

Automatisierte Simulationsmodellerstellung

Intuitive Analyse komplexer Materialflüsse

G. Schuh, S. Schmitz, J. Maetschke, T. Janke, H. Eisbein

Produktionen mit komplexen Materialströmen lassen sich ohne Materialflusssimulation – im Folgenden Simulation genannt – nicht im Detail analysieren oder verbessern. Der für Simulationen typischerweise hohe zeitliche Aufwand hindert Unternehmen am profitablen Einsatz. Das Tool „Miori Production Control“ unterstützt die Analyse komplexer Produktionszusammenhänge durch den Vergleich von unterschiedlichen, simulierten Zielszenarien. Die automatische Modellgenerierung und Fehlererkennung sowie KI-basierte Entscheidungsunterstützung erlauben einen niedrighschweligen Einstieg.

STICHWÖRTER

Materialflusssimulation, Künstliche Intelligenz, Werkstattfertigung

1 Einleitung

Das gegenwärtige Umfeld produzierender Unternehmen ist geprägt durch eine kundenseitig steigende Nachfrage nach individuellen Produktausführungen. Zur Produktion einer zunehmenden Anzahl unterschiedlicher Produktvarianten sind flexible Produktionsstrukturen notwendig [1]. Damit wächst die Bedeutung von flexiblen Fertigungen, wie zum Beispiel der Werkstattfertigung. In dieser werden Produkte auf individuellen Routen bis zur Fertigstellung durch die Produktion gesteuert [2]. Einzelne Arbeitsstationen sind in der Werkstattfertigung nicht wie bei der Fließfertigung anhand der Wertströme, sondern nach ihrer Funktion in Werkstätten angeordnet. Die individuellen und unterschiedlichen Produktionsabläufe der einzelnen Produktvarianten führen zu einer hohen Vielfalt verschiedener Routen durch die Produktion. Diese hohe Anzahl inhomogener Materialflüsse führt auf der Steuerungsebene zu hoher Komplexität, damit weiterhin alle Produkte in der korrekten Bearbeitungsreihenfolge produziert und termintreu fertiggestellt werden. Der Aufwand für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) steigt und kann aufgrund der vielen individuellen Aufträge nicht mehr manuell bewältigt werden kann. [3]

Prozesse in Werkstattfertigungen unterliegen stochastischen Effekten und sind in diskreten Zuständen zu beschreiben. Der Einsatz von ereignisdiskreter Simulation zur Analyse und Entscheidungsunterstützung innerhalb der PPS ist daher oft unumgänglich [4]. In Materialflusssimulationen können die Zusammenhänge der Produktionsfaktoren sichtbar gemacht und Verän-

Intuitive analysis of complex material flows through automated simulation model generation

Production with complex material flows cannot be analyzed or improved in detail without material flow simulation – hereafter referred to as simulation. The typically high effort required for simulations prevents companies from using them profitably. The MIORI Production Control tool supports the analysis of complex production correlations by comparing different, simulated target scenarios. Automatic model generation and error detection as well as AI-based decision support enable a low-entry barrier.

derungen an einem Modell getestet werden, bevor diese in der Produktion zum Einsatz kommen. Trotz der zahlreichen Vorteile ist der Einsatz von Simulation klassischerweise mit hohem Aufwand und Expertenwissen verbunden, sodass Unternehmen bei der praktischen Anwendung, der Interpretation der Ergebnisse und der Ableitung von Maßnahmen häufig Unterstützung benötigen [5, 6].

Daraus resultiert der praktische Bedarf, den Einsatz von Simulation im Bereich komplexer Materialflüsse zu erleichtern und insbesondere einen niedrighschweligen Einstieg zu bieten. Im Forschungsprojekt des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen University „Wertstromorientierte Produktionssteuerung“ (WoPS) wurde eine web-basierte Anwendung zur Unterstützung der operativen Steuerung und Überwachung vorgestellt [7]. Aufbauend auf diesem Tool erfolgte die Entwicklung von Miori Production Control (MPC), das die bestehenden Funktionen an wichtigen Stellen erweitert und Anwendende durch eine intuitivere Nutzeroberfläche unterstützt. Die Erweiterungen umfassen insbesondere die Unterstützung der Anwendenden durch eine automatisierte Simulationsmodellerstellung, eine automatische Unterstützung bei der Datenaufbereitung sowie eine anschauliche Ergebnisdarstellung mit der Möglichkeit zum direkten Szenariovergleich.

