

# Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht

Interdisziplinäres Forscherteam arbeitet an der Produktionstechnik der Zukunft (Teil 1)

Edgar Mühlbeier\*,  
Florian Oexle,  
Philipp Gönzheimer und  
Jürgen Fleischer

Industrie 4.0 ist als Trend des letzten Jahrzehnts inzwischen weltweit bekannt und steht wie kein anderer Begriff für die Innovationsfähigkeit und Kreativität von Forschung und Industrie. Dabei stellt Industrie 4.0 bisher jedoch eine im Wesentlichen digitale Innovation dar. Seitens der Hardware müssen für eine volle Ausschöpfung des Potentials die Produktionsmaschinen und -systeme der Zukunft grundlegend neu gedacht werden. Das Forschungsvorhaben Wertstromkinematik setzt an dieser Stelle an. Das neuartige Produktionskonzept sieht die Gestaltung ganzer Produktionen anhand der Verkettung mehrerer Maschinen einer baugleichen, roboterähnlichen Kinematik vor. Das hierdurch geschaffene Produktionssystem besitzt eine Wandlungsfähigkeit, die die volle Ausschöpfung des Potenzials durch Industrie 4.0 ermöglicht und zur Erhaltung und Anpassung globaler Wertschöpfungsketten beiträgt.

Dieser Fachbeitrag erscheint in zwei Teilen. Im vorliegenden ersten Teil dieses Artikels wird die Planung und Steuerung der roboterähnlichen Kinematiken vorgestellt. Im zweiten Teil wird die Planung ganzer Produktionsanlagen nach dem Konzept der Wertstromkinematik beschrieben.

## Einleitung und Ausgangssituation

Der Wertstromkinematik (WSK) liegt die Vision zugrunde, den Aufbau einer Produktion vollständig mit bauglei-

chen, universell einsetzbaren Roboterkinematiken zu realisieren. Deren Aufgaben umfassen nicht nur die in der Industrierobotik üblichen Handhabungsaufgaben, sondern zusätzlich Fertigungs- und Montageprozesse sowie die Qualitätssicherung. Der daraus resultierende Verzicht auf teure, wenig flexible Spezialmaschinen innerhalb eines Wertstroms erhöht die Flexibilität der Produktionskette stark und erleichtert

eine Umstellung auf andere Endprodukte seitens des Anwenders um ein Vielfaches [1]. Das grundlegende Konzept der Wertstromkinematik ist in Bild 1 visualisiert.

Eine wesentliche Forschungsaufgabe zur Umsetzung der Wertstromkinematik besteht in der Befähigung der Kinematiken zur Durchführung von Aufgaben mit hohen Genauigkeits- oder Kraftanforderungen. Im Vergleich zu

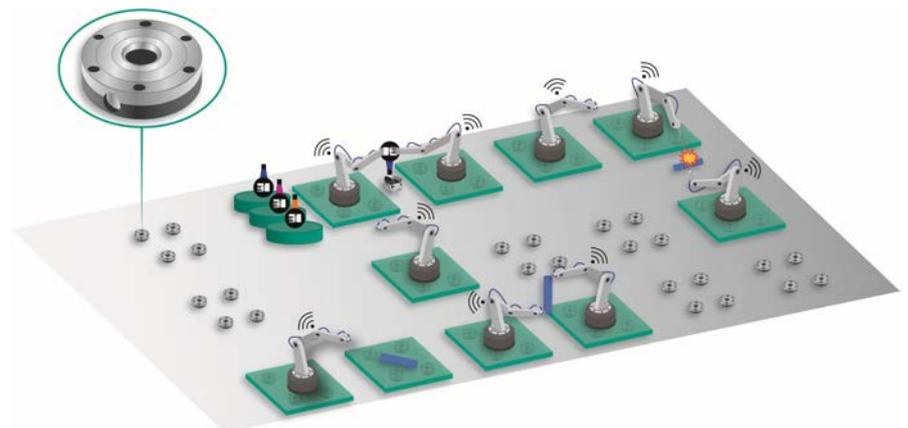


Bild 1. Vision der Wertstromkinematik [1]

### \* Korrespondenzautor

Edgar Mühlbeier, M. Sc.  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
wbk – Institut für Produktionstechnik  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49 (0) 1523 9502587  
E-Mail: edgar.muehlbeier@kit.edu

### Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).



