

Simulationsbasierte Validierung eines automatisierten Produktions- und Materialflusssteuerungssystems

Simulation-based validation of an automated production and material flow control system

Isabella Lichtenstern, Stefanie Wucherer, Florian Kerber,
Technologietransferzentrums für flexible Automation (TTZ), Hochschule Augsburg,
Augsburg (Germany), isabella.lichtenstern@hs-augsburg.de, stefanie.wucherer@hs-
augsburg.de, florian.kerber@hs-augsburg.de

Steffen Klarmann, Valeo Schalter und Sensoren GmbH, Wemding (Germany),
steffen.klarmann@valeo.com

Abstract: In recent years, more and more simulation tools have been used by manufacturing companies to virtually commission, update and optimize increasingly complex production systems. This paper presents a simulation-based approach and first results for the validation of a flexible production and material flow control system called *ProLogCloud*. Integrated at the MES level, *ProLogCloud*, which was developed as part of a publicly funded research project, schedules assembly orders thus controlling a set of manufacturing islands using automated guided vehicles. To validate the scheduling algorithms and to evaluate the overall performance of the system, a simulation model of the assembly area has been set up. A relational database constitutes the central interface to exchange production data and commands with the system. The simulation setup is used to analyze and optimize the production and material flow control system in different scenarios. To reduce the effort required to instantiate the model, a parametric model generator is used to create different test scenarios. The simulation model also contains an integrated fleet management system that is used to coordinate the automated guided vehicles and assign them transport orders.

1 Einleitung und Motivation

Die Automobilindustrie ist durch einen stetigen technologischen Wandel und einen hohen Wettbewerbsdruck gekennzeichnet. Insbesondere Innovationen auf dem Gebiet der Elektromobilität und des autonomen Fahrens beeinflussen neben den klassischen OEMs auch die Zulieferindustrie. Um die Marktanforderungen zu erfüllen, müssen diese Unternehmen neben kontinuierlicher Verbesserung der Produkte auch die

erforderlichen Fertigungsverfahren optimieren. Die gestiegenen Kundenanforderungen an Individuallösungen erhöhen die Komplexität der Produktionsplanung und des Materialflusses und führen zu verkürzten Planungszyklen mit häufigem Umrüsten. Dies stellt Produktionsplaner vor enorme Herausforderungen. Um die Flexibilität der Materialflussteuerung zu erhöhen, setzen außerdem immer mehr Firmen auf einen automatisierten Materialtransport mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF), deren Einsatz ebenfalls koordiniert werden muss (L. Sabbatini u. a. 2013).

Am Beispiel einer vollautomatischen Produktion von Ultraschallparkensoren soll deshalb im Rahmen eines öffentlichen Forschungsprojekts ein zusätzliches Steuerungssystem namens *ProLogCloud* als Produktionsleitsystem zur automatisierten Materialflussteuerung mit FTF entwickelt werden. Dabei wird die bisher realisierte starre Verkettung der einzelnen Fertigungsschritte aufgelöst und ein vollflexibles Hybrid Flow Shop Prinzip mit parallelen Produktionsinseln umgesetzt. Neben der Prozesslogistik werden auch die einzelnen Fertigungsverfahren optimiert. Die Absicherung der zu entwickelnden Systemlösung kann dabei nicht in der realen Produktionsumgebung erfolgen, sondern muss durch digitale Methoden vorbereitet werden. Anstatt eines teuren, risikoreichen und fehleranfälligen Validierungsansatzes bei der Realinbetriebnahme im Feld, kann durch den gezielten Einsatz einer Materialflusssimulation die Leistungsfähigkeit und Robustheit des Steuerungssystems anhand von Worst-Case-Szenarien, Maschinenausfällen und anderen Risiken bereits während der Entwicklungsphase evaluiert werden (Versteegt/Verbraeck 2002).

Im vorliegenden Beitrag wird die Verknüpfung des flexiblen Produktions- und Materialflussteuerungssystems *ProLogCloud* auf MES- Ebene mit einem Simulationsmodell vorgestellt. Darin übernimmt die *ProLogCloud* die Planung und Steuerung aller beteiligten Produktionskomponenten – dazu zählen Fertigungseinheiten, fahrerlose Transportsysteme, Warenhäuser und Puffer. Diese werden im Simulationswerkzeug *Plant Simulation* digital abgebildet und über definierte Schnittstellen mit dem Produktionssteuerungssystem gekoppelt. Neben grundlegenden Funktionstests werden insbesondere die Integrationsaufgaben für die FTF sowie Performanceanalysen der implementierten Planungsalgorithmen durchgeführt.

