betrieb mit modellbasierten Steuerungsfunktionen realisiert werden. Diese Idee wurde bereits durch *Rosen et al.* beschrieben [12].

Bild 3 stellt eine offene Steuerungsarchitektur für industrielle Automatisierungssysteme dar. Um die Unterschiede zu gängigen Steuerungsarchitekturen aufzuzeigen, ist eine solche zusätzlich beispielhaft dargestellt.

Im klassischen Fall sind Industrieroboter in Kombination mit deren proprietärer Steuerung ein geschlossenes System. Die komplette Bewegungssteuerung läuft auf der Robotersteuerung und es werden lediglich vorkonfigurierte Programme von der SPS aufgerufen. Die Architektur einer offenen Steuerung ermöglicht es, verschiedenste Industrieroboter und weitere Kinematiken bis hin zu Werkzeugmaschinen anzusteuern. Dabei werden proprietäre Strukturen aufgelöst und es entsteht eine Plattform mit offenen Schnittstellen. Dadurch ergeben sich verschiedene Vorteile, wie eine flexible Einbindung von Industrierobotern in bereits etablierte firmeninterne Steuerungssysteme und Plattformen. Zudem ermöglicht die offene Steuerungsarchitektur einen gemeinsamen Datenaustausch auf der Steuerung zwischen den verschiedenen Teilnehmern. Dies kann zur Optimierung von Produktionsprozessen genutzt werden, wie etwa synchrone oder kooperative Prozesse zwischen mehreren Steuerungsteilnehmern. Durch die offenen Schnittstellen kann das Steuerungssystem beliebig skaliert werden, sodass mit einem Steuerungssystem mehrere Maschinen angesteuert werden können. Außerdem ermöglicht eine offene Steuerungsarchitektur eine einfache virtuelle Absicherung, indem die eine Steuerungsplattform mit dem virtuellen Abbild verbunden werden kann und nicht mehrere Teilsysteme mit der virtuellen Produktion verknüpft werden müssen. Durch die durchgängig offene Steuerungsarchitektur lässt sich die virtuell getestete Steuerung direkt auf das reale System übertragen.

4 Realisierungsbeispiel

Die Vision einer offenen Steuerungs- und Simulationsplattform wird nur in enger Kooperation von Herstellern der einzelnen Komponenten gelingen. Um dennoch die Möglichkeiten und Potenziale dieses Konzepts aufzuzeigen, stellt dieses Kapitel eine beispielhafte Realisierung vor, die auf derzeit vergleichsweise offenen industriellen Komponenten aufbaut.

Bild 4 zeigt die Steuerungsarchitektur dieser Realisierung in Form einer kooperativen Bearbeitungszelle mit einer 3-Achs-Fräsmaschine und einem 6-Achs-Roboter, in diesem Fall von Stäubli („TX2–40"), mit einem gemeinsamen Steuerungsprojekt auf einem Beckhoff Industrie-PC (IPC) unter Verwendung von TwinCAT.

Die Steuerung ermöglicht mehrere Prozesse, wie das Greifen und Beladen von Materialien durch den Roboter sowie die mechanische Bearbeitung durch die 3-Achs-Fräsmaschine. In der Bearbeitungszelle befindet sich ein Beförderungssystem mit Sensorik (XPlanar) der Firma Beckhoff, das für die Materialzuführung und den Abtransport zuständig ist. Zusätzlich befindet sich auf dem TX2–40 eine Kamera von Keyence (AI Vision-Sensor), die zur Positionserkennung und Qualitätskontrolle eingesetzt wird. Auf der Beckhoff-Steuerung werden zwei CNC-Kanäle gleichzeitig ausgeführt und überwacht. Dabei werden die Achsen der 3-Achs-Fräsmaschine auf Kanal 1 ausgeführt und die sechs Achsen des Roboters auf Kanal 2. Die Kanäle weisen unterschiedliche Parameter und Hochlauflisten auf, da sie verschiedenen Kinematiken unterliegen, die sich nicht vereinheitlichen lassen. Der Stäubli TX2–40 wird über die integrierte uniVAL-Drive-Schnittstelle der CS9-Steuerung von Stäubli über EtherCAT von der Beckhoff-Steuerung über ein CANopen Profil angesteuert. Durch das Bereitstellen dieser Schnittstelle ist es möglich, mit einer universellen Multiachssteuerung die Antriebe des Roboters anzusteuern. Dabei fungiert die uniVAL-Drive-Schnittstelle als

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-19, am 29.06.2024, 07:53:16
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

Slave und die Beckhoff-Steuerung als Master. Je nach Konfiguration der CS9-Steuerung können im Slave-Profil auch spezifische Signale der Ein- und Ausgänge angelegt und freigeschaltet werden. Dadurch können weitere Informationen über den Roboter abgerufen werden, beispielsweise über die angeschlossene Peripherie wie Greifer oder Kamera.