Dieser Beitrag stellt im Folgenden die Funktionsweise von MPC vor und ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 werden zunächst die Grundlagen der diskreten Ereignissimulation erörtert und das Potenzial des Einsatzes Künstlicher Intelligenz (KI) beschrieben. In Abschnitt 3 folgt die Vorstellung der Funktionali-

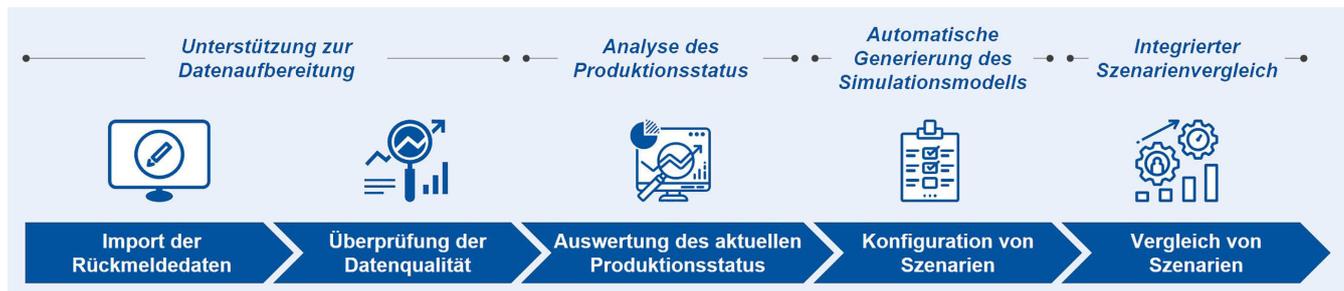


Bild 1. Schritte zur Nutzung von Miori Production Control (MPC). Grafik: WZL / RWTH Aachen

täten von MPC. Anschließend wird in Kapitel 4 ein Einblick in die geplante Weiterentwicklung des Tools gewährt. Zuletzt werden in Abschnitt 5 die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die Validierung des Tools gegeben.

2 Herausforderungen des Einsatzes von Materialflusssimulation in der industriellen Praxis

Bei der Analyse von Produktionssystemen werden diskrete Ereignissimulationen (DES), die in der Lage sind, komplexe und zustandsabhängige Zusammenhänge abzubilden, als quantitatives Mittel zur Unterstützung der Entscheidungsfindung eingesetzt [8,9]. Mithilfe von Simulationsmodellen können Veränderungen getestet werden, bevor diese in der Produktion zum Einsatz kommen. Die Möglichkeit, „Was-wäre-wenn“-Fragestellungen in einer risikolosen Umgebung zu testen, helfen den Unternehmen dabei, die Zusammenhänge in ihrer Produktion zu verstehen und Schwachstellen sowie Potenzialbereiche zu identifizieren [8]. Da die virtuellen Versuche preisgünstiger als reale Experimente sind, lassen sich zudem Kosten einsparen. Da immer leistungsstärkere Simulationsrechner schnelle und präzise Ergebnisse erzeugen, können Simulation zunehmend auch bei kurzfristigen Entscheidungen genutzt werden. [10]

Die genannten Leistungsversprechen und Vorteile können in der industriellen Praxis gegenwärtig jedoch nicht immer eingelöst werden. Ursächlich dafür ist zum einen der hohe initiale Aufwand zur Erstellung von Simulationsstudien [11]: Die Aufbereitung der Daten und die Erstellung des Simulationsmodells nehmen circa die Hälfte der benötigten Zeit für ein Simulationsprojekt in Anspruch. Insbesondere die manuelle Erstellung des Simulationsmodells stellt Unternehmen gegenwärtig vor Probleme. Da die modellierten Produktionen oft aus einer Vielzahl von Maschinen, Aufträgen und Materialflüssen bestehen, ist die Erstellung selbst mit vorhandener Simulationsexpertise zeitaufwendig. [11] Ein Aufbau des Modells ohne ausreichendes Expertenwissen ist meistens nicht möglich. Die Einstiegsbarriere überwiegt in der Einschätzung der Unternehmen oftmals die Vorteile und den Nutzen von Simulationsstudien, sodass auf deren Einsatz schließlich verzichtet wird. [6]

