

Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen

Modelling and Simulation of Modular Production Systems

Niclas Feldkamp, Sören Bergmann, Steffen Straßburger, TU Ilmenau,
Ilmenau(Germany), niclas.feldkamp@tu-ilmenau.de, soeren.bergmann@tu-
ilmenau.de, steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

Abstract: Modular production systems aim to supersede the traditional line production in the automobile industry. The idea here is that highly customized products can move dynamically and autonomously through a system of flexible workstations without fixed production cycles. This approach has challenging demands regarding planning and organization of such systems. The use of modelling and simulation methods is therefore indispensable. This paper presents simulation approaches for modelling modular production systems and discusses a comparison between an agent-based and a process-oriented implementation of an example model.

1 Einleitung

Klassischerweise besteht in der industriellen Fertigung ein Spannungsfeld zwischen Produktivität und Flexibilität. Insbesondere die Flexibilität spielt eine immer größer werdende Rolle. Durch steigende Anforderungen an Qualität, Variantenvielfalt und Individualisierbarkeit der Produkte müssen Fertigungsunternehmen Lösungen finden, um Lieferzuverlässigkeit und stabile Lieferzeiten gewährleisten zu können (ElMaraghy et al., 2013). Insbesondere in der Automobilindustrie lässt sich hierzu in einigen Pilotprojekten die Vision der Abkehr von der klassischen Fließfertigung hin zu einer werkstattfertigungsorientierten Produktion beobachten. Diese Bestrebungen lassen sich unter dem Stichwort frei verkettete Montage bzw. modulare Fertigung zusammenfassen (Schmitt et al., 2017; Göppert et al., 2018). In der Praxis finden sich hier verschiedene Bezeichnungen, wie beispielsweise „modulare Montage“ (Audi AG, 2019), „Flexi-Line“ (Mayer, 2018) oder „Full-Flex-Werk“ (Daimler AG, 2018). Ziel dieser Bestrebungen ist, die Produktion nahezu beliebiger Fahrzeugtypen und -architekturen in einem Werk zu ermöglichen, sodass selbst bei Einführung eines neuen Produkts kein langwieriger Um- oder Neubau der Produktionsstätte notwendig ist und im besten Fall sogar während des Normalbetriebs eingesteuert werden kann. Erreicht werden soll dieses Ziel durch die Umsetzung einer größtenteils selbstorganisierenden Produktion im Sinne des Grundgedankens der Industrie 4.0. Über autonome Transportsysteme wird ein zu bearbeitendes Produkt von Station zu

Station transportiert, abhängig von dem auszuführenden Arbeitsschritt und der Verfügbarkeit einer Station. Für die Modellierung, Planung und Steuerung von Produktionssystemen, insbesondere in der Automobilindustrie, ist die Methode der diskret-ereignisgesteuerten Simulation (DES) ein etabliertes Werkzeug (Krückhans und Meier, 2013). Von den verschiedenen historisch entstandenen Weltsichten (d. h. Modellierungsansätzen) innerhalb der DES (Banks et al., 2005) ist die prozessorientierte Weltsicht (engl.: *process-interaction world view*), die auch zumeist auch in der branchenüblichen Commercial-of-the-Shelf-Software anzutreffen ist, weit verbreitet. Für die Modellierung eines modularen Fertigungssystems kommt diese Modellierungssichtweise jedoch an ihre Grenzen. Der Modellierungsaufwand für die Abbildung und Abstimmung der Prozesse einer Vielzahl von hochindividuellen, heterogenen Produkten im Simulationsmodell kann sehr groß werden. Sinnvoller scheint hier, aus Sichtweise des Produktes zu modellieren, das eigenständig und dynamisch seinen Weg durch das Produktionssystem findet. Somit stellt sich allerdings die Frage, ob die klassische, prozessorientierte Modellierungssichtweise noch die beste Wahl ist hinsichtlich Modellierungsaufwand sowie Verständlichkeit und Wiederverwendung der Modelle. Andere Weltsichten wie die agentenbasierte Modellierung oder auch hybride Modellierungsansätze sind in anderen Anwendungsdomänen bereits etabliert und sind auch für die Modellierung von modularen Fertigungssystemen eventuell besser geeignet. Aus simulationstechnischer Sicht besteht daher noch Forschungsbedarf für die Modellierung von modularen Fertigungssystemen. Aus diesem Grund soll dieser Beitrag geeignete Weltsichten für die Modellierung von modularen Fertigungssystemen aufzeigen und anhand eines Beispiels diskutieren. Der Aufbau des Beitrags ist hierbei wie folgt: Nach der Einleitung folgt ein Überblick über verschiedene Weltsichten und hybride Modellierungsansätze. Danach folgt eine Definition des Begriffs der modularen Fertigung sowie ein umfassender Forschungsüberblick über den Stand der Forschung bezüglich der Modellierung und Simulation solcher bzw. ähnlicher Systeme. Darauf aufbauend folgt ein konzeptionelles Kapitel, welches sich mit den spezifischen Eigenschaften modularer Fertigungssysteme auseinandersetzt. Ein solches System wird dann jeweils einmal klassisch prozessorientiert sowie agentenbasiert modelliert und implementiert. Anhand der Beispielimplementierungen werden dann beide Weltsichten verglichen, Ergebnisse evaluiert und allgemeine Handlungsempfehlungen für die Modellierung und Simulation von modularen Fertigungssystemen diskutiert. Ein Kapitel mit Fazit und Ausblick schließt den Beitrag ab.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Im Folgenden werden die Grundlagen zu den verschiedenen Weltsichten für die Modellierung von diskret-ereignisgesteuerten Simulationsmodellen dargelegt. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung zum Thema modulare Fertigung aufgezeigt.

2.1 Weltsichten der Simulationsmodellierung

Die Weltsichten, die bei der Modellierung eines Systems verwendet werden können, hängen i. A. von der zugrundeliegenden Simulationsmethode ab. Hierbei lassen sich allgemein drei Gruppen unterscheiden: Diskret-ereignisgesteuerte Simulation (DES),

kontinuierliche Simulation sowie Monte-Carlo-Simulation (Law, 2014). Darüber hinaus lassen sich Kombinationen der genannten Simulationsarten unter dem Stichwort hybride Simulation zusammenfassen (Mustafee und Powell, 2018). Für die Simulation des Energieverbrauchs in Fertigungssystemen werden beispielsweise diskret-ereignisgesteuert modellierte Fertigungssysteme mit einer kontinuierlichen System-Dynamics-Komponente kombiniert (Römer et al., 2018). Im weiteren Sinne schließt hybride Simulation auch die Kombination der Methode Simulation mit anderen Methoden, wie beispielsweise Operations-Research-Methoden oder maschinelles Lernen, ein. Diese können zur Laufzeit der Simulation eingesetzt werden (Bergmann et al., 2017) oder auch zur Unterstützung der Analyse von Simulationsdaten (Feldkamp et al., 2015). Im Fokus der Betrachtung in diesem Beitrag stehen die diskret-ereignisgesteuerte Simulation sowie die in ihr verfügbaren Weltansichten zur Modellierung von modularen Produktionssystemen. Im Gegensatz zur kontinuierlichen Simulation zeichnet sich DES durch Zustandsänderungen zu diskreten Zeitpunkten (Ereignissen) aus (Law, 2014). In einigen Publikationen sowie auch Simulationssoftware (z. B. Anylogic) findet sich eine Unterscheidung zwischen DES und agentenbasierter Simulation. Dies ist im Grunde aber keine korrekte disjunkte Unterscheidung. Vielmehr wird hier fälschlicherweise der Begriff DES als Synonym für die prozessorientierte Weltansicht innerhalb von DES verwendet. Die prozessorientierte und die agentenbasierte Weltansicht unterscheiden sich zwar stark in ihrer Sichtweise auf das zu modellierende System, dennoch unterliegen beide dem oben erläuterten DES-Paradigma. Eine der historisch ältesten Weltansichten der DES ist die ereignis-orientierte Weltansicht (engl. *event scheduling world view*, vgl. (Banks et al. 2005)). Events sind hierin definierte Ereignisse, an welchen zu diskreten Zeitpunkten Zustandsänderungen vorgenommen werden.

Darauf aufbauend hat sich die prozessorientierte Weltansicht etabliert. Ein Prozess beschreibt eine Folge von Operationen, die eine Entität während ihrer Lebensdauer durchlaufen muss. Diese Weltansicht wird daher häufig für die Modellierung und Simulation von Fertigungssystemen eingesetzt, da der Weg, den ein Fertigungsauftrag durch das System nimmt, sehr gut als Prozess modelliert werden kann. Hierbei konkurrieren mehrere Entitäten um verfügbare Ressourcen, wie beispielsweise Maschinen und Werker. Da der Prozess einer Entität eher exogen vorgegeben ist, ist das Verhalten einer solchen Entität während des Prozessdurchlaufs allerdings eher passiv (Fujimoto, 2013; Law, 2014). Im Gegensatz hierzu steht die agentenbasierte Simulation.

Bei der agentenbasierten Weltansicht hat eine Entität (Agent) ein bestimmtes individuelles Verhalten, sodass sie dynamisch mit ihrer Umwelt interagieren und Entscheidungen treffen kann. Das Systemverhalten bestimmt sich dann aus der Summe der Einzelentscheidungen der Agenten (Emergenz). Einsatzfelder für agentenbasierte Simulation sind häufig netzwerkbasierende Systeme, wie z. B. Verkehrssimulation oder die Simulation von sozialen Netzwerken (Lorig und Timm, 2014). Klassische Fließproduktionslinien lassen sich hiermit allerdings eher schlecht modellieren. Die prozessorientierte Weltansicht ist hierfür, wie zuvor bereits festgestellt, deutlich besser geeignet.

2.2 Modulare Fertigung

In diesem Beitrag wird der Begriff der modularen Fertigung synonym für eine Reihe von Begrifflichkeiten verwendet, die alle das gleiche Prinzip beschreiben. Im

Grundansatz geht es hierbei um die Flexibilisierung der Produktion in der Automobilfertigung. Dies bezieht sich hauptsächlich auf den Bereich der Endmontage. Hierbei wird das klassische Prinzip der Fließfertigung zugunsten einer eher werkstatorientierten Fertigung aufgelöst. Die eigentliche Fertigung wird auf Fertigungsinseln bzw. Stationen durchgeführt, die jeweils sehr flexibel verschiedene Aufgaben verrichten können. Diese sind abhängig von dem jeweils zu fertigenden Produkt, welches sich durch einen hohen Individualisierungsgrad auszeichnet. Die Fertigungsinseln sind nicht über ein starres Fördersystem miteinander verbunden. Der Transport der Werkstücke sowie auch der Transport von Material wird von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) übernommen (Bubeck et al., 2014; Basic, 2016; Poll, 2016). Flexibilität entsteht hierdurch auf drei Ebenen. Die auszuführenden Arbeitsschritte können aufgrund der Individualität der Produkte sehr unterschiedlich sein und sind nicht an einen allgemeinen Systemtakt gebunden. Als plakatives Beispiel sei hierbei der Einbau von Fensterdichtungen genannt, der bei einer Limousine offensichtlich doppelt so lange dauert wie bei einem zweitürigen Coupé (Audi AG, 2019). Weiter bieten die zur Verfügung stehenden Fertigungsstationen je nach Ausstattung und Einrichtung ein unterschiedliches Portfolio an Arbeitsschritten an, welche sie ausführen können. Zudem besteht durch die Aufhebung der Fließfertigung kein Zwang mehr, die durchzuführenden Aufgaben an einem Werkstück in einer fest vorgegebenen Reihenfolge anzuordnen. Die Reihenfolge der Abarbeitung bietet, sofern technische Restriktionen dies erlauben, weitere Freiheitsgrade. Durch die somit entstandene Flexibilität entsteht allerdings auch ein großer organisatorischer Aufwand. Die Grundidee hierbei ist, dass sich die Produkte dynamisch ihren Weg durch das Fertigungssystem suchen, immer in Abhängigkeit der noch anstehenden Arbeitsschritte und der Verfügbarkeit von Stationen. Durch die Gesamtmenge der Einzelentscheidungen entsteht somit ein selbstorganisierendes System. Dieses ist insofern gekennzeichnet durch einen hohen Organisations-, Kommunikations- und Abstimmungsaufwand der einzelnen Systemelemente untereinander. Hierbei wird eine Grundidee des Industrie 4.0-Konzeptes aufgegriffen, welches eine vollständige Vernetzung von Maschinen, Geräten, Sensoren und Menschen propagiert (Kagermann et al., 2013). Die Idee von Produktionsaufträgen, die eher dynamisch Entscheidungen über ihren weiteren Verlauf durch das System entscheiden, entspricht in seinen Grundzügen einem agentenbasierten System (Kurle et al., 2016) und ist in der Literatur auch unter dem Begriff des holonischen Produktionssystems bekannt (Dominici et al., 2010). In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Modellierung und Simulation von modularen Fertigungssystemen in der Automobilindustrie mit ihren zuvor beschriebenen Eigenschaften und Anforderungen.

2.3 Stand der Forschung der Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen

Aufgrund der eher praxisgetriebenen Entwicklung modularer Produktionssysteme in der Automobilindustrie ist dieses Thema in der Simulationsforschung kaum vertreten. Zwar sind die Simulationstechniken an sich, wie bereits dargestellt, wissenschaftlich sehr gut durchdrungen, es finden sich aber nur wenige Arbeiten mit einer kontextbasierten Auseinandersetzung mit dem Thema Simulationsmodellierung mit modularer Fertigung in der Automobilproduktion. Die relevantesten werden im Folgenden dargestellt. Göppert et al. propagieren den Begriff des frei verketteten

Montagesystems (Göppert et al., 2018). Dieses zeichnet sich insbesondere durch sog. Montageressourcen ähnlich einer Werkstattfertigung aus. Ein zu bearbeitender Auftrag kann dann entsprechend seiner Anforderungen auf einer individuellen Route von Montageressourcen abgearbeitet werden. Dieses Konzept ähnelt in Grundzügen der in diesem Beitrag aufgestellten Definition von modularer Fertigung. Die Autoren kommen des Weiteren zu dem Schluss, dass ein simulationsbasierter Vergleich mit klassischer Linienfertigung für derartige Systeme sowohl für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit als auch für die Ableitung von Gestaltungsrichtlinien unabdingbar sei. Als ersten Ausgangspunkt entwickelten sie ein Simulationsmodell, welches auf der klassischen prozessorientierten Weltsicht basiert. Hierbei wird zum Erstellungszeitpunkt eines Produktionsauftrags eine Route aus einer Liste möglicher Routen ausgewählt und zugewiesen. Der restliche Ablauf der Simulation ist dann prozessorientiert wie bei einer klassischen Fließfertigung. Ein der modularen Fertigung sehr ähnliches Konzept wird in (Greschke et al., 2014) als Matrixstruktur für flexible Produktionssysteme vorgestellt. Hierbei können Arbeitsstationen verschiedene Prozessschritte ausführen. Stationen, die denselben Prozessschritt ausführen können, werden dabei parallel angeordnet. Der Weg von Werkstücken über konkrete Stationen ist dabei nicht wie in einer Fließfertigung streng vorgegeben, sondern variiert je nach Auslastung und Verfügbarkeit von Stationen. Auch hier wird die Nutzung von Simulation als essentiell für die Planung solcher Systeme festgestellt. Aufbauend auf dieser Arbeit vergleichen Schönemann et al. ein matrix-strukturiertes Layout mit dem Layout einer klassischen Linienfertigung, in dem sie beide Varianten als Simulationsmodelle implementierten (Schönemann et al., 2015).

Das Testszenario enthält dabei zwei Produkttypen mit je 7 bzw. 8 unterschiedlichen Arbeitsschritten mit unterschiedlicher Bearbeitungszeit, welche je nach Szenario über eine Linie von 8 Stationen laufen oder selbstständig eine Route über 7 in einer Matrix angeordnete Stationen wählen. Hierbei wurde ein agentenbasierter Modellierungsansatz gewählt, um die eigenständige Entscheidungs- bzw. Routenfindung von Aufträgen abbilden zu können. Implementiert wurden die Szenarien jeweils in Anylogic. Büth et al. führten darauf aufbauend denselben Vergleich mit in Plant Simulation implementierten Modellen durch (Büth et al., 2017). Hierzu wurde eine zusätzliche Kontrolllogik implementiert, um den DES-Elementen von Plant Simulation ein agentenbasiertes Verhalten aufsetzen zu können. Dieser Ansatz erforderte einen sehr hohen Programmieraufwand. Allerdings sehen die Autoren darin einen ersten Ansatz zur Simulation von flexibleren Fertigungssystemen.

3 Fallstudie

Die folgende Fallstudie betrachtet ein Referenzszenario für ein modulares Fertigungssystem. Dieses wird sowohl in der prozessorientierten als auch in der agentenbasierten Sichtweise implementiert.

3.1 Modellierung von modularen Fertigungssystemen

Die automobilen Fließfertigung von individualisierten Produkten ist geprägt durch eine hohe Varianten- und Optionsvielfalt. Üblicherweise wird ein Produktkonfigurator bzw. ein dahinterliegendes Planungssystem genutzt, um unter Berücksichtigung technischer Restriktion ein individuelles Produkt zusammenzustellen und einen

Produktionsauftrag zu generieren. Die daraus erwachsenden durchzuführenden Arbeitsschritte sind ebenfalls in technischen Planungssystemen hinterlegt. Die letztendlich für den Simulator einzuspeisenden Produktionsaufträge können aus diesen Informationen extrahiert werden. Der Simulator benötigt eine Liste mit auszuführenden Arbeitsschritten je Produktionsauftrag, eine Tabelle mit benötigten Vorgängerarbeitsschritten für jeden Arbeitsschritt sowie eine Liste mit den ausführbaren Arbeitsschritten je Station. Aus dieser Liste kann dann für die dynamische Entscheidungsfindung zu jedem Zeitpunkt berechnet werden, welche Arbeitsschritte ausführbar sind und welche Stationen dafür in Frage kommen. Diese Informationen können entweder direkt über eine Schnittstelle aus vorhandenen Planungssystemen entnommen oder angepasst an den im Simulationsmodell vorgesehenen Detaillierungs- bzw. Abstraktionsgrad in einer angepassten Datenbank hinterlegt werden. Diesen Zusammenhang veranschaulicht Abbildung 1.

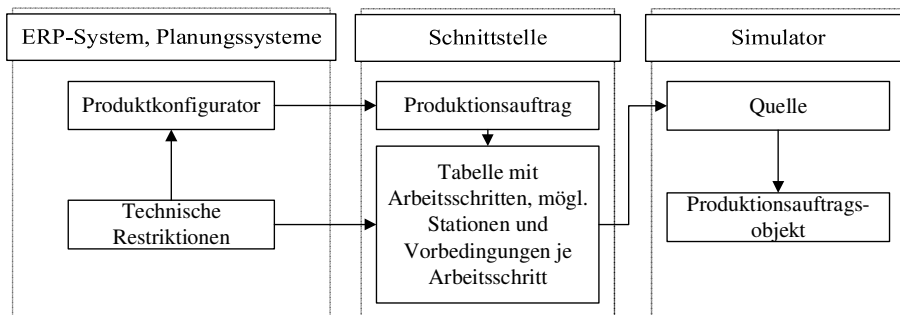


Abbildung 1: Erzeugung von Produktionsaufträgen im Simulator

Unabhängig von der verwendeten Simulationsweltsicht ist in jedem Fall die Entscheidungsfindung der fahrerlosen Transportsysteme von zentraler Bedeutung. Hierbei wird unterstellt, dass ein FTS über den gesamten Lebenszyklus eines Produktionsauftrags mit diesem gekoppelt ist und diese daher eine Einheit bilden. Erst nach Fertigstellung sämtlicher Produktionsschritte holt das FTS einen neuen Produktionsauftrag. Die dynamische Entscheidungsfindung während der Simulation betrifft vier hierarchisch angeordnete Ebenen, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

Auf der ersten Ebene muss, wie zuvor bereits beschrieben, ein aktuell durchzuführender Arbeitsschritt sowie die dafür anzufahrende Station ausgewählt werden. In Abhängigkeit vom modellierten Detaillierungsgrad des Simulationsmodells leiten sich daraus weitere Entscheidungsebenen ab. Dies beginnt bei Routing und Wegfindung über Kollisionserkennung und -vermeidung bis hin zur Simulation von Sensorik und Aktorik des FTS.

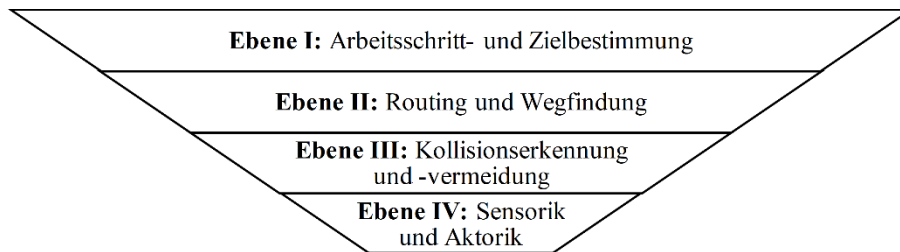


Abbildung 2: Hierarchie der Entscheidungsfindung

Dies kann aber auch abstrahiert oder durch vorgegebene Funktionen der Simulationssoftware übernommen werden. Wichtig ist hierbei, bei der Implementierung des Modells Schnittstellen bzw. verkapselte Funktionen für die benötigten Ebenen vorzusehen. So kann die Arbeitsschritt- und Zielbestimmung etwa durch eine einfache Heuristik abgebildet werden, denkbar ist aber auch eine komplexe, KI-basierte Steuerung. Eine flexible Austauschbarkeit des Entscheidungsmechanismus ist daher vorzusehen.

3.2 Implementierung eines Referenzszenarios

Für den durchzuführenden Vergleich zwischen prozess- und agentenbasierter Weltansicht wurde ein Referenzszenario entwickelt. Dies umfasst 9 Stationen, welche in einem 3x3-Feld in einer 50m x 35m großen Halle untergebracht sind. Die Anzahl der FTS lässt sich variabel einstellen. Ein Produktionsauftrag besteht aus maximal 20 Arbeitsschritten, wobei einige optional sind und wiederum andere verschiedene Varianten aufweisen, die sich durch ihre Bearbeitungszeit unterscheiden. Jede Station bietet ein individuelles Portfolio von 2 bis 4 durchführbaren Arbeitsschritten an. Hilfsmaterialflüsse wurden abstrahiert. Hier wird ein Warenkorbsystem unterstellt, welches zusätzliche Lieferströme überflüssig macht.

Das Referenzszenario wurde jeweils in einer prozessorientierten Weltansicht in Plant Simulation sowie agentenbasiert in Anylogic implementiert. Für die dynamische Entscheidungsfindung bezüglich Arbeitsschritt und Station wurde zunächst eine einfache Entscheidungsheuristik gewählt, die auf der Wahl der kürzesten Warteschlange basiert. Abbildung 3 zeigt Screenshots der zwei Implementierungen.

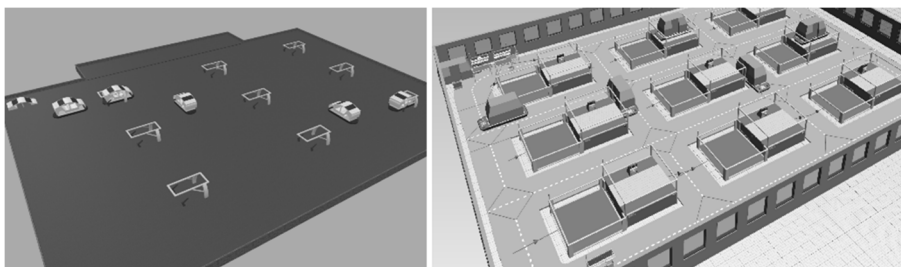


Abbildung 3: Screenshots der Implementierungen in Anylogic und Plant Simulation

3.3 Ergebnisse

Allgemein konnte das Modell in beiden Weltsichten und Simulatoren erfolgreich und lauffähig implementiert werden. Während in Anylogic Produktionsaufträge und FTS als Agenten mit Zustandsdiagrammen abgebildet wurden, musste der Lebenszyklus eines Produktionsauftrags in der prozessorientierten Weltsicht in Plant Simulation über ein Flowchart in das Layout der Stationen integriert werden. Beide Weltsichten bieten jeweils diverse Vor- und Nachteile, die im Folgenden diskutiert werden. Bezüglich des initialen Erstellungsaufwand konnte festgestellt werden, dass dieser in der prozessorientierten Weltsicht deutlich höher ausfällt. Dies liegt daran, dass das individuelle und dynamische Agieren von FTS grundsätzlich eher dem agentenbasierten Paradigma entspricht. Die prozessorientierte Sicht erfordert einen hohen zusätzlichen Implementierungsaufwand, da die prozessbasierte Verknüpfung von Stationen im Flowchart an vielen Stellen ausgehebelt und durch Sonderbedingungen abgefangen werden muss. Die Implementierung des Verhaltens über Zustandsdiagramme fällt insofern intuitiv leichter. Der Implementierungsaufwand durch zusätzliche Steuerungslogik steigt insbesondere dann an, je weiter die in Abbildung 2 gezeigte Entscheidungshierarchie konkret implementiert werden soll. Hier steigen der Bedarf und die Menge an Informationsaustausch zwischen den Systemelementen stark an. In der agentenbasierten Modellierung ist eine Infrastruktur zur Kommunikation und Verhandlung zwischen Entitäten schon im Vorhinein vorhanden und kann daher einfacher aufgesetzt und angepasst werden. Die Erweiterbarkeit nach der initialen Implementierung ist in der agentenbasierten Weltsicht ebenfalls leichter handhabbar, da Agenten sehr autark sind und nur über definierte Schnittstellen mit ihrer Umwelt agieren. In der prozessorientierten Weltsicht hingegen ziehen Änderungen an übergeordneten Prozessen auch immer weitere Überarbeitungen untergeordneter Subprozesse nach sich. Die Vorteile der prozessorientierten Weltsicht liegen in dem deutlich einfacheren Debugging und damit einhergehender besserer Wartbarkeit. Dies hängt damit zusammen, dass die Prozesse in dieser Weltsicht zwar komplex, aber dennoch übersichtlich und in Gänze erfasst werden können. In der agentenbasierten Modellierung finden sich Emergenzeffekte bezüglich Blockaden und Rückstaus an Stationen. Diese entstehen aus der Summe des individuellen Verhaltens vieler Agenten. Treten nun Fehler oder unerwünschte Effekte auf, sind die Ursachen deutlich schwerer nachzuvollziehen und zu beheben. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die meisten in der Praxis genutzten Softwaretools die prozessorientierte Weltsicht anbieten und daher Produktionssysteme üblicherweise auch in dieser modelliert werden. Durch die weite Verbreitung der prozessorientierten Weltsicht ist hier unter Simulationsanwendern also auch die Erfahrung im Umgang mit dieser deutlich ausgeprägter. Zusammenfassend ist aus theoretischer Sicht eine Implementierung von modularer Fertigung in der agentenbasierten Weltsicht zu empfehlen. Eine prozessorientierte Implementierung ist aber durchaus möglich. Sofern prozessorientierte Softwaretools bereits genutzt werden, muss von einer Nutzung dieser nicht grundsätzlich abgeraten werden.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, wie modulare Fertigungssysteme modelliert und simuliert werden können. Hierfür wurde die prozessorientierte Weltsicht mit der

agentenbasierten Weltsicht verglichen. Die Modellierung und Simulation von modularer Fertigung in der Automobilproduktion ist ein stark praxisgetriebenes Thema, welches theoretisch noch nicht stark durchdrungen ist. Dieser Beitrag legt ein erstes theoretisches Grundgerüst dafür. Darüber hinaus existiert noch eine Reihe offener Forschungsfragen. Ein quantitativer Vergleich beider Ansätze wäre denkbar, wenn hierfür objektivierbare Bedingungen geschaffen werden. Weiter bietet die Kopplung der Simulation mit KI-basierten Methoden wie Reinforcement Learning Potenzial zur Verbesserung der Entscheidungsfindung der autonom agierenden Komponenten. Eine solche über das Simulationsmodell trainierte Steuerungslogik kann dann wiederum im Realsystem produktiv genutzt werden. Für die Planung und Steuerung solcher Systeme ist ein Simulationsmodell unabdingbar. Generell ist aber auch die enge Verzahnung zwischen Echtsystem, Simulationsmodell und anderen Planungssystemen notwendig, um den Lebenszyklus von Produkten transparent und durchgängig planen und abbilden zu können. Forschungsbestrebungen hierzu lassen sich unter dem Stichwort Digitaler Zwilling zusammenfassen (Strassburger, 2019). Mit dem Übergang von klassischer Fließproduktion zur flexiblen modularen Montage ändert sich auch die grundsätzliche Sichtweise auf Simulationsstudien. Im Fokus der Leistungsbewertung und Optimierung solcher Systeme kann nicht mehr primär nur Durchsatz und Auslastung stehen. Aspekte wie beispielsweise Individualisierbarkeit der Produktionsaufträge, Stations- und Aufgabenzuordnung oder die Optimierung der Entscheidungsfindung sind ebenfalls sehr relevante Themen, welche die Gesamtperformanz des Systems definieren. Die Komplexität solcher Fragestellung erfordert neue Herangehensweisen an die Durchführung und Analyse von Simulationsexperimenten. Einen Ansatz hierfür liefern beispielsweise Data-Farming-Studien (Feldkamp et al., 2015).

Literaturverzeichnis

- Audi AG, 2019: Die Modulare Montage - Fertigungsinseln statt Fließband. Online verfügbar unter <https://www.audi-illustrated.com/de/smart-factory/Die-Modulare-Montage>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Banks, J.; Carson, J.; Nelson, B.L.: Discrete-Event System Simulation. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall 2005.
- Basic, R., 2016: Modulare Montage bei Audi. Hg. v. Audi AG. Online verfügbar unter <https://blog.audi.de/modulare-montage-bei-audi/>, zuletzt aktualisiert am 23.11.2016, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Bergmann, S.; Feldkamp, N.; Strassburger, S.: Emulation of control strategies through machine learning in manufacturing simulations. *JOS (Journal of Simulation)* 11 (2017) 1, S. 38–50.
- Bubeck, A.; Gruhler, M.; Reiser, U.; Weißhardt, F.: Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, S. 221–233.
- Büth, L.; Broderius, N.; Herrmann, C.; Thiede, S.: Introducing agent-based simulation of manufacturing systems to industrial discrete-event simulation tools. In: 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24.-26.07, 2017, S. 1141–1146.

- Daimler AG, 2018: Grundsteinlegung für erstes Full-Flex Werk. Hg. v. Daimler AG. Online verfügbar unter <https://www.daimler.com/innovation/case/connectivity/full-flex-werk.html>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Dominici, G.; Argoneto, P.; Renna, P.; Cuccia, L.: The Holonic Production System. *iBusiness 2* (2010) 3, S. 201–209.
- ElMaraghy, H.; Schuh, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A.: Product variety management. *CIRP Annals 62* (2013) 2, S. 629–652.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Strassburger, S.: Knowledge Discovery in Manufacturing Simulations. In: Taylor, S.J.; Mustafee, N.; Son, Y.-J. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, 2015, S. 3–12.
- Fujimoto, R.M., 2013: Process Oriented Simulation. Hg. v. ACM SIGSIM (Modeling & Simulation Knowledge Repository). Online verfügbar unter <https://www.acm-sigsim-mskr.org/Courseware/Fujimoto/Slides/FujimotoSlides-04-ProcessOrientedSimulation.pdf>, zuletzt geprüft am 24.04.2019.
- Göppert, A.; Hüttemann, G.; Jung, S.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Frei verkettete Montagesysteme. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113* (2018) 3, S. 151–155.
- Greschke, P.; Schönemann, M.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems. *Procedia 5CIRP6 17* (2014), S. 160–165.
- Kagermann, H.; Helbig, J.; Hellinger, A.; Wahlster, W.: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry ; final report of the Industrie 4.0 working group. Berlin, Frankfurt/Main: Forschungsunion; Geschäftsstelle der Plattform Industrie 4.0, 2013.
- Krückhans, B.; Meier, H.: Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Proceeding der 15. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2013*, Paderborn, 09. - 11. 10 2013, 2013, S. 31–40.
- Kurle, D.; Blume, S.; Zurawski, T.; Thiede, S.: Simulative Assessment of Agent Based Production Planning and Control Strategies. *Procedia CIRP 57* (2016), S. 439–444.
- Law, A.M.: *Simulation Modeling and Analysis*. New York, N.Y.: McGraw Hill Book Co 2014.
- Lorig, F.; Timm, I.J.: How to Model the "Human Factor" for Agent-based Simulation in Social Media Analysis? In: *Proceedings of the 2014 Symposium on Agent Directed Simulation: Work in Progress Paper*, Tampa, Florida, 13-16.04., 2014.
- Mayer, B., 2018: Ich bin ein Fan von Effizienz. Hg. v. *Automobil-produktion.de*. Online verfügbar unter <https://www.automobil-produktion.de/interviews-734/porsche-produktionsvorstand-reimold-wir-ziehen-alle-register-126.html?page=4>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Mustafee, N.; Powell, J.H.: From Hybrid Simulation to Hybrid Systems Modelling. In: Rabe, M.; Juan, A.A; Mustafee, N.; Skoogh, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, Gothenburg, Sweden, 9.-12.12, 2018, S. 1430–1439.

- Poll, D., 2016: Das Ende des Fließbands. Hg. v. Produktion Online. Online verfügbar unter <https://www.produktion.de/trends-innovationen/das-ende-des-fließbands-306.html>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2018, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Römer, A.C.; Rückbrod, M.; Straßburger, S.: Eignung kombinierter Simulation zur Darstellung energetischer Aspekte in der Produktionssimulation. In: Deatcu, C.; Schramm, T.; Zobel, K. (Hrsg.): Tagungsband ASIM 2018 – 24. Symposium Simulationstechnik, Hamburg, 4.-5. Oktober, 2018, S. 73–80.
- Schmitt, R.; Göppert, A.; Hüttemann, G.; Lettmann, P.; Rook-Weiler, K.; Schönstein, D.; Schreiber, A.; Serbest, E.; Steffens, M.; Tomys-Brummerloh, A.: Frei verkettete wandlungsfähige Montage. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. Heinrich (Hrsg.): AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 18.-19.05., 2017, S. 339–368.
- Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P.; Thiede, S.: Simulation of matrix-structured manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015) 1, S. 104–112.
- Strassburger, S.: On the Role of Simulation and Simulation Standards in Industry 4.0. In: Simulation Interoperability Standards Organization (Hrsg.): 2019 Simulation Innovation Workshop (SIW), Orlando, FL, USA, 11.-15.2., 2019.