In dieser Architektur übernimmt die CS9-Steuerung keine Steuerungsaufgaben, sondern leitet lediglich die konfigurierten Signale weiter. Die 3-Achs-Fräsmaschine wird über EtherCAT mit der Steuerung verbunden. Das Slave-Profil umfasst drei Antriebe mit einem Sercos-Drive-Profil und definierten Sensorsignalen, die für die Zustandsüberwachung an die SPS übermittelt werden. In der SPS werden die Signale der Busteilnehmer logisch verknüpft, um die definierten Bearbeitungsprozesse sequenziell auszuführen. Es werden alle nötigen Sensordaten des XPlanar und der Peripheriegeräte sowie die Zustände beider Maschinen erfasst. Die Kamera am Roboter kann durch eine Kopplung über EtherCAT von der SPS angesteuert werden. Die Kameradaten werden auf einem separaten Controller von Keyence verarbeitet und senden definierte Signale an die SPS der Beckhoff-Steuerung zurück.

Durch die Zusammenführung aller Daten in einer Steuerung können die Bearbeitungsabläufe optimiert werden. Beispielsweise ist ein Kooperationsbetrieb zwischen der 3-Achs-Fräsmaschine und dem TX2–40 möglich. Ein beispielhafter, vollautomatisierter Produktionsprozess in der Zelle mit offener Steuerungsarchitektur kann wie folgt aussehen: Das X-Planar transportiert das Werkstück zum Entnahmeplatz. Dabei sendet die Sensorik ein Signal an die Steuerung, welche den TX2–40 aktiviert und die am Roboter befestigte Kamera über dem zu greifenden Bauteil positioniert. Die Kamera analysiert die präzise Position und Orientierung des Werkstücks anhand von Referenzmarken und übermittelt die Daten an die Steuerung.

Diese Informationen werden genutzt, um die definierten Roboterbahnen zu parametrieren oder eine Online-Bahnplanung zu verwenden, um das Werkstück mit dem Roboter zu greifen. Das Werkstück wird auf dem Aufspanntisch der 3-Achs-Fräsmaschine durch den Roboter positioniert und eingespannt. Nach Abschluss der Bearbeitung sendet die Steuerung ein Signal an den Roboter zur Entnahme. Dieser legt das Werkstück auf den Entnahmeplatz, wo die Kamera die Bauteilqualität überprüft und als gut oder nicht in Ordnung markiert. Entsprechend wird das Bauteil von der Steuerung ausgeschleust oder weiterbearbeitet.

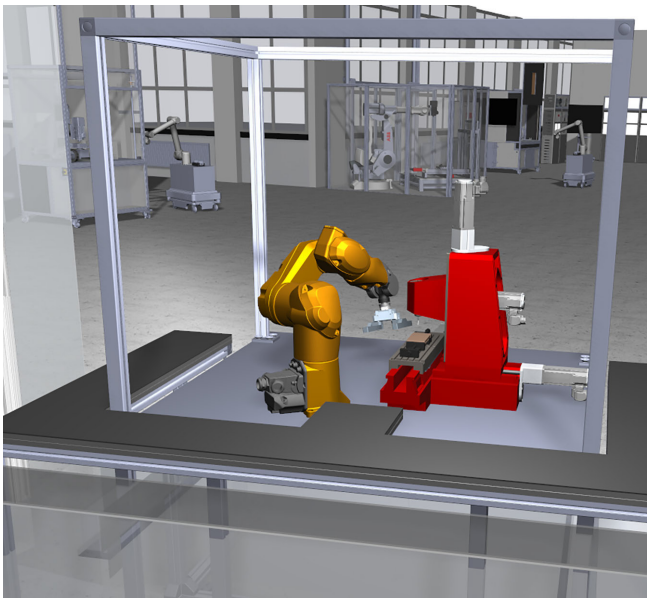


Bild 5. Virtuelles Abbild der Bearbeitungszelle in der Maschinenhalle des ISW. *Foto: ISW*