Zum anderen fehlt es in Unternehmen an der Akzeptanz von Simulationsprojekten [12]: Umfangreiche mathematische Berechnungen während der Simulation erschweren die Nachvollziehbarkeit von Lösungswegen und stärken den Eindruck eines „Black-Box“-Charakters der Simulationsmodelle [13,14] Entscheidenden fehlt somit das Vertrauen in die erzeugten Ergebnisse. Einer

ausführlichen Visualisierung der Simulationsergebnisse wird daher eine Schlüsselfunktion zur Schaffung von mehr Akzeptanz zugeschrieben [15].

Obwohl die Simulation selbst keine Optimierungstechnik ist, kann sie mit ergänzender Optimierung kombiniert werden, um reale Systeme effektiv zu verbessern. [16] In den vergangenen Jahren hat die Kombination von Simulation und KI als effiziente Möglichkeit zur Lösung von Planungs- und Steuerungsprobleme in der PPS an Bedeutung gewonnen. KI-Algorithmen können große Datenmengen effizient verarbeiten und sind in der Lage, Zusammenhänge zu erkennen sowie Strategien abzuleiten, die dem Menschen verborgen bleiben. [17]

In Kombination mit einer datengestützten Produktion und Simulation, zum Beispiel in Form eines Digitalen Schattens, lässt sich eine Entscheidungsunterstützung in der PPS schaffen. Besonders Reinforcement Learning (RL) Algorithmen als Subkategorie der KI bieten dabei großes Potenzial, da diese lernen auf die Dynamik der Umgebung zu reagieren, ohne vorheriges Wissen über die Systemdynamik zu benötigen. [17]

3 Miori Production Control als Tool zur benutzerfreundlichen Durchführung von Materialflusssimulationen

Die Anwendung des Tools MPC lässt sich in fünf Schritte gliedern, die in den folgenden Kapiteln anhand der Vorteile für Unternehmen erläutert werden (siehe Bild 1).

Im ersten Schritt, dem Import von Produktionsdaten bietet MPC eine automatisierte Erkennung klassischer Fehlertypen an und unterstützt den Anwendenden bei der systematischen Bereinigung. Bei der im nächsten Schritt anschließenden Analyse werden auf Basis der importierten Rückmeldedaten die notwendigen logistischen Zielgrößen der Produktion und weitere Kennzahlen wie z.B. Schwankungen in der Maschinenbelegung anhand von zeitlichen Verläufen und Durchschnittswerten ausgewertet. Auf Basis dieses Produktionsstatus (Status Quo) erkannte Schwachstellen der PPS können anschließend durch Konfiguration neuer Szenarien untersucht werden. Dabei unterstützt MPC den Anwendenden, indem auf Grundlage der importierten Rückmeldedaten automatisch ein Simulationsmodell erstellt wird das die Konfiguration neuer Szenarien mit geänderten Parametern erlaubt. Im abschließenden Szenariovergleich bietet MPC die Möglichkeit verschiedene Szenarien anhand der implementierten Kennzahlen zu vergleichen und so Potenziale in der Produktion simulationsbasiert zu validieren.

3.1 Unterstützung zur Datenaufbereitung

Rückmeldedaten aus ERP-Systemen, die als Datengrundlage in MPC genutzt werden, müssen zur detaillierten Auswertung in den meisten Fällen aufbereitet und vorhandene Fehler bereinigt werden, bevor diese weiterverarbeitet werden können. Dieser in der Regel sehr aufwendige und manuelle Prozess wird sowohl durch einen strukturierten Upload der notwendigen Datenpakete als auch die anschließende Überprüfung der Datenqualität unterstützt. Die Daten werden anhand einer Zusammenstellung verschiedener csv-Dateien einzeln oder als Paket hochgeladen. Diese umfassen Daten über die Aufträge und eingesetzten Maschinen. Zu den Auftragsdaten zählen der Arbeitsplan, die Liste der Fertigungsaufträge und die Auftragskategorien. Die Maschinendaten umfassen die Maschinenbeschreibung, den Maschinenkalender und die Maschinekategorien.

