

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Vernetzter Digitaler Zwilling zur Einbeziehung der Materialflusssimulation während der Produktentwicklung

Connected Digital Twin for Incorporating Material Flow Simulation During Product Development

Annika Lange, Jan Torka, Jean-Paul Goppold, Thomas Knothe
Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin
(Germany)

{annika.lange, jan.torka, jean-paul.goppold, thomas.knothe}@ipk.fraunhofer.de

Abstract: Changeable production systems do not consider the development and design of a product comprehensively enough. Material flow simulations are useful for considering product changes from a production point of view when used to verify concepts in the planning phase and to check for weak points. While simultaneous engineering is made possible by creating a material flow simulation at an early stage of product development, the creation of simulations is very time consuming and the added value of a simulation is often not fully recognised. In this paper, a concept is presented that helps to reduce the effort of creating and adapting simulation models by relying on the properties of flexibility and easy reconfigurability of adaptive production systems.

1 Problembeschreibung und Bedarf

Schon immer sind produzierende Unternehmen vom Wandel betroffen (Neuburger, 2019). So beeinflussen Megatrends die Fabrikgestaltung mit deren Prozessen sowie die Produktentwicklung. Ein Megatrend, der die Fabrikgestaltung und Produktentwicklung adressiert, ist die steigende Komplexität von Produktion und Produkten aufgrund steigender Individualisierungsmöglichkeiten am Produkt (Westkämper, 2013; Kohl et al., 2021). Neben der steigenden Komplexität werden die Produktentwicklungszyklen kürzer und treten in einer höheren Frequenz auf (Lescher, 2008). Um auf solche Megatrends reagieren zu können, unterstützt das Konzept der wandlungsfähigen Produktionssysteme (Westkämper und Zahn, 2009; Kohl et al., 2021). Die Wandlungsfähigkeit ist gekennzeichnet durch einen geringen Aufwand für die zielgerichtete Neu- oder Rekonfiguration der Wandlungsobjekte. Dies sind die Objekte, an denen der Wandlungsprozesse durchgeführt wird und die für den

wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens wichtig sind (Hernandez Morales, 2002). Durch Wandlungsbefähiger wie beispielsweise Modularität oder Mobilität erfolgt der Wandlungsprozess (Hernandez Morales, 2002). Mit der Konstruktion und Entwicklung neuer Produkte beziehungsweise Änderungen an bestehenden Produkten verändert sich der Fertigungsprozess und somit auch das Produktionssystem. Forschungsprojekte wie z.B. iVIP (Krause et al., 2002) und ISYPROM (Beier et al., 2012) haben sich mit der Verknüpfung von Produktentwicklung und der einhergehenden Planung von Produktionssystemen auseinandergesetzt, dennoch bleibt die Einbeziehung unzureichend.

Im Product Lifecycle Management (PLM) wird zwar der gesamte Produktentstehungsprozess betrachtet von dem ersten Entwurf über die Konstruktion, die Produktion bis hin zu Dienstleistungen. Dennoch erfolgen die Phasen sequenziell, sodass die Produktionsplanung und dessen Prüfung der Machbarkeit erst nach Abschluss der Konstruktion erfolgen. Um Änderungen am Produkt auch aus fertigungstechnischen Aspekten zu betrachten, ist beispielsweise eine Materialflusssimulation erforderlich. Diese dient dazu, Konzepte in der Planungsphase hinsichtlich Schwachstellen und Machbarkeit zu untersuchen. Durch das frühe Erstellen einer Materialflusssimulation – bereits während der Produktentwicklung – entsteht ein Simultaneous Engineering. Durch die Materialflusssimulation können frühzeitig Auswirkungen durch die Neukonstruktion des Produktes analysiert werden. Ebenfalls ermöglichen diese die ganzheitliche Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungstechnik sowie Fabrikplanung. Zwar ist Simultaneous Engineering kein unbekanntes Konzept mehr, dennoch wird in diesem frühen Stadium bisher selten eine Materialflusssimulation erstellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Erstellung von Materialflusssimulationen mit einem großen Aufwand verbunden ist, sodass trotz der Vorteile einer Materialflusssimulation häufig der Mehrwert dieser nicht umfassend erkannt wird. Insbesondere die Erfassung von erforderlichen Daten ist mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden (Herbert et al., 2021). Kommt es während der Erstellung der Materialflusssimulation zu einer Anpassung im Konzept, ist dies ebenfalls mit einem erhöhten Aufwand in der Anpassung bei der Materialflusssimulation verbunden.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz aufgezeigt, wie mittels verschiedener vernetzter Digitaler Zwillinge (DZ) eine Materialflusssimulation bereits während der Produktentwicklung aufwandsarm erstellt werden kann. Ein DZ ist das virtuelle Abbild eines physischen Systems. Dieser hat eine automatisierte bidirektionale Datenverbindung zwischen dem virtuellen Abbild und dem physischen System, dass durch Interoperabilität gekennzeichnet ist (Rainer Stark et al., 2020; Kuehner et al., 2021). Ein DZ kann sich über mehrere Lebensphasen erstrecken und wird in einen Digitalen Master und Digitalen Schatten unterteilt. Der Digitale Master wird durch Daten in der Planungsphase gebildet, der Digitale Schatten durch Daten aus der Produktion, der Verwendung sowie dem End-of-Life (Riedelsheimer et al., 2021).

2 Stand der Technik

Morshedzadeh et al. (2018) beschreiben einen Ansatz zur eventdiskreten Simulation unter Einsatz von einem PLM System. Die Stückliste, die Prozessliste sowie die Ressourcenliste werden dafür in das PLM System überführt. Durch diese Struktur werden bereits für die Simulation notwendige Daten wie beispielsweise Ausfallzeiten

und Schichten in dem PLM System bereitgestellt. Diese Daten werden über einen Import in das Simulationstool Tecnomatix Plant Simulation überführt.

Fischer et al. (2017) betrachten die Erstellung von Simulationsmodellen für cybertronische Produktionssysteme. Dazu werden zunächst Produkt-, Maschinen und Transportagenten erstellt, die die erforderlichen Daten für die Simulation generieren. Diese Daten werden in Teamcenter integriert und über eine vordefinierte Schnittstelle an Tecnomatix Plant Simulation übergeben. Die Ergebnisse der Simulation werden in Form eines HTML Reports an Teamcenter zurückgegeben.

Pöge und Meyer (2021) betrachten die Integration von Daten aus einem Produktdatenmanagement (PDM) System in die Materialflusssimulation. Damit die Daten für die Simulation verfügbar sind, ist ein manuelles Datenmanagement erforderlich. Die Ergebnisse aus der Simulation sollen automatisch in das Datenmanagement aufgenommen werden. Dies bietet den Vorteil, dass alle Daten zentral verwaltet werden. Nach Abschluss der Simulation und dessen Ergebnisintegration in das PDM System, kann dort die Auswertung durchgeführt werden. Änderungen in der Planung werden auf Revisionsebene im PDM System verknüpft. Dies ermöglicht die Nachvollziehbarkeit, welche Daten in der Materialflusssimulation integriert wurden. Im letzten Schritt erfolgt die automatisierte Erzeugung von 3D-Modellen.

Die Ansätze zeigen auf, dass bereits Daten aus dem Produktlebenszyklus mit in die Erstellung von Materialflusssimulationen einbezogen werden. Dennoch bezieht keiner der vorliegenden Ansätze explizit die Produktentwicklung mit ein.

Bei der automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen kann nach Milde und Reinhart (2019) in drei Kategorien unterschieden werden. Diese können den folgenden Phasen der VDI 3633 (2014) zugeordnet werden:

- Modellentwicklung während der Systemanalyse,
- Parametrisierung des Modells während der Datenaufbereitung,
- Implementierung des formalen Modells.

Eine hohe Zahl der bestehenden Ansätze betrachtet jeweils nur eine der Kategorien (Milde und Reinhart, 2019). Häufig wird die automatisierte Parametrisierung des Modells fokussiert. Diese Ansätze verfolgen die Aufbereitung von Rohdaten, sodass diese in dem Simulationsmodell verwendet werden können (Skoogh et al., 2012; Barlas und Heavey, 2016).

Dennoch existieren Ansätze, die alle drei Kategorien betrachten. Mit Hilfe des Global Positioning Systems können während des Teiletransport Beschleunigungs- und Sensordaten erhoben werden. Auf dessen Basis wird der Materialfluss digital rekonstruiert. Daraufhin wird durch einen Modellkonfigurator das Materialflusssimulationsmodell automatisiert erzeugt. Einzelne manuelle Änderungen sind darüber hinaus notwendig (Smith, 2015). Auch der Ansatz nach Milde und Reinhart (2019) eliminiert zeitaufwendige Schritte. Dennoch bezieht keiner der Ansätze zur automatisierten Simulationsmodellerstellung die Produktentwicklung mit in die Erstellung des Materialflusssimulationsmodells mit ein.

Nachfolgend wird ein Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, bereits in der Produktentwicklung eine Materialflusssimulation zu erstellen. Durch den Einsatz und die Verknüpfung von verschiedenen DZ soll der Aufwand zur Generierung des Modells reduziert werden.

3 Konzept des vernetzten Digitalen Zwillings

Der digitale Produktzwilling wird durch die Konstruktionszeichnung abgebildet. Das kinematische Modell der Fertigungszelle bildet den digitalen Zwilling der Fertigung ab. Durch das integrierte Prozessmodell werden die Prozesse des Unternehmens im digitalen Prozesszwilling abgebildet. Schlussendlich bildet das Simulationsmodell aus Sicht der Materialflussplanung den Fabrikzwilling ab. In diesem Beitrag beschränkt sich der Fabrikzwilling auf eine einzelne Linie. Der Ansatz ist allerdings so aufgebaut, dass dies auch auf eine gesamte Fabrik skaliert werden kann. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Digitalen Zwillinge mit ihren zugehörigen physischen Systemen auf.

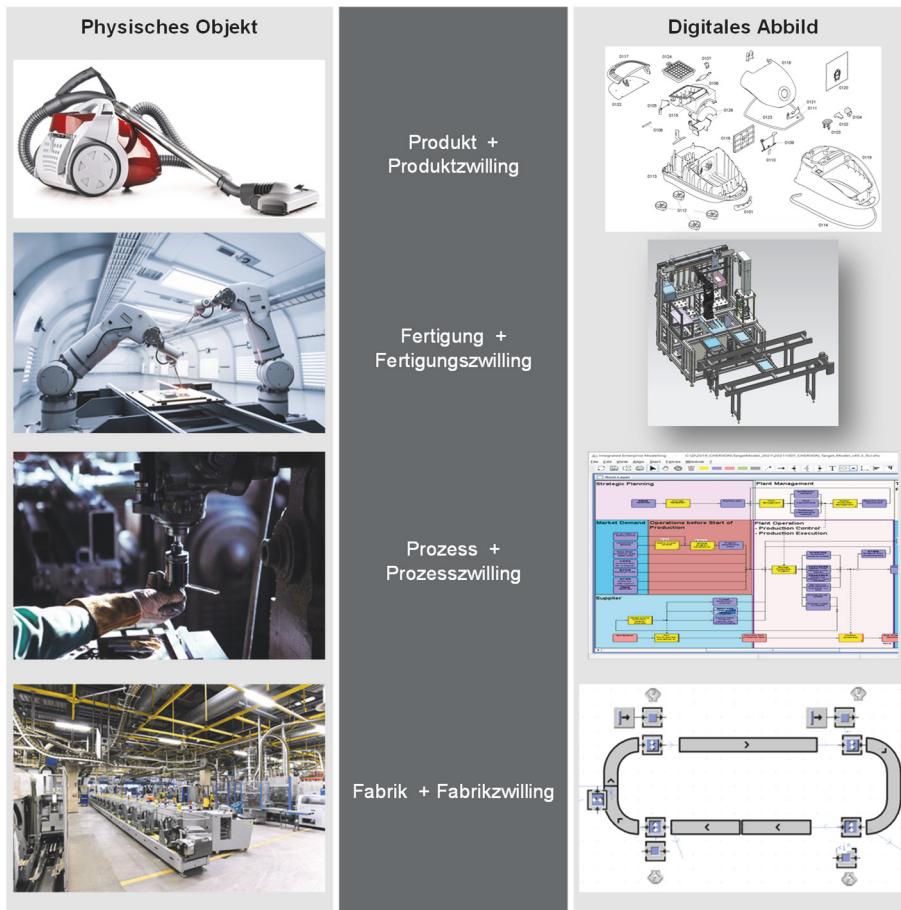


Abbildung 1: Zuordnung der physischen Objekte zu dessen digitalen Abbildungen

3.1 Beschreibung des Ansatzes

Der vernetzte Digitale Zwilling ist Bestandteil des Blue Print Plant Models (BPPM) und stellt eine Vernetzung der in Abbildung 1 dargestellten DZ dar. Das BPPM ist eine Erweiterung der technologieorientierten Fabrikplanung (Lange et al., 2023). Bei

dieser werden bereits zu Beginn der Planungen Technologien und Prozesse mitberücksichtigt (Glodde et al., 2020). Im Gegensatz zu der technologieorientierten Fabrikplanung sieht das BPPM vor, die Planung nicht von einem weißen Blatt zu starten (Lange et al., 2023). Der Ansatz beschränkt sich nicht nur auf die Fabrikplanung, ebenfalls kann es auch im operativen Geschäft angewendet werden. Wie auch bei der technologieorientierten Fabrikplanung bildet das BPPM ein Prozessmodell auf Basis der integrierten Unternehmensmodellierung (IUM) ab. Die IUM umfasst ein Prozessmodell, indem die Abläufe dargestellt werden sowie ein Informationsmodell, das Objekte inklusive dessen Ausprägungen in Form von Attributen darstellt (Spur et al., 1993). Zur Modellierung wird das am Fraunhofer IPK entwickelte Tool MO²GO verwendet (Fraunhofer IPK, 2018). Neben dem Prozessmodell ist ein vernetzter Digitaler Zwilling Bestandteil des BPPM (Lange et al., 2023), der nachfolgend erläutert wird. In Abbildung 2 wird der schematische Zusammenhang zwischen den einzelnen Elementen dargestellt.

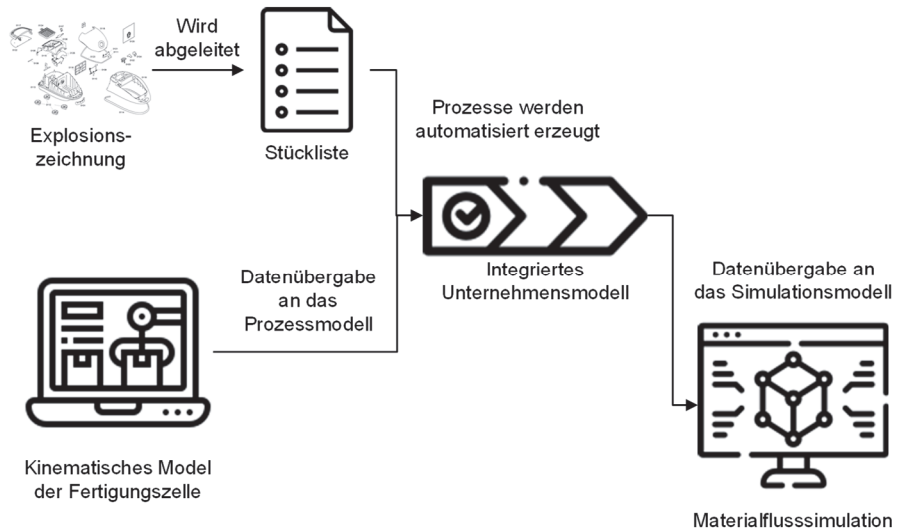


Abbildung 2: Schematischer Zusammenhang der einzelnen Komponenten

Vernetzung vom digitalen Produkt- und Prozesszwilling

Mithilfe des PLM wird begonnen, ein Entwurf eines neuen Produktes auszuarbeiten und im Anschluss aufbauend die Konstruktion zu erstellen. Ergebnis der beiden Phasen ist unter anderem eine Stückliste des Produktes. Mithilfe der Explosionszeichnung werden die notwendigen Prozessschritte identifiziert, um das Produkt zusammen zu fügen. Darüber hinaus lässt sich die Reihenfolge ermitteln, in welcher die Einzelteile zum Endprodukt zusammengefügt werden können. Im Anschluss wird unter Zuhilfenahme der Stückliste, ein Produktionsprozess erzeugt, wobei die Produkte im Modell die einzelnen Elemente der Stückliste und die anfangs ermittelten Prozessschritte – die Aktionen im Modell – repräsentieren. Die notwendige Zeit zur Erstellung des Modelles kann durch den Einsatz von einem

Modulbaukasten erheblich reduziert werden. Abschließend wird das erzeugte Modell in das bestehende Prozessmodell in dem Modellierungstool MO²GO integriert (Torka et al., 2021). Durch die Erzeugung eines Prozessmodells werden die vorherigen und nachfolgenden Prozessschritte für die Materialflusssimulation ersichtlich.

Vernetzung vom digitalen Fertigungs- und Prozesszwilling

Aus fertigungstechnischer Sicht wird ein kinematisches Modell erstellt, das die Fertigungszelle abbildet. Dies wird beispielsweise mit Solid Works oder Siemens NX erstellt. Durch das kinematische Modell wird sichergestellt, dass alle Prozessschritte in der Fertigungszelle ausgeführt werden können. Darüber hinaus werden aus dem kinematischen Modell Prozesszeiten ermittelt, die in der Materialflusssimulation verwendet werden. Die Prozesszeiten werden über einen Adapter an das Prozessmodell übermittelt und in Form eines Attributs bei dem jeweiligen Prozessschritt hinterlegt.

Vernetzung vom digitalen Fabrik- und Prozesszwilling

In dem Informationsmodell des Prozessmodells werden die für die Simulation benötigten Informationen verwaltet (siehe Abbildung 3). Durch das Attribut *Automatisierung* wird geprüft, ob ein Werker für den Bearbeitungsschritt erforderlich ist oder nicht. 0 steht dabei für nicht automatisiert und 1 für automatisiert. Die Attribute *Pos_X*, *Pos_Y* und *Pos_Z* beschreiben, wo sich die Fertigungszelle im Layout befindet. Die Prozess- und Rüstzeiten werden in dem Informationsmodell in Sekunden als Integer-Werte erfasst und bei der Verarbeitung in Siemens Tecnomatix Plant Simulation in das entsprechende Dateiformat überführt.

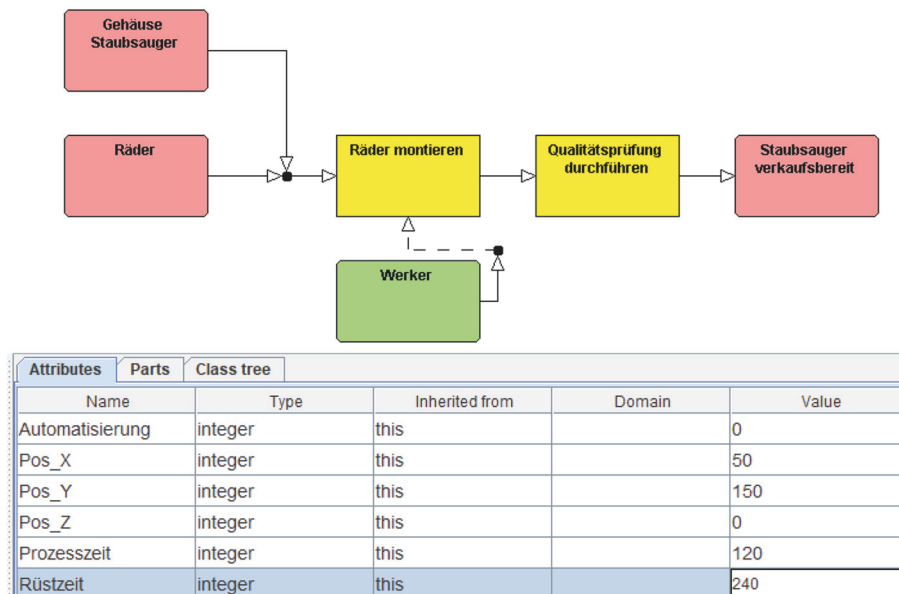


Abbildung 3: Exemplarische Sicht des Prozessmodells mit Ausschnitt des Informationsmodells für Prozessschritt 1

Die Materialflusssimulation wird mit Tecnomatix Plant Simulation dargestellt. Die Schnittstelle zwischen der Materialflusssimulation und dem Prozessmodell bildet ein Adapter. Dieser Adapter ist direkt mit dem Prozessmodell verbunden und stellt eine REST-API zur Verfügung. Die angefragten Daten werden ins JSON-Format transformiert und an Tecnomatix Plant Simulation übergeben. Durch einen Algorithmus in SimTalk werden die Daten in die entsprechenden Tabellen in das Simulationsmodell geschrieben. Die Stationen werden auf Basis eines Algorithmus in SimTalk automatisiert erzeugt und auf Basis der Informationen zur Position entsprechend in dem Simulationsmodell platziert.

Die bei der Simulation erzeugten Daten, wie beispielsweise Auslastung von Maschinen oder Mitarbeiter, aber auch Durchlaufzeiten werden über den Adapter zurück an das Prozessmodell (siehe Abbildung 3) gegeben und in diesem gespeichert. Neben den oben erwähnten Attributen können noch zusätzlich Attribute erzeugt werden, in welchen die Simulationsergebnisse gespeichert werden und somit weiteren Systemen zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Der Prozessassistent (PA) ist ein webbasiertes System, das bei der Analyse von Geschäftsprozessen unterstützt. Die Grundlage dafür bildet das in MO²GO erstellte Prozessmodell (Fraunhofer IPK).



Abbildung 4: Dashboard zur Darstellung der Ergebnisse aus der Materialflusssimulation

Die Ergebnisse aus der Materialflusssimulation werden wieder an das Prozessmodell übergeben und in einem Dashboard grafisch dargestellt (Abbildung 4).

3.2 Anwendungsbeispiel

Ein Unternehmen stellt Heimwerkzeuge in einer manuellen Montagelinie her. Es liegt zwar eine hohe Variantenanzahl der einzelnen Produkte vor, dennoch sind alle Varianten standardisiert und es kommt nicht zu kundenindividuellen Anpassungen. Das Ziel ist es, die Stärken im Bereich High-Mix-Low-Volume auszubauen. Dazu möchte das Unternehmen einerseits seinen Automatisierungsgrad erhöhen sowie die Rüstzeiten reduzieren. Dies soll durch die Entwicklung und den Aufbau einer Linie erreicht werden, die mit modularen Montagezellen ausgestattet ist. Diese Montagezelle muss zunächst konstruiert werden. Mittels des kinematischen Modells wird zunächst geprüft, ob die Produkte wie geplant in der Montagezelle montiert werden können. Auf Basis von Konstruktionszeichnungen des zu fertigenden Produkts wird über die Stückliste der Montageprozess automatisiert erzeugt. Durch

die Materialflusssimulation wird sichergestellt, dass die Reduzierung der Rüstzeit wie geplant realisiert wird. Zusätzlich wird geprüft, ob die Montagelinie immer noch die weiteren betriebswirtschaftlichen Aspekte wie z.B. die geplanten Durchlaufzeiten erzielt. Die Daten aus der Materialflusssimulation werden zurück an das Prozessmodell gegeben und in einem Dashboard dargestellt. Anhand dessen können Auswertungen und weitere Optimierungen vorgenommen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Simultaneous Engineering ist kein neues Konzept. Dennoch werden Materialflusssimulationen gerade in der frühen Produktentstehungsphase oft nur dann integriert, wenn bestehende Fertigungslösungen grundsätzlich verwendet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Erstellung und Änderungen von Materialflusssimulationen mit einem erhöhten zeitlichen Aufwand verbunden sind. In diesem Beitrag wird thematisiert, wie durch die Verknüpfung von verschiedenen DZ, Simulationsmodelle bereits während der Produktentwicklung (Entwurf und Konstruktion) mit einem geringen Aufwand erstellt werden können. Dazu werden ein Produkt-, Fertigungs-, Prozess- sowie Fabrikzwilling miteinander vernetzt. Der Prozesszwilling bildet das zentrale Element. Alle erforderlichen Daten werden in einem Informationsmodell des digitalen Prozesszwillings verwaltet, das Bestandteil eines Prozessmodells ist. Dies bietet den Vorteil, dass weitere Software an den vernetzten DZ angebunden werden können, ohne dass es zu Redundanzen hinsichtlich der Daten kommt.

Die separaten Schritte der initialen Absicherung der Produktion, die Produktion selbst und deren Optimierung können mit dem hier diskutierten Ansatz ganzheitlich betrachtet werden. Während der Absicherung der Produktion kann das Prozessmodell benutzt werden, um die Machbarkeit der Produktion zu validieren und in der Produktion kann die Modulare Shopfloor IT den Prozess automatisch modellbasiert steuern. Die anfallenden Daten während der Produktion können im Nachgang für die Optimierung der Produktion genutzt werden. Die automatisierte Verknüpfung und Steuerung von unterschiedlichen Simulationssystemen ist mithilfe des Prozessmodells und der Modularen Shopfloor IT vorstellbar.