Dieser automatisierte Prozess ist durch die offene Architektur mit nur einer Steuerung umsetzbar. Eine Integration von verschiedenen Steuerungsteilnehmern ist so möglich und es besteht jederzeit Zugriff auf die benötigten Daten jedes Prozessschrittes. Die offene Architektur erlaubt außerdem den Eingriff in alle gewünschten Parameter und kann somit als Ausgangspunkt für weitere Forschungsprojekte verwendet werden. Eine Darstellung der Bearbeitungszelle ist in **Bild 5** zu sehen.

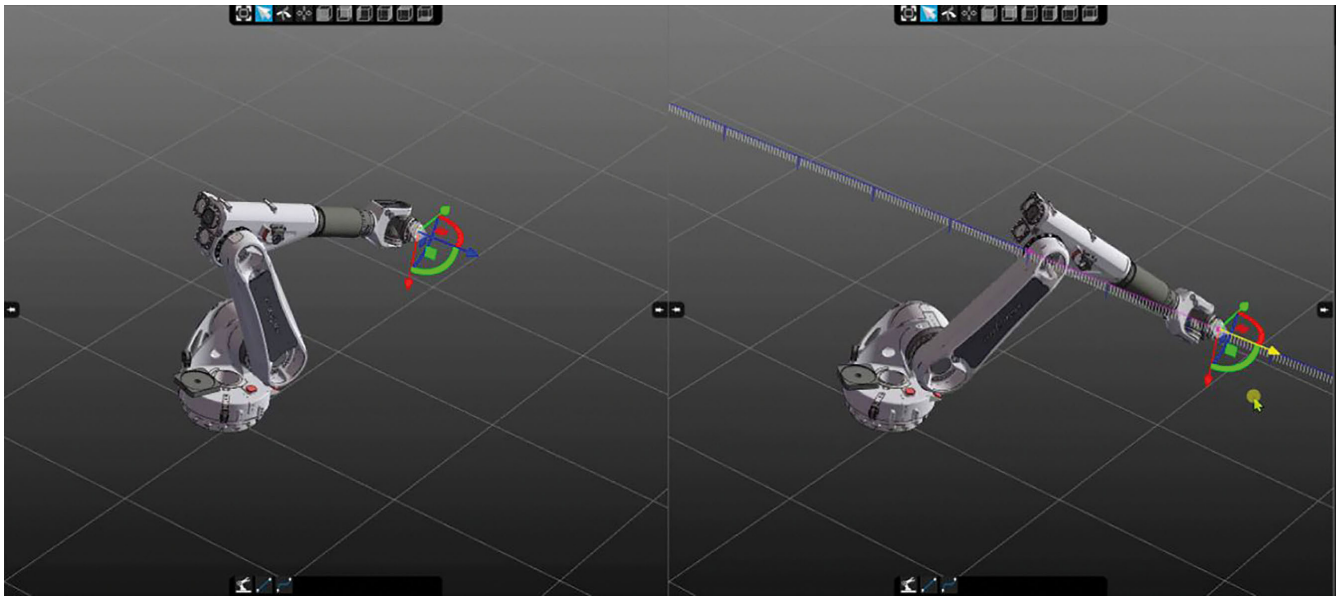


Bild 6. Prototyp für das webbasierte Teachen von Industrierobotern. *Foto: ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-19, am 29.06.2024, 07:53:16
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag adressierte die Notwendigkeit von offenen und durchgängigen Steuerungs- und Simulationsplattformen. Dabei wurde ein Konzept für ein kontinuierliches simulationsbasiertes Engineering präsentiert und eine Architektur vorgestellt. Ziel ist es, Steuerungsarchitekturen von einem Verbund proprietärer Systeme zu offenen und einfach handzuhabenden Plattformen weiterzuentwickeln. Durch die durchgängige Verwendung von virtuellen Methoden wird die Programmierung vereinfacht (Teachen im 3D-Modell) und weitere Simulationskonfigurationen können vollautomatisch generiert werden. Dies ermöglicht die Kopplung von Simulation und Steuerung über alle Phasen des Engineerings bis in den Betrieb. Im Rahmen einer Realisierung wurde beispielhaft gezeigt, wie eine solche Plattform umgesetzt werden kann.