Da die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse unmittelbar von der Datenqualität abhängen, unterstützt MPC nach dem Upload der Daten bei der strukturierten Suche und Korrektur von Fehlern. Die hochgeladenen Daten werden dabei sowohl auf Syntax- als auch auf Logik-Fehler geprüft. Die Syntax-Fehler umfassen dabei einfache Fehler in Zahlenformaten, Benennungen oder fehlender Werte. Demgegenüber werden mit der Überprüfung auf Logik-Fehler auch fehlerhafte Zusammenhänge innerhalb der Rückmeldedaten aufgedeckt, zum Beispiel inkonsistente Zeitangaben, fehlende Maschinen oder nicht festgelegte Produktkategorien. Bei der Prüfung der Datenqualität priorisiert MPC die gefundenen Fehler nach Art und Komplexität. Auf Syntax-Fehler wird direkt hingewiesen und viele können bereits toolseitig behoben werden. Um die Logik-Fehler zu beheben, werden diese in den Daten markiert und ein Vorschlag zur manuellen Korrektur angeboten. Bei dieser müssen Anwendende manuell bewerten, ob die markierten Fehler bei der Modellgenerierung zu Problemen führen können und wie diese zu beheben sind. Sobald alle notwendigen Informationen vorhanden sind und aus Sicht der Anwendenden keine funktionskritischen Fehler mehr bestehen, wird der Datensatz freigegeben.

Für Unternehmen reduziert sich durch diese Funktion der initiale Aufwand zur Datenaufbereitung erheblich, weil die gerade in großen Datenmengen zeitintensive Suche nach Fehlern systematisch unterstützt wird. Die integrierte Fehlerpriorisierung und -korrektur reduziert dabei außerdem den Bedarf nach Expertenwissen aus dem Bereich der PPS. Die unterstützte Datenaufbereitung ermöglicht durch die standardisierte Aufbereitung gleichermaßen die nach der Analyse automatisch ausgeführte Materialflusssimulation.

3.2 Analyse des Produktionsstatus

Nach der erfolgreichen Bereinigung von Datenfehlern wird in der Analyse des Produktionsstatus der Status Quo der Produktion auf Basis der aktuellen Rückmeldedaten veranschaulicht. Anhand der wichtigsten Kennzahlen zur Bewertung der PPS wird der Produktionsstatus abgebildet. Die Kennzahlen unterteilen sich dabei hinsichtlich des Bewertungsschwerpunkts in die beiden Kategorien „Aufträge“ und „Arbeitsplätze“ (**Bild 2**).

Die Darstellung zeitlicher Verläufe der Kennzahlen sowie von Durchschnittswerten ermöglicht es Unternehmen, Schwachstellen in der PPS zu identifizieren und Verbesserungspotenziale zu erkennen. Durch die Auswahl der ausgewerteten Kennzahlen und

Aufträge <small>(Visualisierung logistischer Zielgrößen zur Quantifizierung von PPS-Zielen)</small>	Arbeitsplatz <small>(Visualisierungen zur Bewertung der Auslastung der Maschinen)</small>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestand ▪ Durchlaufzeit ▪ Termintreue ▪ Verzögerung ▪ Start-Endpunkt-Analyse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maschinen-Schwankung ▪ Auslastung ▪ Aufteilung-Auslastung ▪ Gantt-Chart

Bild 2. Betrachtete Kennzahlen zur Auswertung von Produktionsszenarien. Grafik: WZL / RWTH Aachen

integrierten Filterungsmöglichkeiten nach Maschinen, Produktionsbereichen, Produkten und zeitlichen Abschnitten wird dieser Prozess detailliert unterstützt.

3.3 Automatische Simulationsmodellgenerierung

Mit der automatischen Simulationsmodellgenerierung durch MPC entfällt die manuelle Erstellung von Simulationsmodellen. Die bereits erfolgte systematische Datenaufbereitung stellt die Grundlage hierfür dar. Als Simulationssoftware wird Plant Simulation genutzt, eine leistungsfähige Software zur Durchführung von Materialflusssimulationen. Zwischen dem Simulationsserver mit Plant Simulation und dem web-basierten MPC-Tool wird mittels Java und SQL-Skripten eine Schnittstelle geschaffen. Diese konvertiert die hochgeladenen und aufbereiteten Daten in für Plant Simulation lesbare Inputdateien. Die Dateien definieren die Produktionsstruktur und Zusammenhänge für den Aufbau des Modells. Aus vordefinierten Software-Bausteinen wird daraus entlang des automatisierten Plant Simulation Skripts sukzessive das individuelle Simulationsmodell erstellt.

Die ansonsten für Materialflusssimulationen übliche manuelle Erstellung von Simulationsmodellen, die meist mit einem hohen zeitlichen Aufwand und großer Komplexität verbunden ist, entfällt hierbei gänzlich. Dies verringert den initialen Aufwand zum Einsatz von Materialflusssimulation in der PPS insbesondere dadurch, dass keine tiefere Simulationsexpertise notwendig ist, um MPC einzusetzen. Auch bedarf es keiner Expertise hinsichtlich der Erstellung von Simulationsmodellen in Plant Simulation. Lediglich bei der manuellen Korrektur von Logik-Fehlern und der Freigabe der Daten ist das Wissen der Anwendenden notwendig, welche Informationen für die automatisierte Modellgenerierung benötigt werden. Dadurch wird die aktuell existierende Hürde zum Einsatz moderner Methoden wie Simulation genommen und erleichtert Unternehmen den Einstieg.

3.4 Integrierter Szenarienvergleich

Im Szenarienvergleich lässt sich eine strukturierte „Was wäre wenn“-Analyse durchführen und damit verschiedene Verbesserungspotenziale und Veränderungen in der PPS bewerten. Aufbauend auf einem Basisszenario, das basierend auf den realen Rückmeldedaten den Status Quo der Produktion abbildet, werden in der integrierten Datenkonfiguration einzelne Parameter variiert und daraus verschiedene Szenarien erstellt. Variationsmöglichkeiten dabei können einzelne Parameter der Eingabedaten wie zum Beispiel die Maschinenanzahl oder Produktionspläne oder Anpassungen in grundlegenden Rahmenbedingungen wie der

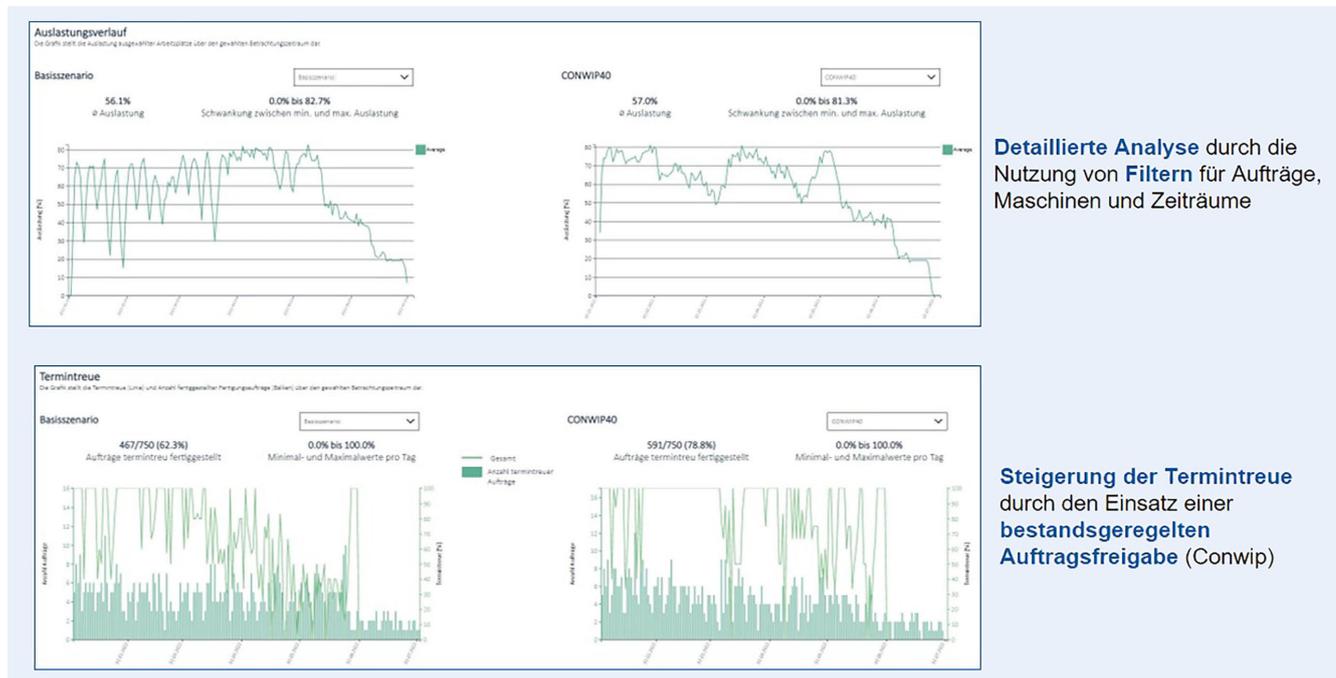


Bild 3. Beispielhafte Szenarienvergleiche zur Entscheidungsunterstützung. *Grafik: WZL / RWTH Aachen*

Anpassung des Schichtmodells oder des Steuerungsprinzips (ConWIP, FIFO (First In First Out), KOZ (Kürzeste Operationszeit), Rüsto optimiert, etc..) sein. Hier lassen sich insbesondere das Prinzip zur Auftragsfreigabe und Reihenfolgeplanung variieren, die einen signifikanten Einfluss auf die PPS besitzen.

Zur Erzeugung eines Szenarios wird aus den konfigurierten Daten und den angepassten Steuerungsprinzipien automatisch ein adaptiertes Simulationsmodell generiert und innerhalb des Zeitraums des Basisszenarios simuliert. Die Ergebnisse der Simulation werden anschließend automatisch zur Auswertung zurück in das Tool gespielt und sind dort als neues simuliertes Szenario verfügbar. Nach erfolgreicher Erstellung kann das simulierte Szenario durch einfache Menüauswahl im direkten Vergleich zu dem Basisszenario oder anderen verfügbaren Szenarien ausgewertet werden. Auch hier werden die in Kapitel 3.2 genannten Kennzahlen anhand von Durchschnittswerten und im zeitlichen Verlauf gegenübergestellt. Dazu sind ebenfalls die bereits vorgestellten Filtermöglichkeiten verfügbar.

Hierzu sind beispielhaft in **Bild 3** der Auslastungsverlauf und die Termintreue zweier Szenarien im Vergleich dargestellt.

Wie in den Beispielen gezeigt, lassen sich aus dem direkten Vergleich unterschiedliche Schlussfolgerungen zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionssteuerung ziehen. Während im ersten Beispiel der Einfluss von Filtern dargestellt ist, zeigt das andere Beispiel, dass durch die Einführung einer bestandsregelnden Auftragsfreigabe eine Verbesserung der Termintreue um 15 % erzielt werden kann. Damit zeigt der direkte Vergleich unterschiedlicher Szenarien, dass sich durch Anpassungen an den eingesetzten Steuerungsprinzipien oder an den Produktionsstrukturen teils signifikante Verbesserungen in Bezug auf die logistischen Zielgrößen erreichen lassen. Damit kann zusätzliche Akzeptanz geschaffen werden, weil Entscheidungen in Bezug auf Produktionsanpassungen plausibel begründet werden können.

4 Erweiterung um KI-Integration und MPC-Core

Die beschriebenen Funktionen von MPC stellen Anwendenden die Möglichkeit einer graphischen Analyse historischer Produktionsdaten zur Verfügung. Des Weiteren lassen sich durch den Szenarienvergleich verschiedene Produktionskonfigurationen erstellen und Verbesserungspotenziale bewerten (siehe Kapitel 3). Dennoch ist für die Interpretation der Ergebnisse weiterhin spezifisches Fachwissen notwendig. Das größte Potenzial von MPC liegt folglich darin, Teile des benötigten Fachwissens zu formalisieren und in Algorithmen abzubilden. Diese geben auf Basis von Heuristiken oder KI-Entscheidungsempfehlungen ab, sodass für die Analyse der Ergebnisse dann kein Expertenwissen mehr notwendig ist.

In diesem Zusammenhang wird MPC aktuell derart erweitert, dass eine standardisierte Beschreibungsumgebung (MPC-Core) für Werkstattfertigungen entsteht. Diese Umgebung kann dann mit unterschiedlichen Optimierungsverfahren verbunden werden und somit für unterschiedliche Zwecke genutzt werden. Die Bereitstellung der graphischen Analyseverfahren sowie der Fehlerkorrektur ermöglichen so eine Lern- und Trainingsumgebung für die Entwicklung zukünftiger Steuerungs- und Freigabeverfahren. Angelehnt ist die Idee an aus der RL Community bekannte Trainingsaufgaben und Trainingsumgebungen, die mit unterschiedlichen Algorithmen gekoppelt werden können. Um in diesem Zusammenhang auch KI-Algorithmen als zukünftige Verfahren zu testen, wird das Tool um eine Oberfläche zur Entwicklung und Optimierung dieser ergänzt. Parametereinstellungen der Algorithmen können direkt im Tool variiert werden, ohne dass zusätzlicher Programmieraufwand in externen Programmen erforderlich ist. Zur zielgerichteten Optimierung der Algorithmen, wird deren Qualität in MPC visualisiert.

5 Zusammenfassung/Ausblick

MPC ist ein webbasiertes Tool mit zugrundeliegender Simulationsanbindung und intuitiver Benutzeroberfläche zur Analyse und Entscheidungsunterstützung der PPS von Produktionen mit komplexen Materialflüssen. Durch die Unterstützung zur Fehlererkennung entfällt für die Unternehmen eine aufwendige Datenaufbereitung und die notwendige Datenqualität für erfolgreiche Materialflusssimulationen kann leichter sichergestellt werden. Die detaillierte Analyse des derzeitigen Produktionsstatus erlaubt es, Schwachstellen in der PPS zu identifizieren und Verbesserungspotenziale zu erkennen. Die automatische Simulationsmodellgenerierung senkt den initialen Aufwand zur Durchführung von Materialflusssimulationen erheblich. Die zeitaufwendige Modellgenerierung, für welche Expertenwissen benötigt wird, erfolgt automatisiert in Plant Simulation. Die Möglichkeit des Szenariovergleichs erlaubt es Anwendenden strukturiert „Was wäre wenn“-Analysen durchzuführen und erhöht die Akzeptanz bei getroffenen Entscheidungen.

Durch die Erweiterung des Tools um die Integration von KI-Anwendungen und die Entwicklung von MPC-Core schafft die Anwendung den Schritt von einem Analysetool zu einer Applikation, die aktiv als Entscheidungsunterstützung genutzt werden kann. Die KI-Integration befähigt die Unternehmen dazu, die Vorteile von KI zu nutzen, ohne dass tiefgehendes Programmierungswissen vorhanden sein muss. Mit MPC-Core entsteht zudem eine baukastenförmige Plattform, welche die Grundlage schafft, um Analyse, Simulation und KI auch in weiteren Anwendungen zu vereinen.

Aktuell befindet sich das Tool in der Validierungsphase und damit im letzten Schritt der Softwareentwicklung. Ziel der Validierung ist der Einsatz des Tools anhand von realen Rückmelde-daten, um die implementierten Funktionen und Entscheidungsunterstützungen sowie die Nutzerfreundlichkeit in der Praxis zu testen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Weiterentwicklung des Tools. Damit die Funktionalität mit realen Daten getestet werden kann, wird beteiligten Unternehmen eine kostenlose Analyse ihrer Produktion für drei bis fünf Werke angeboten. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse historischer Produktionsdaten anhand von Kennzahlen und Diagrammen zur Bewertung der PPS. Die Tests mit realen Use-Cases haben bereits zu vielversprechenden Verbesserungen geführt, da die Validierung jedoch noch nicht abgeschlossen ist, werden weitere teilnehmende Unternehmen gesucht.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.

Literatur

- [1] Duffie, N.; Bendul, J.; Knollmann, M.: An analytical approach to improving due-date and lead-time dynamics in production systems. *Journal of Manufacturing Systems* 45 (2017), S. 273–285
- [2] Schuh, G.; Gützlaff, A.; Schmidhuber, M.; Fulterer, J.; Janke, T.: Towards an Automated Application for Order Release. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 1323–1328
- [3] Schlegel, T.; Siegert, J.; Bauernhansl, T.: Metrological Production Control for Ultra-flexible Factories. *Procedia CIRP* 81 (2019), pp. 1313–1318
- [4] Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Vieweg, (2017), pp. 290
- [5] Karlsson, I.: An interactive decision support system using simulation-based optimization and knowledge extraction. Doctoral dissertation, Skövde, (2018), pp. 101
- [6] Trigueiro de Sousa Junior, W.; Barra Montevechi, J. A.; Carvalho Miranda, R. de; Teberga Campos, A.: Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering* 128 (2019), 526–540
- [7] Schuh, G.; Potente, T.; Fuchs, S.; Schmitz, S.: Wertstromorientierte Produktionssteuerung: Interaktive Visualisierung durch IT-Tools zur Bewertung der Logistik- und Produktionsleistung. *wt Werkstattstechnik online* 102 (2012) 4, S. 176–180
- [8] Heilala, J.; Montonen, J.; Jarvinen, P.; Kivikunnas, S.; Maantila, M.; Sillanpaa, J.; Jokinen, T.: Developing simulation-based Decision Support Systems for customer-driven manufacturing operation planning. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* IEEE, pp. 3363–3375
- [9] Reinhardt, H.; Weber, M.; Putz, M.: A Survey on Automatic Model Generation for Material Flow Simulation in Discrete Manufacturing. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 121–126
- [10] Lugaresi, G.; Matta, A.: Real-time simulation in manufacturing systems: Challenges and research directions. *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, pp. 3319–3330
- [11] Wang, J.; Chang, Q.; Xiao, G.; Wang, N.; Li, S.: Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant. *Computers in Industry* 62 (2011), pp. 765–775
- [12] Kibira, D.; McLean, C.: Virtual reality simulation of a mechanical assembly production line. In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. (WSC) 2002. IEEE, pp. 1130–1137
- [13] Rohrer, M. W.: Seeing is believing: the importance of visualization in manufacturing simulation. In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. IEEE, pp. 1211–1216
- [14] Schriber, T. J.; Brunner, D.T.: Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters. In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*. IEEE, pp. 97–107
- [15] Lindskog, E.; Berglund, J.; Vallhagen, J.; Berlin, R.; Johansson, B.: Combining point cloud technologies with discrete event simulation. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. WSC 2012. IEEE, pp. 1–10
- [16] Gosavi, A.: *Simulation-Based Optimization: Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*. Springer, 2015 New York
- [17] Sutton, R. S.; Barto, A.G.: *Reinforcement Learning: An Introduction*. The MIT Press, Cambridge, MA, London 2018, pp. 352



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. **Günther Schuh**
Foto: WZL – Krentz (Institutsintern)

Dr.-Ing. **Seth Schmitz**

Jan Maetschke, M. Sc. RWTH

Tim Janke, M. Sc. RWTH, M.Sc.

Hendrik Eisbein, M. Sc. RWTH

Werkzeugmaschinenlabor WZL
der RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
Tel. +49 241 80 28684
t.janke@wzl.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Seth Schmitz
GPMC Global Production Management Center
GmbH Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
Tel. +49 241 47574 970
info@gpmc-aachen.de
www.gpmc-aachen.de

LIZENZ



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