Literatur

- Barlas, P.; Heavey, C.: KE tool: An open source software for automated input data in Discrete Event Simulation projects. In: Roeder, T.; Frazier, P.; Szechtman, R.; Zhou, E. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference (WSC). Arlington (USA), 11.-14. Dezember 2016, S. 472–483.
- Beier, G.; Dammerau, T.; Figge, A.; Stark, R.: ISYPROM - Prozess- und Systemgestaltung für die Innovationbeschleunigung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 6, S. 389–390.
- Fischer, J.; Willers, R.; Sinnwell, C.: Materialflusssimulation für die CTPS Entwicklung. In: Eigner, M.; Koch, W.; Muggeo, C. (Hrsg.): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 131–140.

Fraunhofer IPK: Prozessassistent.

- https://www.ipk.fraunhofer.de/content/dam/ipk/IPK_Hauptseite/dokumente/themenblaetter/um-themenblatt-prozessassistent-web.pdf, letzter Zugriff 26.07.2022.
- Fraunhofer IPK: MO²GO Unternehmensdesign, Analyse und Betrieb. https://www.ipk.fraunhofer.de/content/dam/ipk/IPK_Hauptseite/dokumente/themenblaetter/um-themenblatt-moogo-web.pdf, letzter Zugriff 19.02.2023.
- Glodde, I.; Scholz, H.; Knothe, T.; Kohl, H.: Technologieintegrierte Fabrikplanung für KMU. *Werkstattstechnik* 110 (2020) 4, S. 189–194.
- Herbert, M.; Selmaier, A.; Mühlmann, F.; Fürst, J.; Franke, J.: Application of discrete-event simulation for factory planning. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021: A case study*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 133–142.
- Hernandez Morales, R.: *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2002.
- Kohl, H.; Buß, D.; Gebauer, H.; Glawar, R.; Heller, T.; Klan, S.; Knothe, T.; Sai, B.; Schmidtke, N.; Stenzel, F.; Werner, M.; Wilms, M.: *White Paper »RESYST«: Resiliente Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ, erfolgreich, krisenfest*. München: Fraunhofer-Gesellschaft e. V. 2021.
- Krause, F.; Tang, T.; Ahle, U.: iViP: Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung. Abschlussbericht Juni 2002.
- Kuehner, K.J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. *Procedia CIRP* 104 (2021), S. 1227–1232.
- Lange, A.; Ihnen, D.; Knothe, T.: Blue Print Plant Model. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118 (2023) 3, S. 106–110.
- Lescher, M.: *Automatisierte Generierung von Arbeitsabläufen für den Service an Produktionssystemen*. Aachen: Shaker 2008.
- Milde, M.; Reinhart, G.: Automated Model Development and Parametrization of Material Flow Simulations. In: *Proceedings of 2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, National Harbor Maryland (USA), 08.-12. Dezember 2019, S. 2166–2177.
- Morshedzadeh, I.; Oscarsson, J.; Ng, A.; Aslam, T.; Frantzen, M.: Multi-level management of discrete event simulation models in a product lifecycle management framework. *Procedia Manufacturing* 25 (2018), S. 74–81.
- Neuburger, R.: Der Wandel der Arbeitswelt in einer Industrie 4.0. In: Obermaier, R. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2019, S. 589–608.
- Pöge, C.; Meyer, T.: Die Materialflusssimulation im Kontext eines Produktlebenszyklusmanagements. In: Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 247–256.
- Riedelsheimer, T.; Gogineni, S.; Stark, R.: Methodology to develop Digital Twins for energy efficient customizable IoT-Products. *Procedia CIRP* 98 (2021), S. 258–263.
- Skoogh, A.; Johansson, B.; Stahre, J.: Automated input data management: evaluation of a concept for reduced time consumption in discrete event simulation. *SIMULATION* 88 (2012) 11, S. 1279–1293.
- Smith, C.: *The Programmatic Generation of Discrete-Event Simulation Models from Production Tracking Data*. Provo: Brigham Young University 2015.

- Spur, G.; Mertins, K.; Jochem, R.: Integrierte Unternehmensmodellierung. Berlin, Wien u.a.: Beuth Verlag 1993.
- Stark, R.; Anderl, R.; Thoben, K.; Wartzack, S.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020), S. 47–50.
- Torka, J.; Lange, A.; Scholz, J.-A.; Knothe, T.; Buße, D.: Model-based process generation for supporting agile shop floor management in SMEs. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021), 2021, S. 546–556.
- VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen 2014.
- Westkämper, E.: Struktureller Wandel durch Megatrends. In: Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 7–10.
- Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009.