

Ein Simulationssystem zur ganzheitlichen Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung für eine Unikatfertigung von Betonfertigteilen

A Simulation System for Holistic Support of Production Planning and Control for One-Of-A-Kind Production of Precast Concrete Parts

Dirk Steinhauer, Torsten Hildebrandt, SimPlan AG, Bremen (Germany),
dirk.steinhauer@simplan.de, torsten.hildebrandt@simplan.de

Abstract: This paper describes a simulation-based decision support system to increase the transparency, efficiency and effectiveness of production planning and control. It was developed in the context of a complex one-of-a-kind production of precast concrete parts in construction industry. The system transparently embeds a simulation model in a complex software architecture consisting of legacy and new software components. The simulation model includes a lot of processes like personnel, complex material flows, and energy consumption to allow a holistic quantitative assessment of the production processes and their constraining factors. Key performance indicators on service level, costs and energy consumption are the main output figures of the simulation model.

1 Einleitung

Die Ablaufsimulation ist eine etablierte Methode, um auch komplexe Produktionssysteme abbilden und ihr Verhalten zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) analysieren zu können (vgl. Law 2015 und Jeon et al. 2016). Stochastische Einflüsse und eine Vielzahl an weiteren praxisrelevanten Restriktionen lassen sich hiermit berücksichtigen, anders als z.B. bei analytischen Ansätzen. Werden entsprechende Simulationsmodelle mit den nötigen Zustandsdaten parametrisiert, lassen sie sich auch als taktisches und operatives Werkzeug der PPS einsetzen, um so z.B. die Auswirkungen von ungeplanten Unterbrechungen im Produktionsprozess zeitnah quantitativ bewerten zu können. Dies stellt jedoch hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit und Qualität der benötigten Daten, die teilweise bereits in bestehenden IT-Systemen vorhanden sind, teilweise aber auch durch zusätzliche Sensorik erst erfasst werden muss. Gerade für letzteres werden eine Reihe von Techniken im Kontext der Industrie 4.0-Thematik diskutiert (Xu et al. 2016). Insgesamt ergibt sich jedoch eine sehr heterogene Systemlandschaft, um letztlich eine geeignete Datenbasis für die simulationsgestützte PPS zur Verfügung zu haben.

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein simulationsgestütztes PPS-System, das eine Reihe verschiedener Datenquellen integriert und mittels Simulation, simulationsbasierter Optimierung und weiteren Werkzeugen eine Lösung für das operative Produktionsmanagement und die Planung und Steuerung eines komplexen Produktionssystems schafft. Die vorgestellte Lösung entstand auf Industrie-Initiative und wurde im Rahmen des Forschungsprojekts OPTIMISED (Optimised 2018) in einem Konsortium aus 10 Partnern umgesetzt.

Im Folgenden wird kurz die Gesamtlösung beschrieben und dann auf die Simulation und ihre Einbindung in das Gesamtsystem fokussiert. Das vorgestellte Simulationsmodell bildet eine Fabrik für Betonfertigteile des britischen Bauunternehmens Laing O'Rourke (LOR) in einem hohen Detaillierungsgrad ab.

Zur simulationsgestützten Planung und Optimierung im Kontext der Bau- und Baustoffindustrie sind nur relativ wenige Vorarbeiten vorhanden. Eine solche stellt (Donhauer et al. 2018) dar, die ein Vorgehen zur Planung und Um-Planung für die Herstellung von Kalksandstein dar. Während die Autoren dort detailliert auf die angewandte Optimierungsmethodik fokussieren, steht im vorliegenden Beitrag die Einbettung der Simulation in eine komplexe Systemlandschaft und die realitätsnahe Darstellung des komplexen Materialflusses mit seinen zahlreichen den Produktionsoutput beschränkenden Faktoren dar.