Bild 2. Visualisierung gekoppelter Roboterkinematiken vom Typ Comau NJ290-3.0

teuren Spezialmaschinen (z. B. Bearbeitungszentren) fehlt klassischen Industrierobotern hierfür meist eine ausreichend hohe Steifigkeit. Die Wertstromkinematik löst dieses Problem mit einer innovativen Kopplungsfunktion. Mehrere Kinematiken werden mechanisch mit einem Koppelmodul verbunden (Bild 2), um mithilfe der damit verbundenen erhöhten Gesamtsteifigkeit gemeinsam einen Fertigungsprozess zu ermöglichen. Zur Vision der Wertstromkinematik gehört auch eine digitale Prozesskette, die die Ingenieure bei der Planung zukünftiger und der Überwachung laufender Produktionen begleitet. Mit der digitalen Plattform kann ein wesentlicher Teil der Planung und Inbetriebnahme auf rein virtueller Basis und zukünftig auch autonom durchgeführt werden.

Die Entwicklung von Produktionssystemen erfordert Kenntnisse aus einer Vielzahl von Domänen. Neben der Steuerung, Regelung und Hardwareentwicklung für gekoppelte Roboterkinematiken umfassen die Herausforderungen auch den Aufbau der Softwareinfrastruktur. Zur Bewältigung dieser komplexen Herausforderungen, wurde am Karlsruher Institut für Technologie eine interdisziplinäre Forschungsgruppe mit elf beteiligten Forschungsinstituten gegründet. Die zu bewältigenden Herausforderungen lassen sich in drei aufeinander aufbauende Ebenen einord-

nen. In der obersten Ebene werden gesamtgesellschaftliche Aspekte und insbesondere die Arbeitsweise der Zukunft betrachtet (Gesellschaftsebene). Auf der mittleren Ebene steht der planerische Aspekt einer Produktionsanlage im Vordergrund (Produktionsebene). Auf der untersten Ebene wird die technische Umsetzung des Systems detaillierter betrachtet (Maschinenebene). Der Definition gemeinsamer vertikaler als auch horizontaler Schnittstellen kommt dabei ein besonderes Augenmerk zugute. In diesem ersten Teil des Artikels wird die Planung und Steuerung in der Maschinenebene vorgestellt. Darauf aufbauend folgt im zweiten Teil die Vorstellung der Produktions- und Gesellschaftsebene.

## Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Maschinenebene

In der Maschinenebene wird die technische Umsetzung der in den höheren Ebenen definierten Operationen betrachtet. Für jede Operation, welche wiederum aus mehreren einzelnen Prozessschritten bestehen kann, wird der Aufbau der einzelnen Roboterzellen definiert und simulativ validiert. Ziel ist, mithilfe eines iterativen Optimierungsprozesses eine Roboterzelle zu entwerfen, welche in der Lage ist, die in der jeweiligen Operation definierten Fertigungs-, Montage- und Prüfprozesse unter Einhaltung der vorgegebenen Qualitätsanforderungen durchzuführen. Dazu findet unter Zuhilfenahme eines Digitalen Zwillings die simulative Überprüfung des gesamten Arbeitsablaufes statt.

Bild 3 zeigt die einzelnen Schritte des iterativen Optimierungsprozesses. Ausgehend von der Handlungsplanung, in der den einzelnen Roboterkinematiken Aufgaben zugeteilt werden, erfolgt anschließend die Trajektorienplanung. Auf diese aufbauend findet die simulative Validierung der Roboterzelle anhand des digitalen Zwillings statt. Es folgt eine Optimierungsschleife, in der einzelne Elemente der Zelle so lange gezielt verändert werden, bis die Simulation eine Durchführung der Operation unter Erfüllung der gegebenen Randbedingungen bestätigt. In der Optimierungsschleife werden adaptive Endeffektoren, die Roboterposenplanung, Fertigungsprozessparameter sowie die Rollenverteilung der Roboterkinematiken berück-

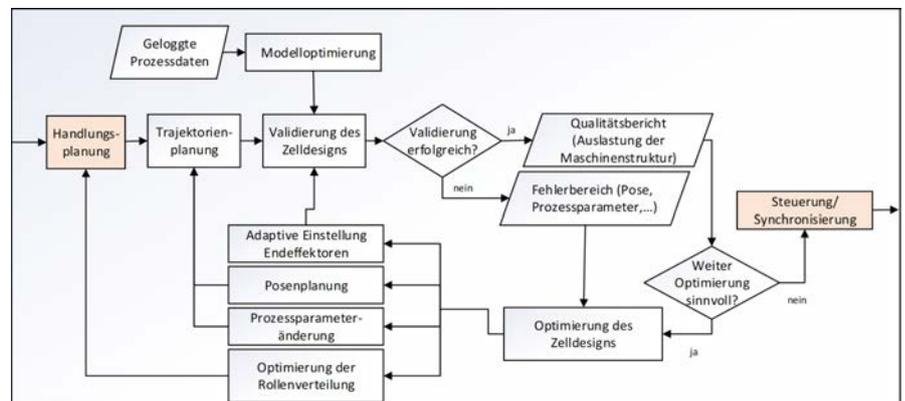


Bild 3. Aufbau der Maschinenebene

sichtigt und nach der Logik eines intelligenten Algorithmus angepasst, um das zu erwartende qualitative Gesamtergebnis der Roboterzelle zu verbessern.

## **Handlungs- und Trajektorienplanung**

Ausgehend von der werkstückbezogenen TCP-Bahn, welche mithilfe üblicher CAD-CAM Tools generiert wird, beginnt die Maschinenebene mit der Handlungsplanung für die Roboterkinematiken. Um beim Abfahren der TCP-Bahn eine gewisse Fertigungsqualität am Werkstück zu gewährleisten, sind die Absolut- und Wiederholgenauigkeit sowie die Steifigkeit der Kinematiken unter Prozesskräften entscheidend. Diese Kenngrößen eines typischen seriell aufgebauten Roboters betragen ungefähr nur ein Hundertstel einer typischen Werkzeugmaschine [2, 3]. Mithilfe der Handlungsplanung können diese Schwächen der Roboterkinematiken durch geschickte Rollenzuteilungen teilweise kompensiert werden. Unter der Rollenzuteilung ist die Gewährleistung von Steifigkeit und Bahngenauigkeit in definierten Raumrichtungen zu verstehen, um die damit verbundenen Fertigungstoleranzen zu sichern. Dies ist nur möglich, wenn sich die Kinematik in einem bestimmten Bereich der Gelenkwinkelkonfiguration und des Arbeitsraums befindet. Daher wird eine Suche nach einer geeigneten Kombination der Arbeitsräume der gekoppelten Kinematiken auf Basis eines angegebenen Konfigurations-Steifigkeits-Zusammenhangs durchgeführt. Beispielsweise kann eine Kinematik in einem gezielt ausgewählten Bereich mit günstigem Hebelarm den Prozesskräften mit ausreichender Steifigkeit entgegenwirken, während die Einhaltung der Bahngenauigkeit durch weitere gekoppelte Kinematiken bewerkstelligt wird. Eine komplementäre Rollenkombination und eine rechtzeitige Rollenänderung ermöglichen die Einhaltung der Fertigungsqualität. Somit entspricht die Handlungsplanung einer Zuteilung der Arbeitsräume, Steifigkeits- und Genauigkeitskomponenten zu den Kinematiken.

Wird eine TCP-Bahn einer einzelnen Roboterkinematik durch die Handlungsplanung berechnet, muss diese im nächs-

ten Schritt in den Gelenkwinkelraum transformiert werden. Dabei müssen zusätzliche Beschränkungen für die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den Ruck berücksichtigt werden, da diese Randbedingungen in der Handlungsplanung nicht betrachtet werden. Handelt es sich um einen nicht zeitkritischen Prozess, kann die Trajektoriengenerierung offline stattfinden. Dabei wird eine zeitoptimale Trajektorie unter Berücksichtigung von dynamischen Beschränkungen erstellt. Neben der Erfüllung dieser Randbedingungen, sollte die Bewegung möglichst bahngetreu generiert werden, sodass der Roboter die gewünschte TCP-Bahn möglichst präzise im Gelenkraum verfolgen kann. Enthält das System nicht modellierte Flexibilitäten führt dies in der Regel zu einer Anregung der Resonanzfrequenzen und damit zu unerwünschten Schwingungen und Beschleunigungsspitzen, die zu einem Nachlauffehler beitragen. Die Online-Trajektoriengenerierungsmethoden ermöglichen es, solche Fehler während der Ausführung zu kompensieren.

## **Simulation und Prozessbewertung**

Mithilfe der generierten Trajektorien erfolgen im nächsten Schritt die Simulation und Validierung der geplanten Operationen unter Berücksichtigung der Interaktion der Roboterkinematiken mit dem Werkstück und dabei entstehender Prozesskräfte. Die Simulation und Modellbildung kooperativer Kinematiken inklusive auszuführender Prozesse stellt noch immer eine große Herausforderung dar. Insbesondere Wechselwirkungen zwischen prozessabhängigen Kräfteverläufen und posenabhängigen statischen und dynamischen Steifigkeiten der (gekoppelten) Kinematiken sowie deren Regelkreise müssen in der Modellierung berücksichtigt werden. Da sich Prozesse und Kinematiken gegenseitig beeinflussen und dies wiederum zu anderen Zuständen führt, ist für jede Parameteränderung ein anderes Ergebnis zu erwarten. Eine Herausforderung dabei ist die Berücksichtigung der vorangegangenen Zustände. Um das flexible System Wertstromkinematik zu beschreiben, werden Simulationsmodule für die Roboterkin-

matiken, die entsprechenden Endeffektoren und für die einzelnen Prozesse aufgebaut. Diese können miteinander gekoppelt werden. Das modulare Simulationsmodell wird automatisch mit den zuvor definierten Parametern aus der Prozessplanung, beispielsweise der Trajektorie parametrisiert. Dabei muss zwischen den relevanten Parametern für die Kinematiksimulation und für den durchzuführenden Prozess unterschieden werden. Alle Teilmodelle müssen zeitlich synchronisiert werden, da diese zur Laufzeit miteinander wechselwirken.

Eine Prozessschrittbewertung prüft während der Simulation auf Abweichungen der zulässigen Prozessvorgaben. Weicht der aktuelle Zustand von den gewünschten Qualitätsmerkmalen ab, wird die Simulation beendet und aufgezeigt wo bzw. wann welche Fehler aufgetreten sind. Damit bietet das Simulationsmodell in der Planung des Wertstroms eine frühe Rückmeldung über die Fähigkeit des geplanten Prozesses, um so das Maximum zwischen Kosten, Zeit und Qualität zu erhalten. Außerdem sollen Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet werden können, die in der Optimierung der Planung unterstützen.

## **Individuelle Modelloptimierung**

Zur Durchführung einer realitätsnahen Simulation ist neben den zugrundeliegenden Simulationsmodellen eine korrekte Parametrierung dieser Modelle notwendig. Individuelle Eigenschaften im statischen und dynamischen Verhalten jeder einzelnen Roboterkinematik und deren Entwicklung über die Zeit (z.B. durch Verschleiß) verhindern jedoch den Einsatz eines einheitlichen Standardparametersatzes. Daraus folgt, dass für jede Kinematik ein individueller und während des gesamten Lebenszyklus fortwährend aktualisierter Parametersatz vorhanden sein muss, der das Verhalten der Roboterkinematik realitätsnah abbildet. Dieser ermöglicht anschließend aufbauend auf der Simulation eine prozessabhängige Optimierung jeder Roboterkinematik (z.B. durch geschickte Anpassung der Achsregelparameter [4]), um je nach Anwendungsfall stets bestmögliche Ergebnisse zu erreichen.

Für die Zustandsermittlung kommen verschiedene Datenquellen (z.B. Beschleunigungssensoren und Motorströme) zum Einsatz. Die gesammelten Daten werden lernenden Algorithmen zugeführt, die damit wiederum, die mit den jeweiligen Roboterkinematiken verknüpften Modelle, aktualisieren. Grundsätzlich ergeben sich hieraus drei Fragestellungen:

- Wie erkennt der Algorithmus, dass ein Modell nicht mehr mit den Eigenschaften der realen Roboterkinematik zusammenpasst und somit eine Aktualisierung erforderlich ist?
- Wann müssen welche Daten gesammelt werden, um ressourcenschonend mit verfügbaren Speicher- und Kommunikationskapazitäten umzugehen?
- Wie berechnen die lernenden Algorithmen aus den Messdaten die Parameter zur Aktualisierung der Modelle?

Für den ersten Punkt findet an einer definierten Stelle (z.B. Roboternase) jeder Roboterkinematik ein Abgleich zwischen den im Betrieb aufgenommenen Beschleunigungswerten und den zugehörigen Simulationswerten statt. Eine Metrik entscheidet anhand dieser Werte wie stark die Simulation von der Realität abweicht und ob eine Aktualisierung notwendig ist. Da eine dauerhafte Aufnahme aller Messwerte Speicher- und Kommunikationskapazitäten unnötig belastet, kommt ein Algorithmus zum Einsatz, der bewertet, welche Daten in welchen Mengen benötigt und gespeichert werden. Mit den gesammelten Daten können lernende Algorithmen anschließend die Kinematikmodelle aktualisieren. Voraussetzung zur Entwicklung dieser Algorithmen sind definierte Schnittstellen zu den Modellen, woraus eine enge Verknüpfung mit den Arbeitsinhalten des Abschnitts Simulation und Prozessbewertung resultiert.

### **Adaption universeller Kinematiken auf individuelle Prozesse**

Neben einer möglichst realitätsnahen Modellierung der Roboterkinematiken stellen insbesondere die eingesetzten Endeffektoren eine weitere wichtige Stellschraube zur Optimierung der Fertigungsqualität dar. Im flexiblen Produktionsumfeld der Wertstromkinematik bie-

ten im Speziellen Endeffektoren, deren Steifigkeit mechatronisch auf den Fertigungsprozess angepasst werden können, Potenzial. Durch solche adaptiven Endeffektoren kann die Wertstromkinematik flexibler an Fertigungsprozesse angepasst werden, ohne unterschiedliche Endeffektoren verwenden zu müssen oder die Eigenschaften in der Regelung der Roboterkinematik zu berücksichtigen. Dies ist besonders bei kombinierten Prozessfolgen von Fertigungs- und Montageprozessschritten vorteilhaft.

Zusätzlich zu den Optimierungsschritten in der Maschinenebene wird im Rahmen des Forschungsvorhabens auch die Entwicklung neuartiger Endeffektoren betrachtet. Für die Durchführung positionsempfindlicher Fertigungsprozesse stellen statische und dynamische Prozesskräfte angesichts geringer Steifigkeit der Roboterkinematik eine Herausforderung für die erreichbaren Genauigkeiten dar. Ein Ansatzpunkt, um die Wertstromkinematik für derartige Fertigungsprozesse zu befähigen, ist die Minimierung der über die Kinematik abzuleitenden Prozesskräfte. Durch die Kompensation von Prozesskräften innerhalb der Werkzeugkonfiguration können die resultierenden Prozesskräfte bei gegebenem oder gar erhöhter Produktivität minimiert werden.

Um die beschriebene Durchführung und Optimierung von Fertigungsprozessen zu ermöglichen, müssen Wirkprinzipien für adaptive und einstellbare Endeffektoren erforscht und Endeffektoren für die Wertstromkinematik entwickelt werden. Allerdings kann dadurch keine Erhöhung der Steifigkeit der gesamten Roboterkinematik erreicht werden. Um dies zu erreichen, werden einzelne Roboterkinematiken starr miteinander gekoppelt.

### **Steuerung gekoppelter Roboterkinematiken**

Die bisher beschriebenen Herausforderungen beziehen sich auf planerische und damit nicht zeitkritische Aktivitäten. Mit der starren Kopplung von Roboterkinematiken geht allerdings auch die zeitkritische, echtzeitfähige Synchronisierung der Roboter einher. Im Fall einer Kopplung aus zwei Robotern entsteht ein sechsfach überbestimmtes System, da

hier zwölf Einzelachsen betrieben werden, um sechs Freiheitsgrade im kartesischen Raum (drei Positionen und drei Orientierungen) anzusteuern [5]. In diesem hochgradig überbestimmten System führen nicht ideale Bewegungsverhalten der Roboterkinematiken und daraus resultierende Abweichungen von der Solltrajektorie zu Verspannungen, wodurch sogenannte Kopplungskräfte entstehen. Die gewünschte möglichst steife Kopplung zwischen den Roboterkinematiken verstärkt diese Problematik zusätzlich. Aus den Kopplungskräften resultieren hohe Drehmomente an den Einzelachsen der Roboterkinematiken, die zur sofortigen Abschaltung der Motoren führt oder aufgrund der kontinuierlich hohen Belastung die Langlebigkeit der Roboter negativ beeinflusst. Um dies zu verhindern ist eine Kompensation der Kopplungskräfte im laufenden Betrieb zwingend erforderlich. Hierfür werden mithilfe von 6-Achsen-Kraft-/Momentsensoren alle auftretenden Kräfte und Momente am TCP der Roboter gemessen. Aus den gemessenen Kräften wird der Anteil der Kopplungskräfte mithilfe eines dynamischen Robotermodells extrahiert. Dieses Modell berechnet zur Laufzeit anhand von Gelenkwinkeln, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen statische und dynamische Lasten der Roboter. Diese Lasten werden von den gemessenen Gesamtlasten subtrahiert, um die gesuchten Kopplungskräfte zu bestimmen.

Sind die Kopplungskräfte bekannt, können diese durch kontinuierliche Korrekturbewegungen der Roboter kompensiert werden. Die so entstandene Rückkopplung der Kopplungskräfte in die Einzelachsregelungen der zwölf Achsen muss in Echtzeit erfolgen. Dies bedeutet, dass die Aufnahme und Verarbeitung der Messwerte, die Berechnung der dynamischen und statischen Lasten, die Bildung von korrigierenden Regelungsgrößen sowie die Kommunikationszeiten in Summe unterhalb des Steuerungstakts bzw. Interpolationstakts liegen müssen. Ausgehend von einer vereinfachten Modellierung werden im ersten Schritt langsame Bewegungsfahrten untersucht, bei denen der Einfluss dynamischer Lasten vernachlässigt werden kann. Das Modell kann zukünftig um dynamische Lasten erweitert werden. Deren Betrachtung er-

fordert eine recheneffizienzoptimierte Modellierung der Roboterlasten und leistungsfähigere Recheneinheiten. Mit der Synchronisierung und Steuerung der Roboterkinematiken schließt die Maschinenebene ab. Die Ergebnisse der Maschinenebene werden an die übergeordnete Produktionsebene weitergeleitet, welche die Planung der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet. Die Funktionsweise dieser planerischen Ebene wird im zweiten Teil des Artikels in der nächsten Ausgabe vorgestellt.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Wertstromkinematik besitzt das Potential, die Zukunft der Produktionstechnik nachhaltig zu verändern. Als visionäres Produktionssystem berücksichtigt sie die wesentlichen Merkmale von innovativer Produktion: Maximale Flexibilität, autonome Anpassbarkeit, schnelle Inbetriebnahme und eine flexible modulare Steuerungsarchitektur. Die erfolgreiche Umsetzung dieses Konzepts erfordert ein Team an Wissenschaftler:innen verschiedenster technischer Disziplinen, die auf ein gemeinsames Ziel hinarbeiten. Um die Vision der Wertstromkinematik erfolgreich umzusetzen, dürfen die einzelnen Teilprojekte allerdings nicht als abgekapselte Systeme betrachtet werden. Stattdessen sind ein enger Austausch zwischen den Wissenschaftlern und eine konsequente Berücksichtigung gemeinsamer Schnittstellen erforderlich. Unter dieser Zusammenarbeit soll Anfang 2023 am Karlsruher Institut für Technologie ein funktionsfähiger Prototyp bestehend aus zwei koppelbaren Roboterseinheiten entstehen und dabei noch unerkannte Forschungsfelder und Problemstellungen zur Realisierung der Vision Wertstromkinematik identifiziert wer-

den. Das Forschungsteam am Karlsruher Institut für Technologie beschäftigt sich daher bereits jetzt damit neben den essentiellen Herausforderungen des Produktionskonzepts auch den Grundstein für die zukünftige Forschung und Entwicklung zu legen.

## Literatur

1. Mühlbeier, E.; Gönnheimer, P.; Hausmann, L.; Fleischer, J.: Value Stream Kinematics. In: Behrens, B.; Brosius, A.; Hintze, W.; Ihlenfeldt, S.; Wulfsberg, J.P. (Hrsg.): Production at the Leading Edge of Technology. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2021, S. 409-418 DOI: 10.1007/978-3-662-62138-7\_41
2. Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. 7. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006
3. Abele, E.; Bauer, J.; Rothenbücher, S.; Stelzer, M. et al.: Prediction of the Tool Displacement by Coupled Models of the Compliant Industrial Robot and the Milling Process. In: Proceedings of the International Conference on Process Machine Interactions, 3-4 September 2008, S. 223-230,
4. Rusin, V.: Adaptive Regelung von Robotersystemen in Kontaktaufgaben. Dissertation, Universität Magdeburg, 2007
5. Spiller, A Unterstützung der Werkstückhandhabung kooperierender Industrieroboter durch Kraftregelung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2014

## Die Autoren dieses Beitrags

Edgar Mühlbeier, M. Sc, geb. 1993, promoviert als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk des Karlsruher Institut für Technologie im Bereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung in den Fachgebieten Robotik und Steuerungstechnik.

Florian Oexle, M. Sc, geb. 1994, promoviert als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk des Karlsruher Institut für Technologie im Bereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung in den Fachgebieten Werkzeugmaschinen und Maschinendynamik.

Philipp Gönnheimer, M. Sc, geb. 1992, promoviert als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk des Karlsruher Institut für Technologie im Bereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung und ist Gruppenleiter für Werkzeugmaschinen und Mechatronik.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer studierte Maschinenbau an der Universität Karlsruhe (TH) und promovierte 1989 am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk). Von

1992 an war er in mehreren leitenden Positionen in der Industrie tätig, ehe er im Jahr 2003 zum Professor und Leiter des wbk Institut für Produktionstechnik am heutigen Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berufen wurde. Darüber hinaus ist er seit 2012 Gastprofessor an der Tongji-Universität in Shanghai. Als anerkanntes Mitglied der wissenschaftlichen Gemeinschaft betätigt sich Prof. Fleischer in diversen nationalen und internationalen Gesellschaften. Darüber hinaus engagiert sich Prof. Fleischer bei der Deutschen Akademie für Technikwissenschaften (Acatech) und ist Mitglied mehrerer wissenschaftlicher und industrieller Beiräte. Seit dem Jahr 2020 ist Professor Fleischer Sprecher des Batteriekompetenzclusters des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF.

## Weitere Autoren dieses Beitrags

Xin Ye, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann; Dr. Ilshat Mamaev; Thomas Bertram, M.Sc.; Maximilian Bryg, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther; Prof. Dr.-Ing. Martin Kipfmüller; Frank Bremer, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen; Tassilo Arndt, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze.

## Abstract

Wertstromkinematik – Rethinking Production Systems. Interdisciplinary Research Team works on the production technology of the future (Part 1). Industry 4.0 has become a well-known trend of the last decade that represents innovation and creativity in research and industry. However, Industry 4.0 equals an essentially digital innovation right now. In order to fully exploit the potential of Industry 4.0, the production machines and systems of the future have to be rethought too. The research project “Wertstromkinematik” addresses this challenge. The novel production concept aims at designing entire production lines using multiple identical, robot-like kinematics. This production design provides a transformation capability that enables the full potential of Industry 4.0 and contributes to the sustainability and flexibility of global value chains.

## Schlüsselwörter

Robotik, Kopplung von Robotern, Produktionssysteme, Wertstromkinematik, Industrie 4.0, WSK

## Keywords

Robotic, Coupled Robots, Production Systems, Wertstromkinematik, Industry 4.0, WSK

## Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Mühlbeier, E.; Oexle, F.; Gönzheimer, P.; Fleischer, J.  
[Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht – Interdisziplinäres Forscherteam arbeitet an der Produktionstechnik der Zukunft \(Teil 1\)](#).  
2021. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 116  
[doi:10.5445/IR/1000141079](https://doi.org/10.5445/IR/1000141079)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Mühlbeier, E.; Oexle, F.; Gönzheimer, P.; Fleischer, J.  
[Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht – Interdisziplinäres Forscherteam arbeitet an der Produktionstechnik der Zukunft \(Teil 1\)](#).  
2021. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 116 (11), 847–851.  
[doi:10.1515/zwf-2021-0179](https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0179)

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)