2 Literaturübersicht

In den vergangenen Jahren sind immer mehr Simulationssysteme bei produzierenden Firmen zum Einsatz gekommen, um die zunehmend komplexer werdenden Produktionsprozesse abzusichern (Daniel 2020). Im Folgenden wird eine Auswahl an Forschungsergebnissen zur simulationsbasierten Produktionsplanung und –steuerung zusammengefasst. In (Golmohammadi 2015) werden eine Reihe von Simulationsszenarien für einen Master-Produktionsplan und die Drum-Buffer-Rope-Terminierungsmethode vorgestellt. Die Optimierungstechniken werden verwendet, um optimale Werte für die Eingabevariablen im Simulationsexperiment zu finden. In (Volling/Spengler 2011) wird ein Framework aus separaten, miteinander verknüpften quantitativen Modellen für die Planung der auftragsgesteuerten Automobilproduktion aufgebaut und deren Potenzial mit Hilfe der Simulation evaluiert. (Yang/Arndt/Lanza 2016) stellt ein Simulationssystem vor, das Produktionspläne und prognostizierte

Kundenaufträge integriert, um Produktionsunsicherheiten zu minimieren und die Produktionsleistung zu optimieren. (Gyulai/Kádár/Monosotóri 2015) stellt eine Planungs- und Steuerungsmethodik vor, die auf adaptiven Berechnungen basiert. Dabei werden historische Daten als direkter Input für ereignisdiskrete Simulationen verwendet, um den Kapazitätsbedarf der künftigen Produktion zu bestimmen. Außerdem verbindet (Gyulai u. a. 2016) ein Simulationsmodell direkt mit der Steuerung von modularen Zellen und evaluiert verschiedene Produktionspläne mit Hilfe der Simulation. Als Ergänzung eines digitalen Zwillings wird in (Herlyn/Zadek 2020) ein digitaler Steuerungszwilling vorgestellt, der die Auftragsabwicklung dynamisch steuert. Er überwacht die virtuelle Abbildung des Materialflusses. Bei zu großen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Werten leitet der digitale Steuerungszwilling entsprechende Optimierungsmaßnahmen ein. (Pfeiffer/Kádár/Monosotóri 2003) analysiert die Steuerung einer Transportanlage und eines automatisierten Regalbediengerätes mittels einer Simulationsstudie. (Block/Lins/Kuhlenkötter 2018) stellt den Ansatz eines ereignisgesteuerten Assistenzsystems für Produktionsplaner vor, das auf einer ganzheitlichen Fertigungsmodellierung basiert. Diese Modelle werden in Simulationen wiederverwendet, die mit Optimierungsalgorithmen verknüpft sind.

Im vorliegenden Beitrag wird die Umstellung auf einen vollautomatisierten Materialfluss bei gleichzeitiger Entkopplung der einzelnen Fertigungsschritte mittels digitaler Methoden vorgestellt. Bisher überwiegend manuell ablaufende Produktionsplanungsprozesse übernimmt und automatisiert die *ProLogCloud*. Um deren Planungsergebnis zu validieren und auf Robustheit zu prüfen, werden die generierten Produktions- und Materialflussprozesse innerhalb einer Simulation ausgeführt und getestet. Als zusätzliches Merkmal soll der Materialfluss komplett durch automatisierte Transportsysteme übernommen werden.

3 Aufbau und Funktion des Simulationssystems

Die Produktionsplattform *ProLogCloud* wird auf MES-Ebene entwickelt, um individuell ansteuerbare Fertigungsinseln über eine intelligente Prozesslogistik digital miteinander zu vernetzen und den Produktionsbereich vollständig zu automatisieren. Durch ein ganzheitliches Integrationskonzept mit universellen Schnittstellen zu allen Ebenen der IT-Architektur soll die Übertragbarkeit des Konzepts auf unterschiedliche Branchen und Unternehmensstrukturen ermöglicht werden. Ziel ist es, trotz einer immer größeren Produktvarianz eine äußerst flexible und effiziente Fertigung zu ermöglichen.

Mit Hilfe einer computergestützten Simulation soll die cloudbasierte Produktionsplattform *ProLogCloud* bereits vor der realen Inbetriebnahme beim Kooperationspartner virtuell in einer Software-in-the-loop (SIL) -Simulation aufgebaut und validiert werden. Die SIL-Simulation ist Teil der X-in-the-loop (XIL) - Entwicklungs- und Testumgebungen. Das X ist dabei austauschbar und steht jeweils als Platzhalter für den zu untersuchenden Prüfling. Eine XIL- und damit auch die SIL-Simulation besteht grundsätzlich aus zwei Komponenten, dem zu testenden System, das sogenannte System-under-test (SUT) und einem Simulator, der auf die Signale und Zustandsänderungen der SUT reagiert. Software-in-the-loop Simulationen erfordern keine physikalische Hardware, sondern finden ausschließlich in einer simulierten Umgebung statt. Durch Anschluss der *ProLogCloud*-Software an ein

digitales Anlagenmodell können Entwickler den Quellcode ohne teurere Systeme, Prototypen oder Prüfstände direkt am PC verwenden. Ausschließlich auf Basis des vorliegenden Quellcodes werden die implementierten Funktionen auf Korrektheit geprüft. Bereits vor Beginn eines realen Komponententests können so Softwaretests erfolgen (Albers u. a. 2010). Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird das Simulationsmodell im Rahmen der SIL-Technologie mit der *ProLogCloud*, dem System-under-test, über eine relationale Datenbank verknüpft und ersetzt als Bestandteil eines digitalen Fabrikmodells somit die physikalischen Schnittstellen.

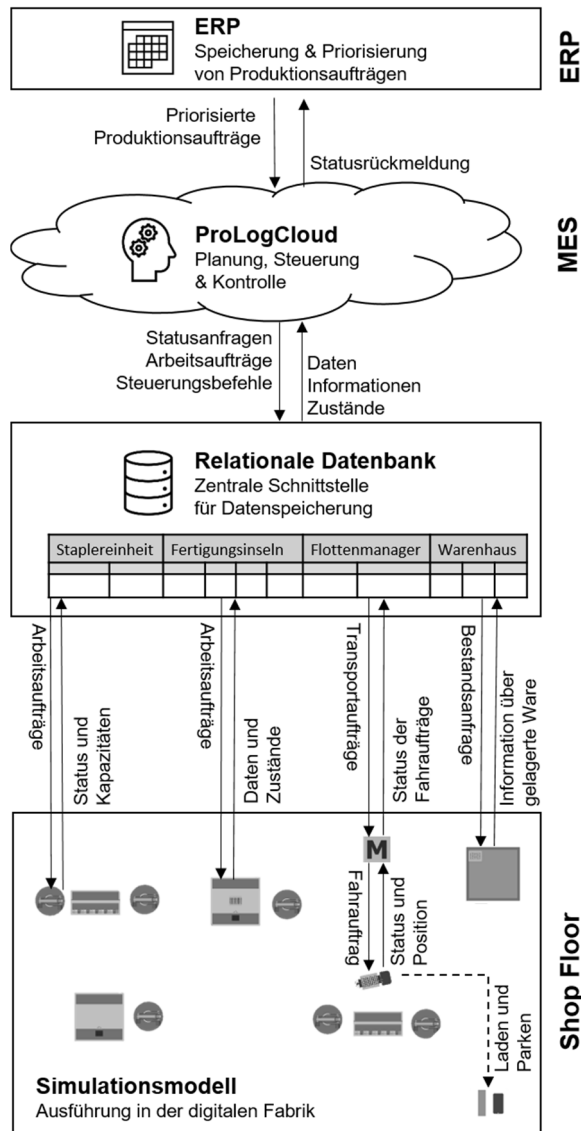


Abbildung 1: Funktionsweise und Ablauf der gesteuerten Simulation

Der Auftragseingang und die Priorisierung der Kundendaten erfolgt auf der hierarchisch höchsten Ebene der Unternehmensplanung. Das System *ProLogCloud* implementiert deshalb eine Schnittstelle zum ERP-System, um die Liste der priorisierten Auftragsdaten zyklisch abzufragen.

Die *ProLogCloud* übernimmt dann innerhalb der Produktionsprozesse die Planung und Steuerung des automatisierten Materialflusses und der Logistik mit Hilfe von FTF. Durch einen kontinuierlichen Datenaustausch zwischen den einzelnen Produktionskomponenten und der *ProLogCloud* optimiert sie mit Planungsalgorithmen in Echtzeit alle auftragsbezogenen Prozesse – von der Materialflusslogistik bis hin zum Einrichten der Steuerungsprogramme von einzelnen Produktionsinseln. Das Produktions- und Materialflusssteuerungssystem generiert außerdem Transportaufträge mit Start- und Zielpositionen inklusive Lieferzeiten für entsprechende Transportgüter.

Für die zentrale Datenspeicherung des Planungssystems *ProLogCloud* wurde eine relationale Datenbank gewählt. Zum einen wird dadurch die Rückverfolgbarkeit der Planungsentscheidungen gewährleistet, zum anderen die Echtzeitvisualisierung vereinfacht.

Die *ProLogCloud* gibt Steuerungsbefehle über die SQL-Datenbank an die entsprechenden Produktionskomponenten in der Simulationsumgebung weiter, die diese durch programmierte Steuerungsmethoden ausführen.

Die Instanziierung des produktionstechnischen Simulationsmodells erfolgt mittels eines parametrischen Modellgenerators (siehe Abbildung 2). Dieser liest unterschiedliche Datenformate zur Layout- und Hardwarekomponentendefinition wie CAD-, XLSX oder XML-Dateien ein und erweitert diese um relevante Prozessparameter, die die Ausführung von Testszenerarien ermöglichen und das Modell für die SQL-Schnittstelle vorbereiten. Auf Basis dieser Parameter wird das Modell dann automatisch generiert und eine XML-Datei für die Initialisierung der *ProLogCloud* erzeugt. Mit Hilfe der XML-Datei werden anschließend die benötigten Steuerungen für die SQL-Schnittstelle instanziiert. So kann der

Implementierungsaufwand für unterschiedliche Szenarien deutlich reduziert werden.

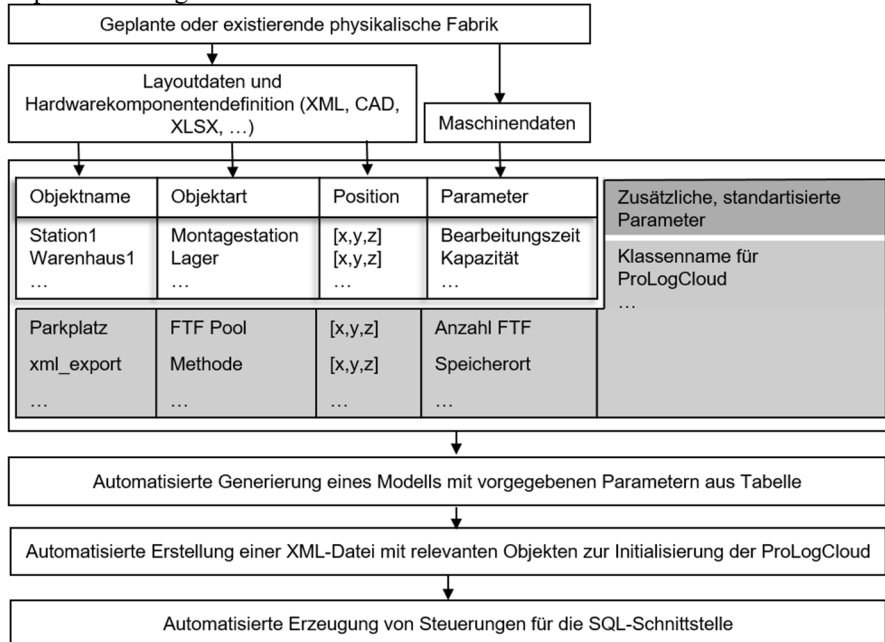


Abbildung 2: Parametrischer Modellgenerator

Wie im Simulationsmodell in Abbildung 1 dargestellt, bestehen die automatisch generierten Modelle aus folgenden Komponenten:

- FTF für den Warentransport mit Park- und Ladestation
- flexibel ansteuerbare Fertigungsinseln
- mit den Fertigungsinseln verbundene Palettiervorrichtungen, an denen zu bearbeitende Rohmaterialien und Halbfertigerzeugnisse von FTF angeliefert und von denen bearbeitete Halbfertigerzeugnisse wieder abtransportiert werden
- Warenhausstationen und Puffer als Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Fertigungsschritten, aus denen die FTF bedarfsorientiert die Inseinheiten beliefern

Der Materialfluss im betrachteten Produktionsbereich wird mit Hilfe einer proprietären Leitsteuerung simuliert, die die Zuweisung der Transportaufträge zu den einzelnen FTF übernimmt. Die priorisierten Transportaufträge empfängt sie von der *ProLogCloud*. Die Funktionsweise der Leitsteuerung wird in der Simulationsumgebung programmiert, um das reale Verhalten der Fahrzeuge so exakt wie möglich nachzubilden. Jedes FTF gibt seinen Status und die Position an die Leitsteuerung in Echtzeit zurück.

Aus den Experimenten gewonnene Daten werden an die *ProLogCloud* zurückgegeben, die kontinuierlich neu plant und wiederum entsprechende Steuerungsbefehle in die Datenbank einträgt.

4 Ziele des Simulationsmodells

Der Einsatz im Simulationsmodell bietet den Vorteil, das Verhalten der *ProLogCloud* an allen virtuellen Schnittstellen zu testen und dient bereits während der Entwicklungsphase als Absicherung und Validierung der Funktionalität. Da die Simulationsbausteine die realen Objekte in einer Testumgebung ersetzen, können Kosten eingespart werden – bei gleichzeitig hoher Flexibilität.

Die Simulation bietet zudem die Möglichkeit der Anwendung in unterschiedlichsten Fabriken, um so die universelle Einsatzbarkeit der *ProLogCloud* zu prüfen. Mit zunehmender Komplexität der Produktionsprozesse soll schrittweise das Optimierungspotenzial für die *ProLogCloud* evaluiert werden. Außerdem sollen unterschiedliche Planungsalgorithmen innerhalb des Steuerungssystems untersucht werden – in einer vollständig virtuellen Umgebung, deren dynamische Abläufe auch beschleunigt werden können.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht zweier unterschiedlich komplexer Szenarien mit den zugehörigen Validierungszielen:

Tabelle 1: Übersicht der Simulationsszenarien

Szenario	Validierungsziel	Anzahl FTF	Komplexität
Sequenziell ablaufendes Flow-Shop Prinzip	Funktionsnachweis und Integrationstest	N=1	Reduziert
Parallel ablaufendes Hybrid Flow Shop-Prinzip	Performanceanalyse und Optimierung des Gesamtszenarios	N>1	Hoch

4.1 Optimierung des Gesamtsystems

Innerhalb der einzelnen Szenarien können verschiedenste FTF- und Fertigungsabläufe aufgebaut und mit der *ProLogCloud* gesteuert werden. Es ist möglich, unterschiedliche FTF-Leitsteuerungen zu vergleichen und die optimale Anzahl an FTF zu prognostizieren. Insbesondere werden das Verhalten in Kollisionsszenarien mit dem Personal oder anderen Transportfahrzeugen sowie Lade- und Stillstandszeiten untersucht. Außerdem besteht die Möglichkeit, das Hallenlayout bereits vor dem physikalischen Aufbau optimal auszulegen.

4.2 Performanceanalyse

Die Datenanalyse im Simulationsmodell erzeugt während des gesamten Produktentstehungsprozesses KPIs, auf deren Grundlage die einzelnen Parameter in der Produktion optimiert werden können. Leistungskennzahlen wie Termintreue, Durchlauf- und Rüstzeiten sowie Auslastungen werden in der Simulation gemessen, visualisiert und anschließend analysiert. Außerdem werden Ursachen und Auswirkungen von Störungen, Engpässen und negative Einflüsse wie menschliches Fehlverhalten oder technische Störungen detektiert.

Hierfür werden u. a. folgende Störfälle evaluiert:

- Produktion von Ausschussmaterial an einzelnen Fertigungsinseln
- Schwankungen der Durchlaufzeit einzelner Fertigungsinseln
- Zu geringe Lagerkapazitäten an den Palettiervorrichtungen, Puffern oder im Warenhaus
- Durch Hindernisse blockierte Routen und Stillstand einzelner FTF

5 Implementierung

Abbildung 3 zeigt die Einbettung der einzelnen Elemente in die SIL-Simulationsumgebung. Für den Integrationstest wurde das SUT *ProLogCloud* auf einem separaten Steuerungsrechner installiert, das Simulationsmodell läuft auf einem eigenen Simulationsrechner. Beide Komponenten sind mit dem Datenbankserver verbunden.

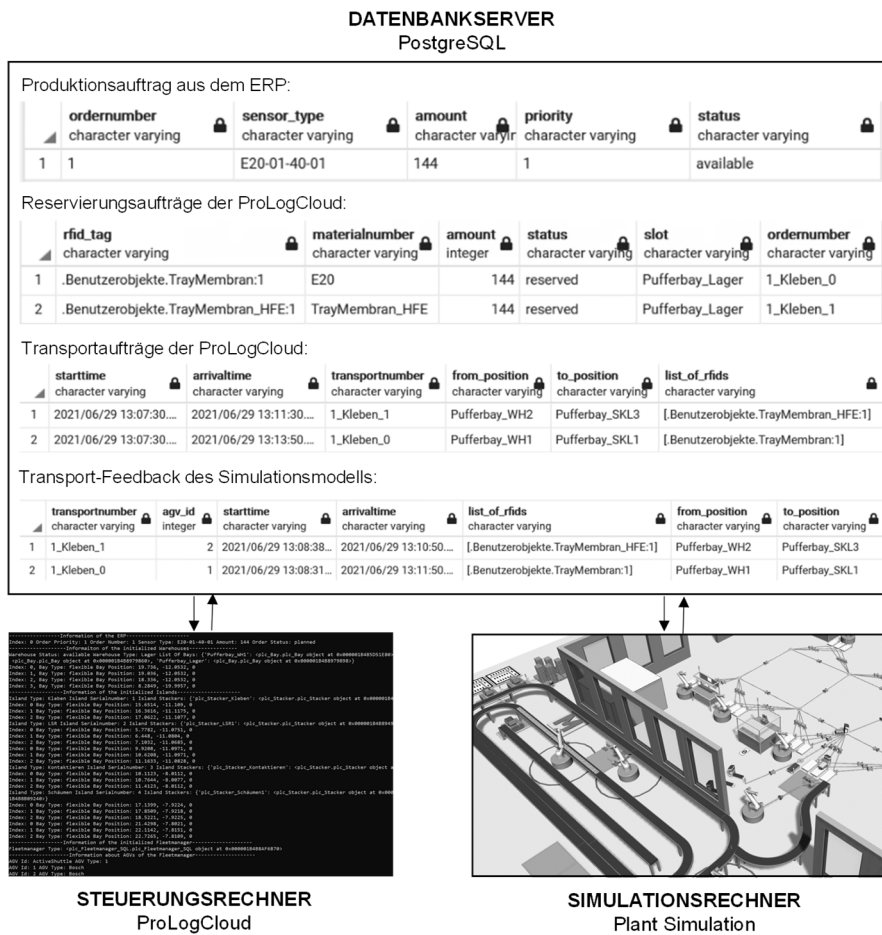


Abbildung 3: Implementierung des Simulationssystems

In Abbildung 3 wird dargestellt wie der Produktionsauftrag „1“ mit 144 Sensoren des Typs „E20-01-40-01“ abgearbeitet wird. Die *ProLogCloud* berechnet zunächst für den ersten Fertigungsschritt benötigte Rohmaterialien und Leergut-Objekte und prüft über den Datenbankservers, ob diese im Warenhaus des Simulationsmodells verfügbar sind. Nach erfolgreicher Suche reserviert die *ProLogCloud* Membrane und Leergut durch einen Reservierungsauftrag. Das Simulationsmodell palettiert im Anschluss die angeforderte Ware auf Fördermittel und stellt sie über Förderbänder den FTF zur Abholung bereit. Die *ProLogCloud* generiert dann Transportaufträge mit entsprechenden Transportzeiten, um Leergut und Membrane vom Warenhaus zur ersten Fertigungsinsel zu befördern. Der integrierte Flottenmanager im Simulationstool weist diese Aufträge den FTF mit der ID 1 und 2 zu. Nach erfolgreichem Transport gibt das Simulationsmodell ein Feedback. Die eingetroffene Ware wird an der Fertigungsinsel bearbeitet und anschließend auf das Leergut umgelagert. Die *ProLogCloud* berechnet und veranlasst währenddessen bereits die nächsten Produktions- und Logistikprozesse.

Damit konnten alle notwendigen Schnittstellen für die Koppelung des Simulationsmodells mit der *ProLogCloud* geschaffen werden. Der Integrationstest wurde anhand des Simulationsszenarios eines sequenziell ablaufenden Flow-Shop Prinzips durchgeführt. Das Simulationsmodell wird durch Reservierungs- und Bereitstellungsanweisungen im Warenhaus, Fahraufträge und Lieferzeiten für die FTF und Fertigungsaufträge für Inseln und Palettiervorrichtungen durch die *ProLogCloud* fremdgesteuert. Zustände, Zeiten und Informationen zum Fortschritt des Produkts werden in Echtzeit für eine erneute Planung erfolgreich zurückgegeben. Die im Modell programmierte Leitsteuerung koordiniert die Fahrzeuge und weist diesen Transportaufträge zu.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Kopplung eines Produktions- und Materialflusssteuerungssystems namens *ProLogCloud* auf MES-Ebene mit einem Simulationsmodell vorgestellt. Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten alle Schnittstellen geschaffen werden, um die Validierung der *ProLogCloud* in einer Software-in-the-loop Simulation zu ermöglichen. Der parametrische Modellgenerator ermöglicht dabei eine flexible und schnelle Instanziierung von verschiedenen Szenarien. Der SIL-Aufbau wurde vollständig implementiert und der Integrationstest von Steuerungssoftware und Simulationsmodell erfolgreich durchgeführt.

Im nächsten Schritt soll dann in Anlehnung an den industriellen Anwendungsfall ein Hybrid Flow Shop-Szenario zur Validierung der Planungsalgorithmen der *ProLogCloud* untersucht und deren Performance anhand von KPIs bewertet werden. Dabei wird der Detaillierungsgrad der Modellkomponenten wie beispielsweise des im Modell integrierten Flottenmanagers zunehmend geschärft.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Förderprogramms für Forschung und Entwicklung „Elektronische Systeme“.

Literatur

- Albers, A. u. a.: X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme, in: *ATZechnik*, 5. Jg., 2010, H. 5, S. 60–65.
- Block, C.; Lins, D.; Kuhlenkötter, B.: Approach for a simulation-based and event-driven production planning and control in decentralized manufacturing execution systems, in: *Procedia CIRP*, 72. Jg., 2018, S. 1351–1356.
- Daniel, C.: Simulationsplattform für Automatisierungslösungen, in: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115. Jg., 2020, special, S. 32–35.
- Golmohammadi, D.: A study of scheduling under the theory of constraints, in: *International Journal of Production Economics*, 165. Jg., 2015, S. 38–50.
- Gyulai, D. u. a.: Simulation-based Production Planning and Execution Control for Reconfigurable Assembly Cells, in: *Procedia CIRP*, 57. Jg., 2016, S. 445–450.
- Gyulai, D.; Kádár, B.; Monostori, L.: Robust production planning and capacity control for flexible assembly lines, in: *IFAC-PapersOnLine*, 48. Jg., 2015, H. 3, S. 2312–2317.
- Herlyn, W. J.; Zadek, H.: Der Digitale Steuerungs-Zwilling, in: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115. Jg., 2020, special, S. 70–73.
- L. Sabattini; V. Digani; C. Secchi; G. Cotena; D. Ronzoni; M. Foppoli; F. Oleari: Technological roadmap to boost the introduction of AGVs in industrial applications, in: *2013 IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 2013, S. 203–208.
- Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.: Evaluating and improving production control systems by using emulation, in: *undefined*, 2003.
- Versteegt, C.; Verbraeck, A.: The extended use of simulation in evaluating real-time control systems of AGVs and automated material handling systems, in: Yücesan, E. (Hrsg.): *Exploring new frontiers*, 2002, S. 1659–1666.
- Volling, T.; Spengler, T. S.: Modeling and simulation of order-driven planning policies in build-to-order automobile production, in: *International Journal of Production Economics*, 131. Jg., 2011, H. 1, S. 183–193.
- Yang, S.; Arndt, T.; Lanza, G.: A Flexible Simulation Support for Production Planning and Control in Small and Medium Enterprises, in: *Procedia CIRP*, 56. Jg., 2016, S. 389–394.