Der Produktionsprozess ist gekennzeichnet durch eine hohe Variantenvielfalt, die gefertigten Produkte sind in der Regel Unikate und weisen individuell sehr unterschiedliche Charakteristika auf. Verschiedene Teile der Fertigung sind als flexible Fließproduktion organisiert, in anderen Bereichen erfolgt eine Fertigung nach dem Baustellenprinzip. Bestimmte Bereiche der Fertigung sind hochgradig automatisiert, während andernorts manuell durchgeführte Tätigkeiten vorherrschen. Neben Maschinen und der verbindenden Fördertechnik sind das Personal ebenso im Modell berücksichtigt wie Kräne und Flächen. Für Teile des Prozesses werden nur begrenzt vorhandene Formen und Transportpaletten als Ressourcen modelliert.

Als Teil des Gesamtsystems wird den Produktionsplanern der Fabrik ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, um alternative Produktionspläne aber auch das Verhalten bei Störungen hinsichtlich Zielgrößen wie Termintreue/Service-Grad und Produktionskosten bewerten zu können. Eine wichtige Anforderung betraf auch die Berücksichtigung von Energie-Aspekten (Stromverbrauch). Somit werden als Zielgrößen ebenfalls der prognostizierte Energieverbrauch, die damit verbundenen Energiekosten und der resultierende CO₂-Fußabdruck vom Modell ermittelt. Auf diese Weise lassen sich ähnlich dem in (Selmair et al. 2015) beschriebenen Vorgehen die Wechselwirkungen der energiebezogenen Zielgrößen mit den klassischen produktionsbezogenen Zielgrößen bewerten. Ebenso wird es hierdurch möglich, die logistischen Auswirkungen von Energiesparmaßnahmen wie einer Limitierung des Maximalverbrauchs zur Vermeidung von Lastspitzen zu quantifizieren.

2 Überblick der Software-Architektur

Einen Überblick über die Architektur der im OPTIMISED-Projekt entwickelten Lösung ist in Abbildung 1 als sogenanntes "Component-and-Connector"-Diagramm dargestellt.

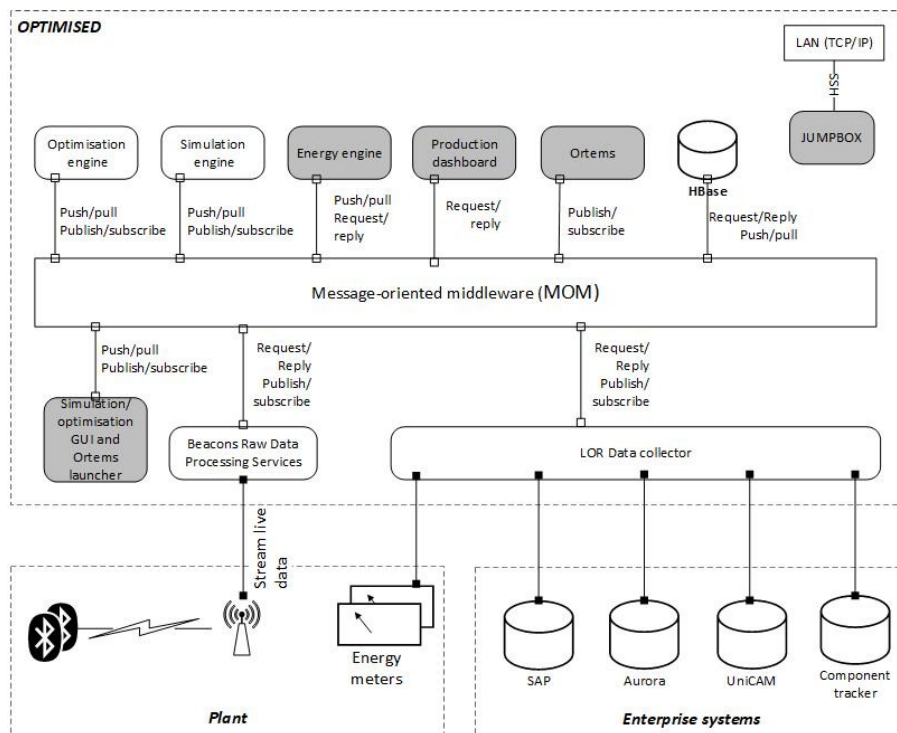


Abbildung 1: Überblick über Komponenten des Gesamtsystems (Teufl et al. 2018)

Seine wesentlichen Bestandteile sind im Folgenden beschrieben (Teufl et al. 2018):

- Die Nachrichten-orientierte Middleware (Engl: message-oriented middleware, MoM) stellt die zentrale Software-Infrastruktur bereit, die es erlaubt, Nachrichten zwischen verteilten Systemen auszutauschen. Als Teil der MoM gibt es eine zentrale Datenbank unter Nutzung von Apache HBase.
- Die Optimierungs-Engine löst Scheduling- und Rescheduling-Probleme. Die Bewertung der Lösungsgüte von Produktionsplänen erfolgt mittels Simulation.
- Die Simulations-Engine stellt ein Simulationsmodell der betrachteten Fabrik bereit. Hierdurch erfolgt eine Bewertung eines Produktionsplans hinsichtlich der betrachteten Zielgrößen.
- Das Simulations-/Optimierungs-GUI und Ortems Launcher stellt eine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung, um Daten zu laden, Simulations- und Optimierungsläufe anzustoßen und deren Ergebnisse darstellen zu können.
- Die Standard-Software Ortems wird genutzt, um Produktionspläne, die in der HBase Datenbank gespeichert sind, darzustellen. Ein Produktionsplan kann hierdurch im Detail analysiert werden.
- Dashboards: Das Produktions-Dashboard stellt Auswertungen bzgl. des aktuellen Fertigungszustands und der Produktions-Zielgrößen in einem Web-Browser dar.
- Die mit "Beacons Raw Data Processing Services" sowie "LOR Data Collector" bezeichneten Module stellen die Schnittstelle zwischen der MoM, den

vorhandenen IT-Systemen und den von Maschinen und Sensoren in der Fertigung erfassten Daten dar.

Die Nachrichten-orientierte Middleware stellt die Infrastruktur-Schicht dar, mittels derer die Komponenten interagieren können. Sie ermöglicht es, dass Komponenten mittels verschiedener Kommunikationsprotokolle kommunizieren können (Publish/Subscribe, Request/Reply, Push/Pull). Die Daten aus der Fabrik werden durch die Komponente „Beacon Raw Data Processing Services“ sowie den „LOR Data Collector“ gesammelt, einer Vorverarbeitung unterzogen und dann in der HBase Datenbank der MoM gespeichert. Nutzer können die Parameter einer Problem Instanz (in der Regel eines Produktionsplans) mittels der Benutzeroberfläche ändern, die von der Komponente „Simulation/Optimization Launcher“ zur Verfügung gestellt wird. Die Benutzeroberfläche zeigt die Daten an, die in der HBase Datenbank gespeichert sind und ermöglicht es einem Systemnutzer (üblicherweise dem Produktionsplaner), einen aktiven Produktionsplan auszuwählen, anzuzeigen, zu filtern und neu zu definieren. Die Produktionspläne können in Ortems, einer Advanced Planning and Scheduling-Software, im Detail visualisiert und bei Bedarf manuell angepasst werden.

3 Simulationstechnische Herausforderungen

Der Einsatz der Simulation in dem hier beschriebenen Kontext ist mit einigen simulationstechnischen Herausforderungen verbunden. Zunächst sind für die Verwendung der Simulation in Planung und Steuerung Daten unterschiedlicher Quellen zu importieren und zu berücksichtigen. Die Simulation muss die komplexen Abläufe in dem speziellen Produktionsbereich abbilden und dabei auch Analysen zum Energieverbrauch ermöglichen. Abschließend muss das Simulationsmodell in das komplexe Gesamtsystem integriert werden.

3.1 Simulation zur Planung und Steuerung

Um die Simulation als Entscheidungswerkzeug in Planung und Steuerung verwenden zu können, sind Daten erforderlich, die einerseits die Simulationsstudie und das Produktionsprogramm mit seinen prozessbeeinflussenden Eigenschaften und terminlichen Randbedingungen beschreiben, andererseits aber auch die aktuelle Situation in der Produktion im Hinblick auf Produktionsfortschritt und Ressourcenverfügbarkeit zum Inhalt haben (vgl. z.B. Jeon und Kim 2016). Auch Energieverbrauchparameter müssen in die Simulation importiert werden. In der Abbildung 2 sind die im OPTIMIZED-Projekt in der Simulation verwendeten Eingangs- und Ausgangsdaten gezeigt.

Auch bei den Ausgangsdaten stellen sich im Projektkontext besondere Herausforderungen. So wird als eine Anforderung seitens des Anwendungspartners verlangt, dass beispielsweise die Flächenbelegung in den flexiblen Bereichen in bestimmten Intervallen als Bild abgelegt wird.

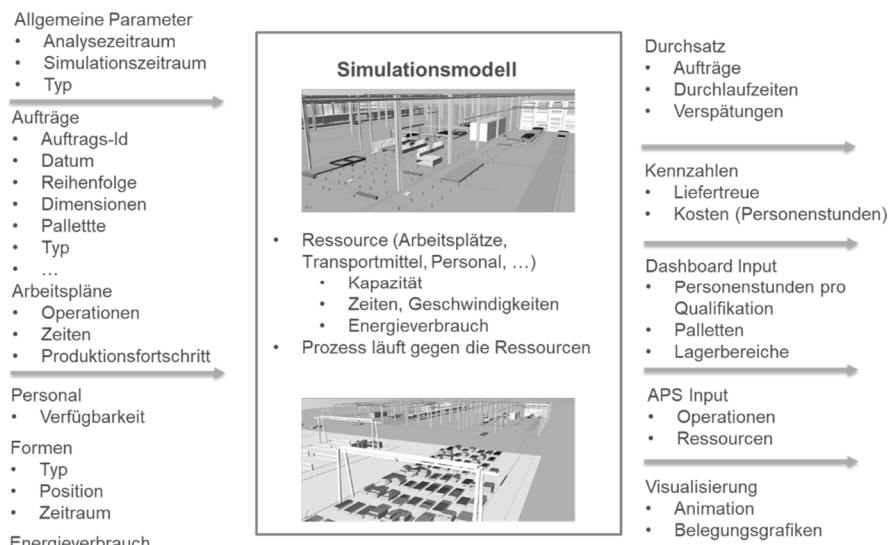


Abbildung 2: Ein- und Ausgangsdaten für die Simulation in Planung und Steuerung

3.2 Modellierungsaspekt Komplexer Materialfluss

Die Komplexität des zu modellierenden Materialflusses besteht einerseits in der Variantenvielfalt des Produktes und dessen Unikatcharakter sowie andererseits in den spezifischen Produktionsbedingungen der Betonfertigteilerstellung. In den als Linien ausgelegten Bereichen gilt es, spezielle Anlagen abzubilden, und im flexiblen Produktionsbereich muss die Flächenbelegung im Zusammenhang mit einer Baustellenfertigung Berücksichtigung finden. Generell sind dazu folgende Aspekte im Simulationsmodell berücksichtigt:

Relevante Produktionsressourcen mit ihren Verfügbarkeiten gemäß eines Schichtkalenders:

- Maschinen
- Personal
- Fördertechnik (Kräne, Paletten-Transportsystem, Regalbediensysteme)
- Lagerflächen und ihre Belegung
- Berücksichtigung von nur begrenzt verfügbaren Produktionshilfsmitteln (Transport-Paletten, Formen)

Abbildung der Materialfluss-Steuerung mit:

- Individuellem Routing/Arbeitsplänen der Aufträge
- Synchronisation der Operationszeiten zwischen Modell und Realsystem für bereits durchgeführte und gerade stattfindende Operationen
- Abbildung von Bereichen sowohl mit Baustellenfertigung unter Berücksichtigung der Flächenbelegung als auch mit Fließfertigung in anderen Bereichen

Zur Modellierung wurde die Simulationssoftware Plant Simulation unter Verwendung der STS Bibliothek für komplexe Produktion und Logistik (vgl. Steinhauer und Soyka

2012) ausgewählt. Letztere ist auf Basis von Anforderungen der Unikatfertigung entstanden und stellt die Grundbausteine zur Modellierung der hier abzubildenden Prozesse, wie zum Beispiel einen Baustein für die Flächenbelegung oder einen an spezielle Anforderungen anpassbaren Kran zur Verfügung.

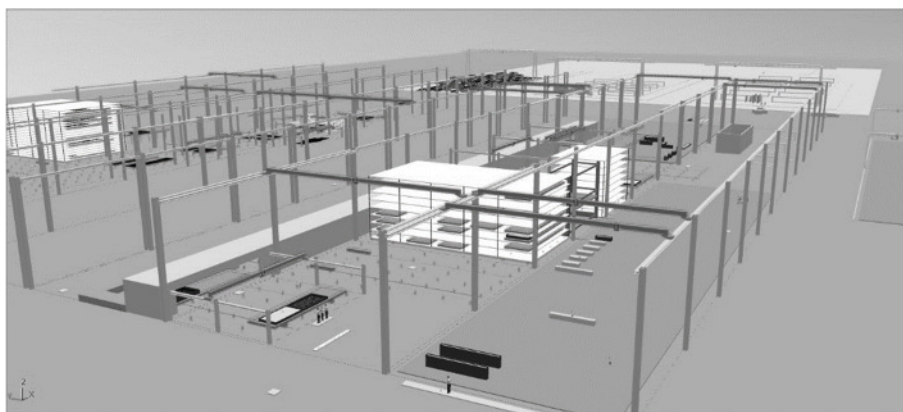


Abbildung 3: 3D-Visualisierung des Simulationsmodells der Fertigung

Für die besonderen Anforderungen der Betonfertigteilherstellung sind allerdings Erweiterungen im STS vorgenommen worden. So ist einerseits die Funktionsfähigkeit vieler Bausteine erweitert worden, z. B. die Anpassung des STS_Conveyor zur Einbindung in die Fließlinien oder die Anpassung des STS_ShuttleTruckSystem zur Modellierung des hydraulischen Hubwagens. Andererseits sind auch neue Bausteine für spezielle Anlagentypen entstanden, wie zum Beispiel der Kipptisch STS_TiltTable oder der Lagerbaustein für Betonfertigteile STS_PrecastRack mit seinen besonderen Lagereigenschaften. So ist basierend auf der STS Bibliothek die Add-on Bibliothek STS_Precast entstanden, die in ähnlich gelagerten Anwendungsfällen zukünftig den Modellierungsaufwand reduzieren dürfte. Die 3D-Animation des Simulationsmodells ist in Abbildung 3 gezeigt.

Die zu fertigenden Aufträge werden mit ihren Eigenschaften, den fertigungsrelevanten Daten, wie Planterminen und Arbeitsplänen und den Ist-Daten bereits abgearbeiteter Prozessschritte importiert. Diese Daten wurden über Daten-Provider aus unterschiedlichen Quellen zusammengestellt. Die Ergebnisse der Simulation können entweder mit den Auswertefunktionen des Simulationsmodells dargestellt oder an die Middleware übergeben werden.

3.3 Modellierungsaspekt Energie

Die Nachhaltigkeit der produzierten Güter und erstellenden Prozesse stellt auch in der Bauindustrie einen Aspekt dar, der zunehmend an Bedeutung gewinnt. Hierzu gehört es auch, bezüglich des CO₂-Fußabdrucks der produzierten Güter gegenüber Kunden auskunftsfähig zu sein. Um diesem Dokumentationsaspekt Rechnung zu tragen, sind im Projekt intelligente Stromzähler an verschiedenen Stellen in der Fertigung integriert (siehe „Energy Meters“ in Abb. 1). Die so gesammelten und in einem Energie-Dashboard dargestellten Stromverbräuche erlauben ein genaues Bild über die tatsächlichen Verbräuche.

Verknüpft man diese Daten mit Ist-Daten über Operationsstart- und -end-Termine, lassen sich Rückschlüsse auf den Energiebedarf einzelner Maschinen und Anlagen in bestimmten Betriebszuständen ziehen. Dies wiederum stellt einen wichtigen Input für die Simulation dar, die im Projekt genutzt wird, um den zu erwartenden Stromverbrauch für die nähere Zukunft (typischerweise eine Woche) zu prognostizieren. Hierbei wird der Produktionsplan ebenso berücksichtigt, wie eventuelle Stromsparmaßnahmen (etwa zur Vermeidung von Lastspitzen). Um dies zu ermöglichen, erlaubt das Simulationsmodell die Ermittlung von Energie-bezogenen Kenngrößen (Strom-Verbrauch, Strom-Kosten, CO₂-Fußabdruck) auf der Ebene der Gesamtfabrik, aber auch einzelner Teilbereiche/-systeme.

Im Rahmen des Projekts wurden die Komponenten der verwendeten Bausteinbibliothek STS so erweitert, dass der Stromverbrauch in Abhängigkeit vom Betriebszustand ermittelt und zentral im Modell zur weiteren Auswertung und Aufbereitung gesammelt werden. Im Gesamtsystem ist der Energieverbrauch einzelner Systeme über die Simulations/Optimierungs-GUI konfigurierbar (z.B. aufgrund der Messwerte, die die intelligenten Stromzähler in der Fertigung erfassen, siehe „Energy Meters“ in Abb. 1); diese werden im Simulationslauf berücksichtigt und die Ergebnisse wieder im GUI angezeigt. Dies ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Die Kennzahlen Stromverbrauch, Stromkosten und damit verbundener CO₂-Fußabdruck werden sowohl aggregiert als auch aufgeschlüsselt nach einzelnen Systemen und Sub-Systemen dargestellt.

Um die Wirkung von Energie-Einsparmaßnahmen auf die logistischen Zielgrößen wie Termintreue und Durchlaufzeiten quantifizieren zu können, wurde ebenfalls eine Materialflusssteuerung implementiert, die Energie als knappe Ressource berücksichtigt: Zeitweilig kann Energieverbrauch zur Vermeidung von Lastspitzen oder von Perioden mit hohem Energiepreis limitiert werden. Dies wird in Abbildung 5 veranschaulicht. Die Abbildung zeigt für eine exemplarische Woche die simulierten Energie-Verbräuche. Im oberen Teil ist der Verlauf ohne Berücksichtigung der Energie-Aspekte zu sehen, während im unteren Teil ein oberes Limit von 16 bis 19 Uhr beachtet wird. Operationen können in diesem Fall nur gestartet werden, wenn hierdurch das Limit nicht überschritten wird. Für die einzelnen Operationen ergeben sich so gegebenenfalls Wartezeiten, die sich wiederum in geänderten logistischen Zielgrößen niederschlagen.

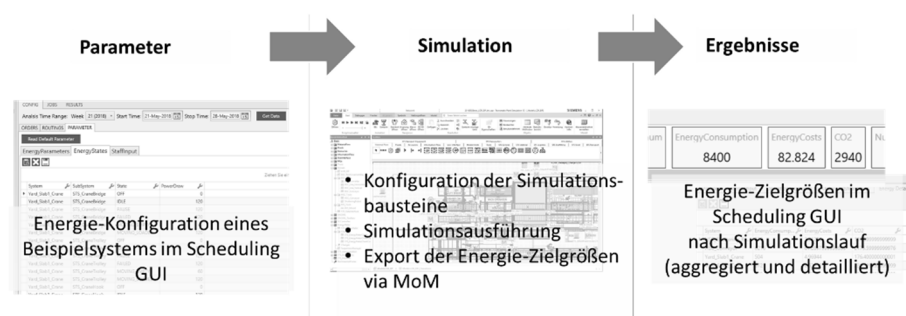


Abbildung 4: Energiebezogene Parameter und Ergebnisse im Scheduling GUI

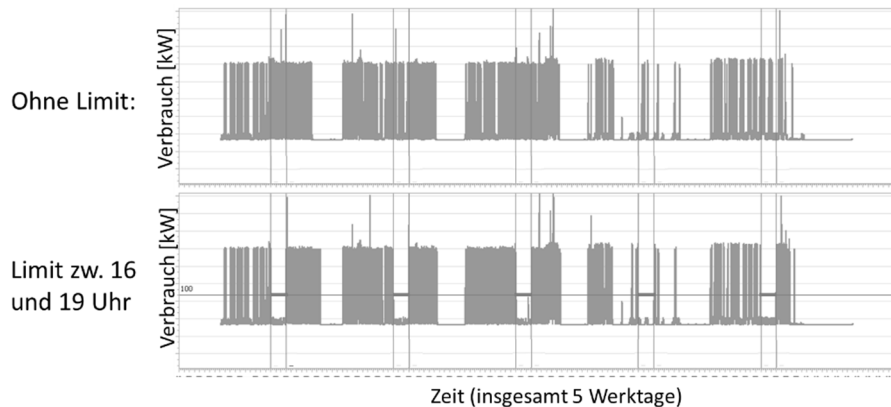


Abbildung 5: Simulierter Energieverbrauch [kW] mit und ohne Limits

3.4 Simulations-Integration in das Gesamtsystem

Die Modellierung der Fertigung verwendet Plant Simulation von Siemens PLM Software unter Nutzung der Simulationsbibliothek STS (Steinhauer et al. 2012). Die Simulationssoftware ist hierbei vollständig in das Gesamtsystem integriert, d.h. es gibt keine direkte Interaktion des Nutzers mit der Simulationssoftware.

Im Projekt kommunizieren die Komponenten der verschiedenen Partner über eine nachrichten-orientierte Middleware (englisch message-oriented middleware, MoM). Hierzu wird die Message-Broker-Software RabbitMQ genutzt. Dies ermöglicht die Integration der sehr heterogenen Software-Module der einzelnen Projekt-Partner in eine gemeinsame Software-Architektur.

Die Integration der Simulationssoftware in diese Gesamt-Architektur erfolgt mittels der von SimPlan entwickelten Software „SimController“. Dieser ist für die Kommunikation mit der MoM verantwortlich und startet nach Bedarf Plant Simulation, um Simulationsläufe durchzuführen. Der Gesamtprozess ist in Abbildung 6 veranschaulicht.

Die zahlreichen Input-Parameter wie auch die Ergebnisse der Simulation (siehe Abb. 2) werden im XML-Format ausgetauscht. Die interne Kommunikation zwischen Plant Simulation und SimController erfolgt über TCP/IP-Kommunikation.



Abbildung 6 Einbindung der Simulation in die Gesamtarchitektur

4 Fazit und Ausblick

Der Beitrag stellt ein System zur simulationsgestützten Produktionsplanung und -steuerung für eine Produktion von Betonfertigteilen aus dem Bereich der Bauindustrie vor. Das Simulationsmodell der komplexen Unikatfertigung bildet den Produktionsprozess detailliert ab und beinhaltet mehrere Produktionslinien mit sehr unterschiedlichen Fertigungsorganisationen. Personal und Fördertechnik (wie beispielsweise Kräne) sind ebenso abgebildet wie etwa nur begrenzt vorhandene Formen und Förderpaletten. Ein besonderer Aspekt wurde auch auf die Modellierung des Stromverbrauchs der Produktions- und Hilfsprozesse gelegt.