Zukünftig sind weitere Realisierungen notwendig. Dafür wäre es wünschenswert, dass die Schnittstellen hin zum Industrieroboter noch offener werden. Die aktuelle Realisierung auf Basis der uniVAL-Drive-Schnittstelle erlaubt eine Taktzeit von bis zu 2 ms. Des Weiteren ist ein webbasierter Ansatz notwendig, um gerade in den frühen Phasen des Engineerings flexibel auf die virtuelle Produktion und die sich ergebenden Vorteile zugreifen zu können. Hierfür sind bereits erste Prototypen entstanden (**Bild 6**).

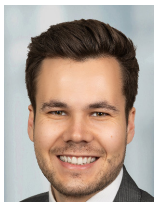
Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart und die ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH planen, auch in Zukunft bei der durchgängigen Steuerung und Simulation und den dafür notwendigen offenen Plattformen zu kooperieren und das Thema weiterzuentwickeln.

FÖRDERHINWEIS

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Verbundprojekts „SDM4FZI“ im Rahmen des Förderprogramms „Zukunftsinvestitionen in der Fahrzeugindustrie“, in welchem die vorgestellten Ergebnisse entstanden sind.

Literatur

[1] Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons 2010
[2] Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H.-G. et al.: Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering 6 (2014) 4, pp. 239–242
[3] International Federation of Robotics: World Robotics Report. Stand: 2023. Internet: ifr.org/. Zugriff am 20.03.2024
[4] VDMA (Hrsg.): Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme: Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. 2020. Internet: www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=66118d8d-68fc-55a7-a25b-a90ffe89f1f2&groupId=34570, Zugriff am 20.03.2024
[5] Kuhn, A. M.; Christ, M.; Kuhn, C. B. et al.: Towards the Smart Factory: Process Optimization in Virtual Commissioning. In: Kiefl, N.; Wulle, F.; Ackermann, C. et al. (ed.): Advances in Automotive Production Technology – Towards Software-Defined Manufacturing and Resilient Supply Chains. Cham: Springer International Publishing 2023, pp. 210–218
[6] Automationspraxis: Roboter programmieren: Grundlagen und Trends der Roboterprogrammierung. Stand: 02.12.2021. Internet: https://automationspraxis.industrie.de/robotik/roboter-programmieren-grundlagen-und-trends-der-roboterprogrammierung/. Zugriff am 20.03.2024
[7] Mayer, G.; Pöge, C.; Spieckermann, S. et al. (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Berlin: Springer Vieweg 2020
[8] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633 Blatt 8: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Maschinennahe Simulation – 3-D-Bewegungs- und Prozesssimulation. Berlin: Beuth Verlag 2020
[9] Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE 3693 Blatt 1: Virtuelle Inbetriebnahme: Modellarten und Glossar. Berlin: Beuth Verlag 2016
[10] Brecher, C.; Verl, A.; Lechler, A. et al.: Open control systems: state of the art. Production Engineering 4 (2010) 2–3, pp. 247–254
[11] Lechler, T.; Fischer, E.; Metzner, M. et al.: Virtual Commissioning - Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. Procedia CIRP 81 (2019), pp. 1125–1130
[12] Rosen, R.; Heinzerling, T.; Puntel Schmidt, P. et al.: Die Rolle der Simulation im Kontext des Digitalen Zwillings: Sind Modelle der Virtuellen Inbetriebnahme Mittler zwischen den Phasen des Anlagenlebenszyklus? Essen: Vulkan Verlag 2021



Lars Klingel, M.Sc.
lars.klingel@isw.uni-stuttgart.de
Tel. +49 711 / 685-82393
Foto: ISW

Daniel Littfinski, M.Sc.

Shengjian Patrick Chen, M.Sc.

Nico Brandt, M.Sc.

Michael Neubauer, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart
www.isw.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Christian Scheifele
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH
Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart
www.isg-stuttgart.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-19, am 29.06.2024, 07:53:16
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb