

Rubrik Automatisierung, Produktionssystemsteuerung, Machine Learning

## Titel Digitale Produktion und intelligente Steuerung

Untertitel Integration digitaler und realer Produktion zur adaptiven, automatisierten Steuerung

Autoren Marvin Carl May, Andreas Kuhnle, Gisela Lanza

(Autorenangaben)

M.Sc. Marvin Carl May, M.Sc. Andreas Kuhnle, Prof. Dr. Gisela Lanza  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 12, D-76131 Karlsruhe  
Tel. +49 (0)721 / 608-44005  
E-Mail: Marvin.May@kit.edu  
Internet: www.wbk.kit.edu

Danksagung

Diese Forschung wurde im Rahmen des DIGIMAN4.0 Projekts ("DIGItal MANufacturing Technologies for Zero-defect Industry 4.0 Production", <http://www.digiman4-0.mek.dtu.dk/>) durchgeführt. DIGIMAN4.0 ist ein European Training Network unterstützt durch Horizon 2020, das EU Rahmenprogramm für Forschung und Innovation (Project ID: 814225).

**Inhalt (deutsch) Im Rahmen der stufenweisen Umsetzung von Industrie 4.0 erreicht die Vernetzung und Digitalisierung die gesamte Produktion. Den physischen Produktionsprozess nicht nur cyber-physisch zu begleiten, sondern durch eine virtuelle, digitale Kopie zu erfassen und optimieren, stellt ein enormes Potential für die Produktionssystemplanung und -steuerung dar. Zudem ermöglichen digitale Modelle die Anwendung intelligenter Produktionssteuerungsverfahren und stellen damit einen Beitrag zur Verbreitung optimierender adaptiver Systeme dar.**

**Titel und Untertitel in Englisch *Digital Production and intelligent Production Control Integrating digital and real-world production for adaptive and automated control***

*Abstract (englisch) In the wake of implementing Industry 4.0 both integration and digitalization affects the entire production. Physical production systems offer enormous potential for production planning and control through virtual, digital copies and their optimization, well beyond purely cyber-physical production system extensions. Furthermore, digital models enable the application of intelligent production control and hence contribute to the dissemination of adaptively optimizing systems.*

### 1 Einleitung und Überblick

Zur Optimierung der Produktion wird der Digitalisierung seit geraumer Zeit großes Potential zugeschrieben. Insbesondere im Zuge der Zukunftsbewegung „Industrie 4.0“ wird die Produktion zunehmend digital vernetzt und die Umsetzung kundenindividueller Produktionslösungen konsequent vorangetrieben [1]. Dabei existieren verschiedenste Formen der digitalen Produktionserweiterung, zugeschnitten auf verschiedene Ziele und Betrachtungsebenen innerhalb einer Organisation. Neben den nationalen Initiativen zur Umsetzung einer digitalisierten Produktion wie „Industrie 4.0“ in Deutschland [2], „Industrie du Futur“ in Frankreich [3], „Industrial Internet Consortium“ in den Vereinigten Staaten [4], „Industrial Value Chain“ in Japan [5], „Connected Smart Factory“ in Korea [6] oder „Made in China 2025“ in China [7] existieren diverse Architekturen zur Produktionsdigitalisierung. Jede dieser Architekturen betrachtet die Digitalisierung der Produktion unter einem eigenen Gesichtswinkel. Eine kohärente, gleichzeitige und somit integrierte Untersuchung der verschiedenen Perspektiven und ihrer potentiellen Anwendungen ermöglicht die

Bestimmung von Grundlagen und Werkzeugen zur intelligenten Produktionssteuerung. Die Übergabe von Steuerungsaufgaben an intelligente Systeme setzt neben einem umfassenden Datenmodell, eine Steuerungsarchitektur und insbesondere ein adäquates Optimierungsverfahren voraus [8]. Nur so kann die im Rahmen größerer Variantenvielfalt und stetig verkürzender Produktlebenszyklen geforderte Flexibilität erreicht werden [8]. Auch von Seiten der Industrie wird der Bedarf nach einer wandlungsfähigen und skalierbaren Produktion konstatiert [9].

Zwar sind Einführungsstrategien für Industrie 4.0 [10] und Methoden zur Identifikation und Einführung geeigneter Einzelwerkzeuge [1] bekannt, deren Umsetzung wird jedoch durch die notwendige Integration in die bestehende Digitalisierungsstruktur erschwert. Eine strukturierte Systematik zur gemeinsamen Verwendung visionärer Digitalisierungsstrategien und praktischer Einzelwerkzeuge für die Produktion kann hier Abhilfe schaffen.

## 2 Stand der Technik

Um die höchsten Formen der Anwendung von Industrie 4.0, wie bspw. Prognosefähigkeit und autonome Steuerung nach „acatech Reifegradmodell“ [11], zu erreichen, ist eine integrierte Digitalisierungsbetrachtung von Nöten. Konkret verspricht die intelligente Steuerung und autonome Regelung Effizienzgewinne in der Produktion [11]. Grundlage jeglicher Digitalisierungsbestrebungen ist weiterhin eine groß angelegte Datenaufnahme durch Sensoren. Nur durch Vernetzung der Sensordaten kann ein cyber-physisches Produktionssystem geschaffen werden, sodass die Verknüpfung von Daten untereinander und mit physischen Objekten an Bedeutung gewinnt. Als Konzept steht der „Digitale Schatten“ [12] an dieser Stelle im Vordergrund. Ziel ist die Nutzung der gesammelten Daten als Schattenabbild der realen Produktion zur Prozessanalyse. Durch die systematische und systemübergreifende Sammlung und Verknüpfung relevanter Produktionsdaten direkt auf Steuerungsebene entstehen unzählige Möglichkeiten zur Analyse der Produktionsvorgänge und ihrer proaktiven Steuerung. Somit existiert ein Instrument, um auch bisher unbekannt Interdependenzen in den Daten des „Digitalen Schattens“ der Produktion automatisiert aufzudecken. Die Beobachtungen werden aus dem stetigen Informationsfluss der Produktion abgefangen und in das Datenmodell des „Digitalen Schattens“ eingepflegt. So entsteht ein digitales, historisches, aber stetig aktualisiertes Abbild der Produktion. Aufgrund der Analyse dieser Beobachtungsdaten können deskriptive Aussagen, d.h. zu vergangenen Ereignissen, prädiktive, d.h. Aussagen zu Vorhersagen und präskriptive Aussagen, d.h. Handlungsempfehlungen, getroffen werden [12]. Kern dieses Ansatzes ist die Verknüpfung der realen Produktion mit der digitalen Datenhaltung als cyber-physisches System [13].

Die Anreicherung eines solchen Abbilds mit Planzeiten und -werten zur Identifikation von notwendigen und verbessernden Änderungen mündet im „Digitalen Zwilling“ [13]. In Abgrenzung zum „Digitalen Zwilling“ für individuelle Produkte [14], bei dem jedem Produkt eine digitale Kopie seiner Produktionsdaten zur Verfügung gestellt wird, von Design bis zur Nutzung [15], dreht sich in diesem Fall alles um die gesamte Produktion und ihre Steuerung. Dazu wird ein adäquates Abbild der Produktion, z.B. in Form eines Simulationssystems, potentiell zu jedem Zeitpunkt mit den aktuellen Daten des Digitalen Schattens initialisiert [13], sodass der „Digitale Zwilling“ einen Blick in das kurz- bis mittelfristige zukünftige Verhalten des Produktionssystems erlaubt. Somit kann der Entwicklungspfad des Systems beurteilt werden, sowie mittels Vergleich von „Digitalem Zwilling“ und „Digitalem Schatten“ notwendige Änderungen an Steuerungsstellhebeln identifiziert werden. Durch eine Parallelisierung des „Digitalen Zwillings“ lassen sich auch verschiedene Szenarien für die zukünftige Entwicklung untersuchen. **Bild 1** gibt eine Übersicht über die vorgestellten Ansätze. Der Regelkreis führt dabei von der Identifikation notwendiger Änderungen zurück zum jeweiligen Stellhebel in der operativen Planung oder Steuerung.

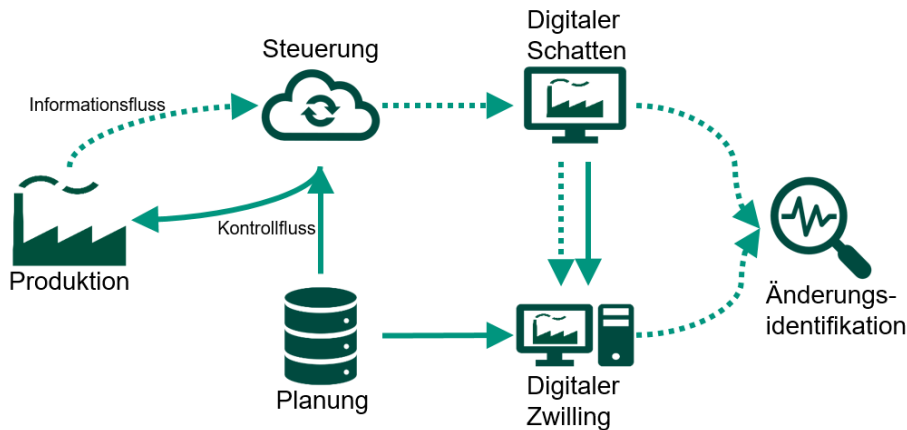


Bild 1: Kontroll- und Informationsflussschema des digitalen Zwillings (eigene Darstellung)

Hiervon zu unterscheiden ist die „Virtuelle Produktion“ bei der ein „experimentierfähiges Modell [...] das Produkt in seiner Produktionsumgebung“ abbilden soll [16] und gleichzeitig eine virtuelle Produktionsumgebung geschaffen wird, um die Produktionssystemgestaltung integriert mit dem Produkt zu betrachten [17]. Dies ermöglicht zum einen eine verbesserte Planungsphase und zum anderen ein Simulationsmodell der Prozesse. Im Regelfall kann solch eine Simulation stufenweise aufgebaut werden, sodass Teilsimulationen und -ergebnisse von Einzelprozessen und Stationen die Grundlage für die Simulation der nächsthöheren Ebene liefern [16].

In ähnlicher Weise nutzt die „Digitale Fabrik“ den Gestaltungstreiber „Simulation und Bewertung“ [16] zur Erschaffung einer Soll-Simulation der idealen Produktion. Zusätzlich wird die Fabrik in diesem Fall digitalisiert durch die Integration von „Datenmanagement und Kommunikation“ sowie entlang des Treibers „Modellierung und Visualisierung“ [16]. Solch eine zunehmend digitalisierte Fabrik kann, aufgrund der besseren Steuerbarkeit, als anpassungsfähiger angesehen werden [18] und schafft gleichzeitig die notwendigen Grundlagen zu verbessertem Prozessverständnis. Dabei werden Modelle für alle Betrachtungsebenen von Prozess bis Fabrik erzeugt und ihre Visualisierung ermöglicht. Wie in **Bild 2** dargestellt, sind auch hier die passende Sensorik, Vernetzung sowie allgemeine Schnittstellen wichtige Elemente einer volldigitalisierten Fabrik. Ein Schwerpunkt liegt auf Sichtbarmachung von Produktionsabläufen und Steuerungseinflüssen, um die Kontrolle über die zunehmend komplexe Fabrik zu behalten.

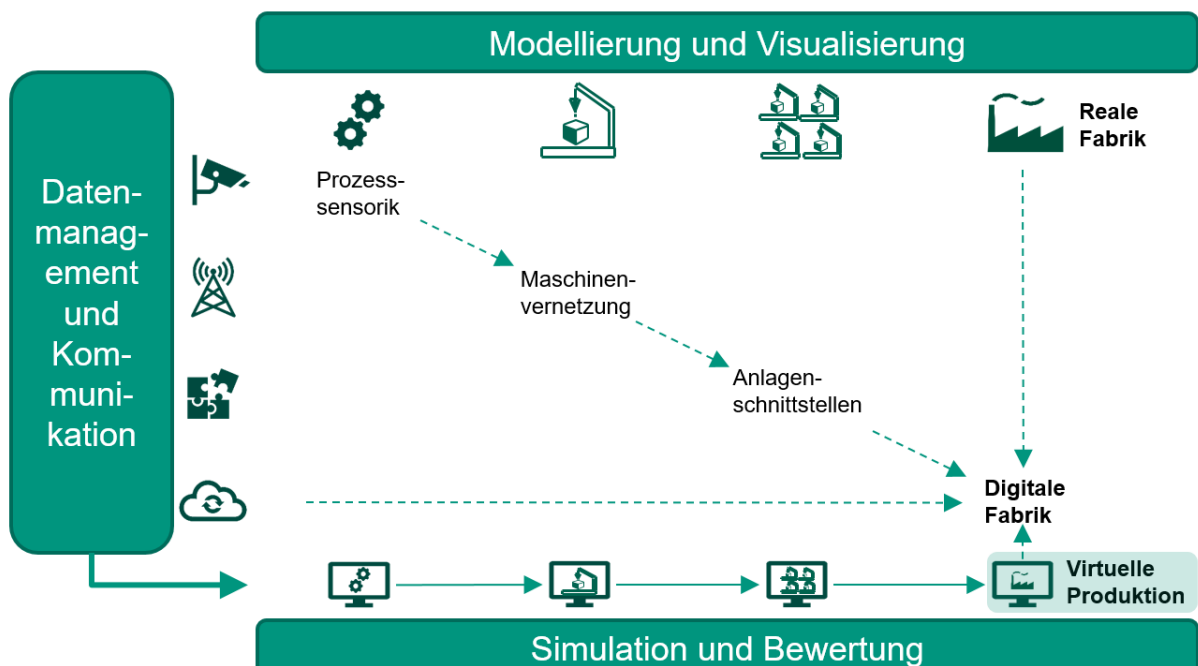


Bild 2: Gestaltungstreiber auf dem Weg zur Digitalen Fabrik (eigene Darstellung)

In Analogie zu den zuvor genannten Konzepten entsteht die „Virtuelle Logistik“, bei der in einer experimentellen Simulation die Logistikplanung durch ein virtuelles Modell optimiert wird [19]. Damit unterscheidet sich dieser Ansatz in seiner Einordnung bezogen auf den zeitlichen Horizont und durch eine Verknüpfung mit Realdaten. Es findet keine Rückkopplung von beobachteten Daten mit dem Simulationsmodell statt. Zwar ist ein Einsatz in der laufenden Produktion nicht ausgeschlossen [20], jedoch nicht das primäre Ziel. Die „Virtuelle Logistik“ kann somit in die Planungsphase und in Teilen in die Umsetzungsphase verortet werden, wie in **Bild 3** dargestellt.



Bild 3: Virtuelle Logistik und Einordnung in die Anlaufphase der Produktion (eigene Darstellung)

In vergleichbarer Weise zur „Digitalen Fabrik“ wird auf globaler Ebene oft von sog. „Smart Factories“ gesprochen, mit der Vision der Produktion mit weniger menschlichem Zutun [21]. Allerdings vernachlässigt diese auf einzelne Fabriken begrenzte Sichtweise die Realität insofern, als dass das produzierende Gewerbe durch seine internationale Vernetzung mittlerweile in vielen Fällen gleichzeitig mehrere Standorte koordinieren muss. Als Lösungsvorschlag ergibt sich daraus das Konzept der „Smart Factory Networks“ [21]. Diese strategische Sichtweise verwendet Regelkreise als Top-Down Vorgehen bis hin zur operativen Produktionsebene **Bild 4**.

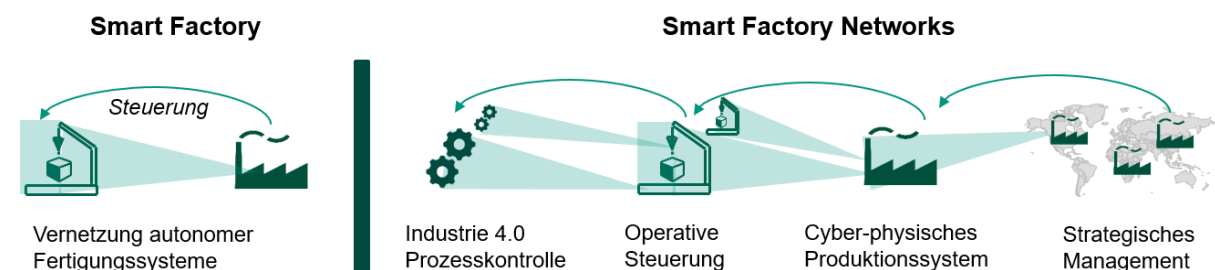


Bild 4: Smart Factory Networks und ihre Analogie zu einzelnen Fabriken (nach Friedli [21])

### 3 Ansatz

Unter den verschiedenen Verfahren zur Verknüpfung der Produktion mit ihren unterschiedlichen Phasen (Planung, Umsetzung, Produktion), den jeweiligen Stellhebeln und Einflüssen sticht neben einem Ansatz zum integrierten Produktionsmanagement für Hochqualitätsprodukte [22] insbesondere die Produktionsplanung und -Steuerung (PPS) [23] durch ihre integrierte Betrachtung und Optimierung von Zeit und finanziellen Flüssen hervor. Die PPS lässt sich hierarchisch in die strategische, taktische und operative PPS gliedern [24]. Erkennbar in der Veranschaulichung in **Bild 5** dient die Strategie als relevanter Faktor für taktische Entscheidungen und gleichzeitig werden die Ergebnisse der taktischen PPS zur Entscheidungsfindung im strategischen Bereich herangezogen. In gleicher Weise sind kurzfristige Entscheidungen mit den Zielen der taktischen PPS verknüpft. Die Veränderung der Variablen setzt ein Feedbacksystem in Gang und ermöglicht so eine zielorientierte PPS. Notwendig ist hierbei die Unterstützung durch geeignete Softwaresysteme [23]. Hierbei fehlt jedoch in bestehenden Architekturen die Verknüpfung und Erweiterung mit den zuvor vorgestellten Digitalisierungskonzepten der Produktion.

Aufgrund ihrer starken Abstraktion und dem Fokus auf die experimentelle Simulation der Logistikvorgänge eignet sich die „Virtuelle Logistik“ insbesondere im Rahmen von Standort-, Technologie- und Produktkonzeptentscheidungen als Festlegungshilfe. In ähnlicher Weise bietet sich die „Virtuelle Produktion“ an der Schnittstelle von strategischen und taktischen Entscheidungen als datengetriebene Unterstützung an,

ermöglicht sie doch die Betrachtung der Verknüpfung von Produkt und Produktionssystem [16]. Zur mittelfristigen Steuerung der Produktion kann die „Digitale Fabrik“ herangezogen werden, da diese durch Zusammenspiel der Produktion sowie ihrer virtuellen Abbilder und Modelle mit den aufgenommen Realdaten ermöglicht wird. An der Schnittstelle von Planung zu Steuerung, bezieht sich die Digitalisierung „[...] auch auf Teile des Fabrikbetriebs“ [18]. Der Fabrikbetrieb selbst, anzusiedeln im Bereich der operativen PPS, lässt sich idealerweise mit seinem „Digitalen Zwilling“ verknüpfen. So können Simulationen jederzeit passend initialisiert, kurzfristige Entwicklungen antizipiert und durch eine entsprechende Steuerung optimiert werden.

Zur Verifikation und Überprüfung von taktischen Entscheidungen kann der „Digitale Schatten“ dienen. Er gibt ein akkurates Abbild der operativen Entscheidungen wieder und ermöglicht so die Nachvollziehbarkeit der Auswirkungen verschiedener Stellhebel zur Systemoptimierung und -steuerung [12]. Gleichzeitig fungiert der „Digitale Schatten“ als Vorstufe zum „Digitalen Zwilling“ auf operativer Ebene. Die Übertragbarkeit auf größere Entitäten, umgesetzt in „Smart Factory Networks“, ermöglicht den Einblick in die taktische PPS und ihre Ergebnisse, um deren Auswirkungen in die strategischen Entscheidungsfindungen einfließen zu lassen. Dadurch kann der Umsetzungsprozess intelligenter Produktionssteuerungsverfahren durch Kombination geeigneter und potentiell vorhandener Lösungen beschleunigt werden. Gleichzeitig entstehen Potentiale in der Nutzung anlagenübergreifender Digitalisierungsstrukturen sowie im Rahmen der Zuordnung von Steuerungsproblemen zu verschiedenen Phasen.

Dazu wird das Steuerungsproblem in die drei Ebenen der PPS eingeordnet und durch Detaillierung der Anforderungen das passende Digitalisierungskonzept gewählt. Hierdurch werden die Nutzung von Individualsimulationen und einmalige Datenaufnahme [25] mit regelmäßigen Datenexports hinfällig. Existierende Ansätze wie stochastische Simulationen zu Flexibilitätsbewertungen [26] können die o.g. Digitalisierungsstrukturen sinnvoll ergänzen, jedoch nicht ersetzen. In ähnlicher Weise ermöglicht die strukturelle Analyse der vorhandenen Digitalisierungskonzepte die Identifikation von einfach umsetzbaren Realisierungen intelligenter Steuerungen.

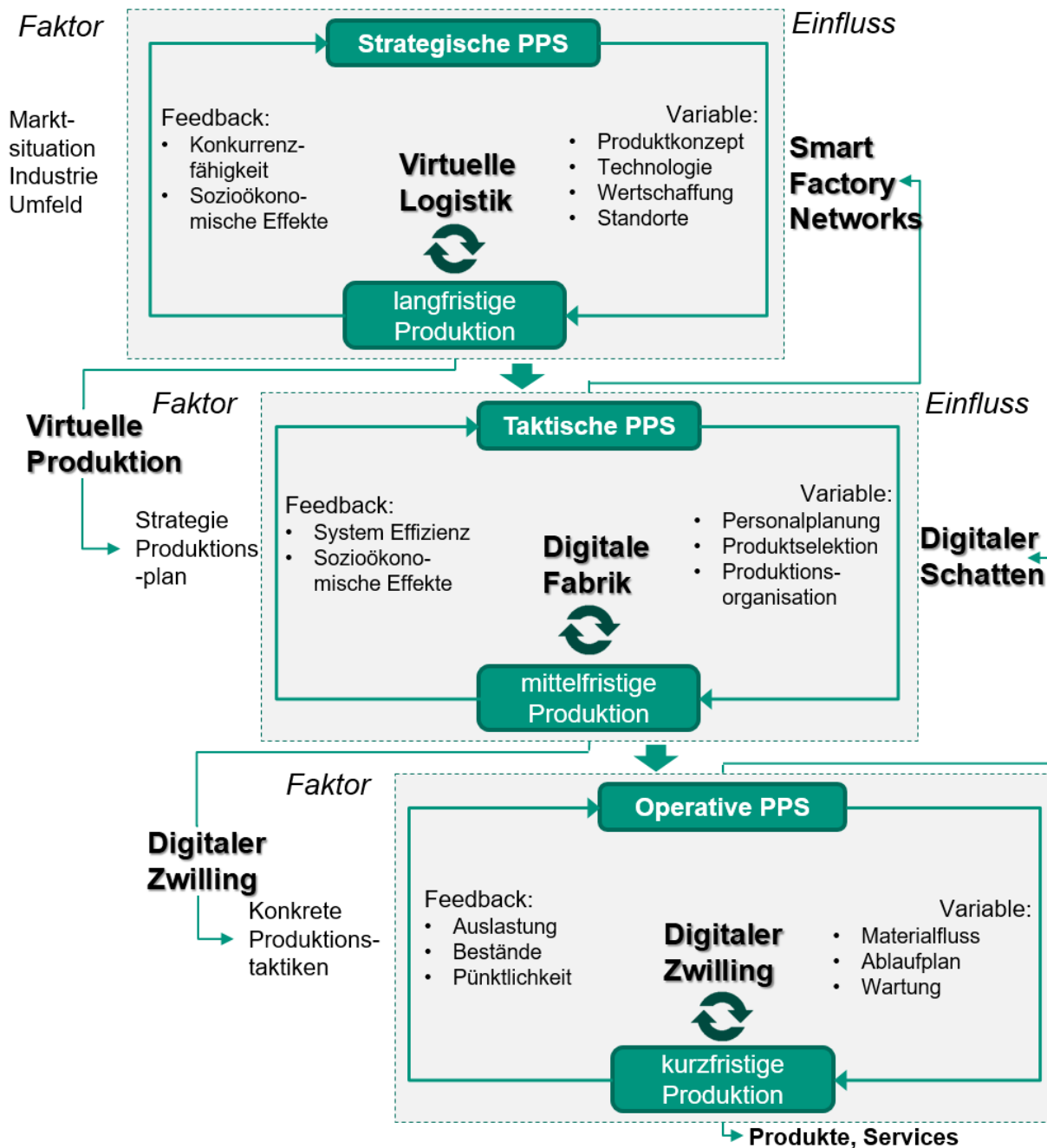


Bild 5: Ansatzpunkte von Digitalisierungsstrukturen am Modell der PPS (nach Wiendahl [24])

#### 4 Fallstudie zur Anwendung intelligenter Steuerungen mittels „Digitalem Zwilling“

Die Einführung der Produktionsdigitalisierung ist insbesondere in der Halbleiterindustrie weit vorangeschritten [27], sodass in dieser Fallstudie die Disposition von Aufträgen in einer Werkstattfertigung untersucht wird. Das Problem lässt sich der operativen PPS zuordnen. Im exemplarischen Produktionssystem, siehe **Bild 6**, existieren acht Maschinen und drei Quellen bzw. Senken. Als Besonderheit der Halbleiterindustrie gibt es einen komplexen Materialfluss mit gleichzeitig hoher Variantenvielfalt und individuellen Anforderungen an die Produktrouten. Zudem kann jedes Produkt auf mehreren Maschinen bearbeitet werden. Die folgenden Untersuchungen bauen auf dem Anwendungsfall von Kuhnle et al. [28] auf. Dispatching Probleme dieser Art, d.h. die integrierte Betrachtung von Transport- und Reihenfolgeentscheidung, lassen sich in ein Markov Entscheidungsproblem überführen, sodass dynamische Programmierung bzw. Reinforcement Learning (RL) als geeignete Lösungsverfahren zur Verfügung stehen [29]. Aufgrund der Komplexität und zeitlichen Invarianz dieser Probleme ist eine optimale Lösung nicht realistisch auffindbar, mittels RL jedoch können intelligente Agenten durch Belohnungssignale antrainiert werden. Deshalb werden in der realen Anwendung aktuell

heuristische Verfahren eingesetzt [30]. Die schwere Anpassbarkeit der Heuristiken an neue, sich ändernde Produktionssituationen führt zu hohen Potentialen durch eine adaptive und intelligente Produktionssteuerung. Die Existenz eines „Digitalen Schattens“ als Digitalisierungskonzept ermöglicht die Anwendung stets aktueller und flexibel initialisierbarer Simulationen und somit die Erschaffung eines „Digitalen Zwillings“ für den betrachteten, lokal beschränkten Bereich. In diesem können Agenten trainiert werden und anschließend als Produktionssteuerung im realen System implementiert werden.

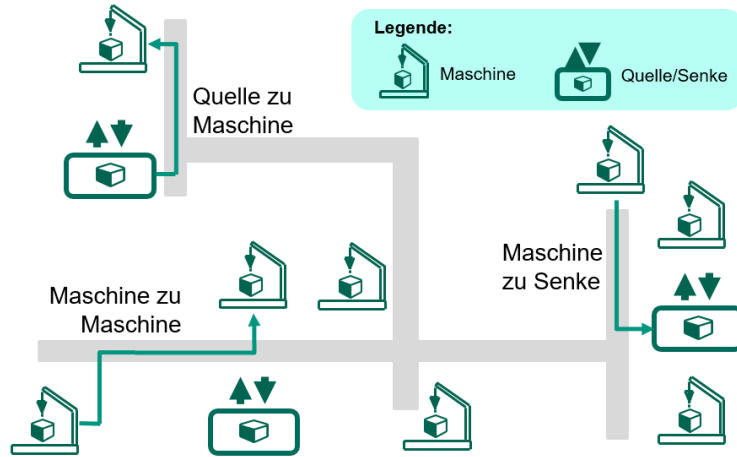


Bild 6: Betrachtete Werkstattfertigung (eigene Darstellung)

Ziel dieser operativen Steuerung ist die Reduktion von Wartezeiten der kundenindividuellen Aufträge sowie eine hohe Auslastung der Maschinen. Die Belohnung des steuernden Agenten besteht aus dem gewichteten Mittelwert der beiden Einzelziele. Über die Steuerung der Gewichte lassen sich verschiedene Betriebspunkte der Produktion einstellen. Neben der Adaptivität an sich ändernde Systeme und der verbesserten Steuerung im Vergleich zu Heuristiken, entsteht die Möglichkeit der direkten Berücksichtigung der Kennwerte aus dem „Digitalen Zwilling“ für die reale Steuerung.

Im Rahmen der situativen Auswahl möglichst geeigneter Agenten anhand eines Vergleichs im „Digitalen Zwilling“, dargestellt in **Bild 7**, kann die Produktion bedarfsgerecht gesteuert werden. Dadurch können Trade-offs zwischen Wartezeit und Auslastung zugunsten der realen Bedürfnisse getroffen werden. Die in **Bild 7** gezeigten Verhaltensweisen beruhen auf zwei gebräuchlichen Heuristiken in der Halbleiterherstellung: First-In-First-Out (FIFO) und Nearest-Job-First (NJF) [27] sowie zwei individuell antrainierte Reinforcement Learning (RL) Steuerungsagenten vergleichbar zu [28]. Durch geeignete Erweiterungen können weitere intelligente Verfahren zur Steuerung sowie neue Steuerungsziele im o.g. Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden.

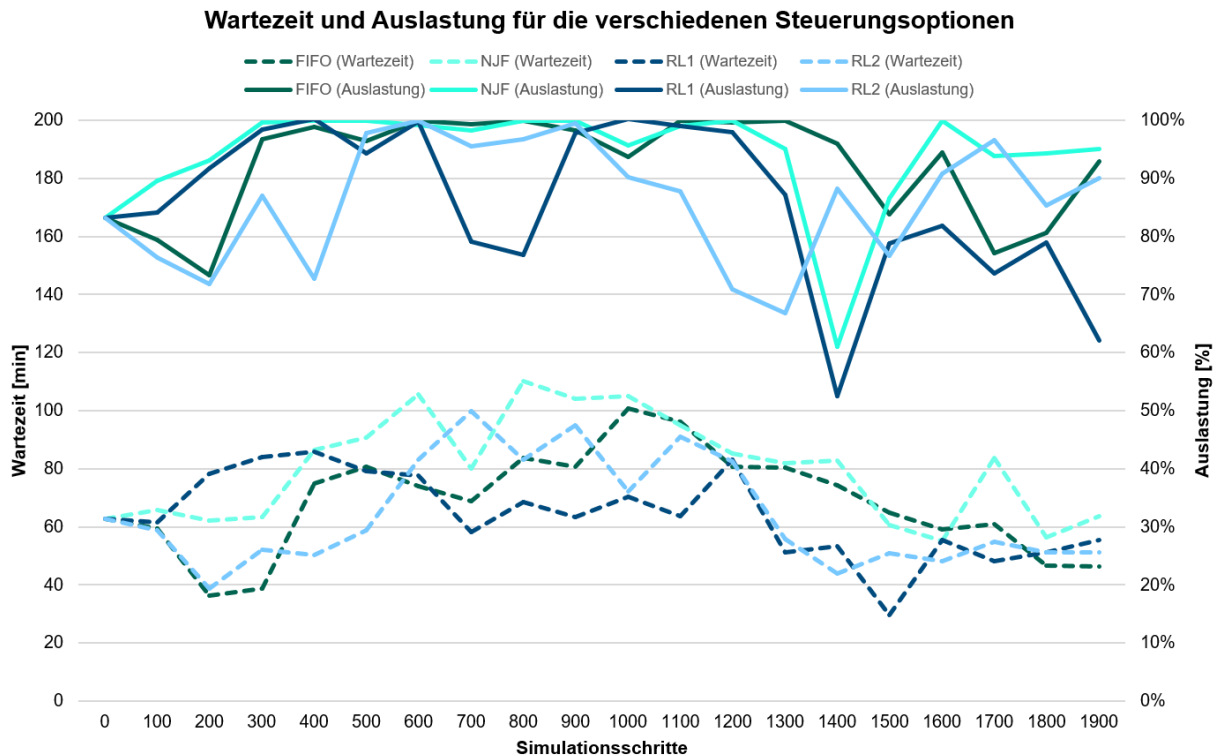


Bild 7: Vergleich von Auslastung und Wartezeit verschiedener Dispositionsagenten im "Digitalen Zwilling" (eigene Darstellung)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Intelligente Steuerungssysteme können ihr volles Potential erst in der Kopplung mit passenden Digitalisierungsstrukturen entfalten. Das hier vorgestellte RL lässt sich in Verknüpfung mit dem „Digitalen Zwilling“ insbesondere in der operativen PPS sowie im Bereich der vorrausschauenden Instandhaltung, d.h. der optimalen, echtzeitbasierten Instandhaltungsplanung, [31] anwenden. Der praktische Vergleich zeigt die Überlegenheit solch integrativer Modelle und gibt Empfehlungen zu notwendigen Implementierungen. Gleichzeitig zeigt es aber auch die Möglichkeiten des Einsatzes intelligenter Steuerungen in bereits umgesetzten Digitalisierungsstrukturen auf. Ein großer Mehrwert ist durch die intelligente Steuerung, als höchster „Industrie 4.0“ Reifegrad [11], zu erwarten. Durch die konsequente Umsetzung von Digitalisierungsstrukturen werden intelligente, autonome Kontrollsystemen zunehmend einführbar und dieser Mehrwert realisierbar. Weiterer Forschungsbedarf besteht somit insbesondere im Bereich von neuen intelligenten Steuerungsverfahren sowie deren Optimierung und Analyse.

Fließtext

## Literatur

### Literatur

- [1] Liebrecht, C.; Krogmann, M.; Lanza, G.: Methoden-Toolbox zur Einführung von Industrie 4.0. wt Werkstattstechnik online 09 (2019) 4, S. 214–220
- [2] Lanza, G.; Nyhuis, P.; Ansari, S. M. et al.: Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 1-2, S. 76–79
- [3] Bidet-Mayer; Thibaut: Industrie du futur : concepts et état des lieux. Les Synthèses de La Fabrique 3 (2016) 2



- [4] Industrial Internet Consortium and others: Industrial internet reference architecture. Internet: <http://www.iiconsortium.org/IIRA.htm>. Zugriff am 04.11.2019
- [5] Industrial Value Chain Initiative: Industrial Value Chain Reference Architecture-Next. Strategic implementation framework, Japan, 2018
- [6] Park, S.: Development of Innovative Strategies for the Korean Manufacturing Industry by Use of the Connected Smart Factory (CSF). *Procedia Computer Science* 91 (2016), S. 744–750
- [7] 周; 济: 智能制造——“中国制造 2 0 2 5”的主攻方向. *Intelligent Manufacturing - Main Direction of "Made in China 2025"* - Zhou, Ji. *中国机械工程* 26 (2015) 17, S. 2273–2284
- [8] Echsler Minguillon, F.; Lanza, G.: Maschinelles Lernen in der PPS. *wt Werkstattstechnik online* 107 (2017) 9, S. 630–634
- [9] Heinen, T.; Peter, K.; Erlach, K. et al.: Zukunftsthemen der Fabrikplanung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 5, S. 405–409
- [10] Hübner, M.; Liebrecht, C.; Malessa, N. et al.: Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0. *wt Werkstattstechnik online* 107 (2017) 4, S. 266–272
- [11] Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J. et al.: Industrie 4.0 Maturity Index. *Managing the Digital Transformation of Companies*, acatech - National Academy of Science and Engineering, 2017
- [12] Schuh, G.; Walendzik, P.; Luckert, M. et al.: Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 11, S. 745–748
- [13] Uhlemann, T. H.-J.; Lehmann, C.; Steinhilper, R.: The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP* 61 (2017), S. 335–340
- [14] Schleich, B.; Anwer, N.; Mathieu, L. et al.: Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals* 66 (2017) 1, S. 141–144
- [15] Wagner, R.; Schleich, B.; Haefner, B. et al.: Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products. *Procedia CIRP* 84 (2019), S. 88–93
- [16] Zäh, M. F.; Patron, C.; Fusch, T.: Die Digitale Fabrik. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 98 (2003) 3, S. 75–77
- [17] Gausemeier, J.: Systematik der Fertigungsplanung im Kontext virtueller Produktion. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (2004) 6, S. 327–334
- [18] Sauer, O.: Einfluss der Digitalen Fabrik auf die Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004) 1/2, S. 31–34
- [19] Schneider, M.: Virtuelle Logistik in der Automobilindustrie (1). *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007) 1-2, S. 78–81
- [20] Schneider, M.: Virtuelle Logistik in der Automobilindustrie (2). *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007) 3, S. 164–168
- [21] Friedli, T.; Lanza, G.; Schuh, G. et al.: Industrie 4.0 – ein Beitrag zur Entwicklung von „Smart Networks“. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 6, S. 378–382
- [22] Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A. et al.: Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals* 63 (2014) 2, S. 773–796
- [23] Wiendahl, H.-P.; EIMaraghy, H. A.; Nyhuis, P. et al.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 783–809
- [24] Wiendahl, H.-P.: *Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. München: Hanser 1997
- [25] Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T. et al.: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals* 65 (2016) 2, S. 621–641
- [26] Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 6, S. 530–534
- [27] Mönch, L.; Fowler, J. W.; Mason, S. J.: *Production planning and control for semiconductor Production planning and control for semiconductor wafer fabrication facilities: modeling, analysis, and systems*. Springer Science & Business Media 2012
- [28] Kuhnle, A.; Röhrig, N.; Lanza, G.: Autonomous order dispatching in the semiconductor industry using reinforcement learning. *CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. 12th (2018)
- [29] Kuhnle, A.; Kuttler, M.; Dümpelmann, M. et al.: Intelligente Produktionsplanung und -steuerung. *wt Werkstattstechnik online* 107 (2017) 9, S. 625–629
- [30] Kuhnle, A.; Schäfer, L.; Stricker, N. et al.: Design, Implementation and Evaluation of Reinforcement Learning for an Adaptive Order Dispatching in Job Shop Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 234–239
- [31] Kuhnle, A.; Jakubik, J.; Lanza, G.: Reinforcement learning for opportunistic maintenance optimization. *Production Engineering* 13 (2019) 1, S. 33–41

Bild 1.

Bild 1: Kontroll- und Informationsflussschema des digitalen Zwillings (eigene Darstellung)

Bild 2: Gestaltungstreiber auf dem Weg zur Digitalen Fabrik (eigene Darstellung)

Bild 3: Virtuelle Logistik und Einordnung in die Anlaufphase der Produktion (eigene Darstellung)

Bild 4: Smart Factory Networks und ihre Analogie zu einzelnen Fabriken (nach Friedli [21])

Bild 5: Ansatzpunkte von Digitalisierungsstrukturen am Modell der PPS (nach Wiendahl [24])

Bild 6: Betrachtete Werkstattfertigung (eigene Darstellung)

Bild 7: Vergleich von Auslastung und Wartezeit verschiedener Dispositionsagenten im "Digitalen Zwillings" (eigene Darstellung)

Tabelle 1.