Im Ergebnis wird dem Produktionsplaner und -steuerer ermöglicht, eine detaillierte, quantitative Bewertung der Produktion unter Berücksichtigung einer Vielzahl an beschränkenden Faktoren zu erhalten. Dies erlaubt die Bewertung der aktuellen Produktionspläne, der Auswirkungen von Ausfällen und Störungen bis hin zu logistischen Auswirkungen, wenn einzelne Stromsparmaßnahmen implementiert werden.

Die Simulation stellt nur einen Teil der Gesamtlösung dar und ist vollständig in eine komplexe Software-Architektur integriert. Dies ermöglicht einerseits der Simulation jederzeit auf Echtzeit-Daten der Produktion zurückgreifen zu können und stellt den anderen System-Komponenten, wie der Optimierungs-Engine, umgekehrt auch immer die darauf beruhenden aktuellen Simulationsergebnisse zur Verfügung.

Im Laufe der Entwicklung zeigte sich klar die hohe Bedeutung von qualitativ hochwertigen Daten. Selbst wenn Daten in bestehenden Systemen grundsätzlich vorhanden sind, ist die Datenqualität oftmals nicht ausreichend. Gerade für einen operativen Einsatz von Simulation mussten auch im Projekt Maßnahmen zur Verbesserung der Datenqualität ergriffen werden, und dennoch ergaben sich für die Simulation zusätzliche Anforderungen, auch mit fehlerhaften Daten bis zu einem gewissen Grad robust umgehen zu können.

In zukünftigen Forschungsprojekten wird die Übertragung des Ansatzes auf andere Branchen verfolgt. Darüber hinaus ist für den Aspekt Energie eine Erweiterung für weitere genutzte Energieformen neben elektrischer Energie wünschenswert, um den Gesamtenergiebedarf noch genauer ermitteln zu können. Was die Kopplung mit der Optimierung angeht, erwies sich die Laufzeit des detaillierten Simulationsmodells (im einstelligen Minutenbereich) als beschränkender Faktor, um eine große Anzahl an Lösungsvarianten testen zu können. Entsprechend könnte hier ein Dekompositionsansatz mittels eines weniger detaillierten Modells oder eines abstrakten deterministischen Optimierungsmodells ähnlich zu dem in (Donhauser et al. 2018) und (Donhauser et al. 2018a) beschriebenen Vorgehen als Ergänzung des detaillierten Simulationsmodells sinnvoll sein.

Nicht zuletzt stellt das Thema der geeigneten Datenerhebung und -strukturierung ein nach wie vor nicht zufriedenstellend gelöstes Problem dar. Neben dem Aspekt der Verfügbarkeit von Daten in ausreichender Qualität bedarf es zukünftiger Arbeiten zu geeigneten Datenstrukturen und flexibler Werkzeuge zur Datenvorbereitung und Konvertierung. Hier gilt es der großen Flexibilität des simulationsgestützten PPS-Ansatzes gerecht werden zu können ohne durch ein sehr stringentes Datenmodell eingeschränkt zu sein, aber dennoch von Standardisierung von Formaten und Werkzeugen über Projekt- und idealerweise Simulations-Tool-Grenzen hinweg profitieren zu können.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden von der Europäischen Union als Forschungs- und Innovationsprojekt mit der Projektnummer 680515 unterstützt.

Literatur

- Donhauser, T., Ebersbach, T., Franke, J., Schuderer, P.: Rolling-reactive Optimization of Production Processes in a Calcium Silicate Masonry Unit Plant Using Online Simulation, *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 249-254, DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.266
- Donhauser, T.; Baier, L.; Ebersbach, T.; Franke, J.; Schuderer, P.: Simulationsbasierte Optimierung von Fabrikabläufen, *wt-online* (2018) 4, S. 221-227
- Jeon, S.M.; Kim, G.: A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC), *Production Planning & Control* 27 (2016) 5, S. 360-377, DOI: 10.1080/09537287.2015.1128010
- Law, A.: *Simulation Modeling and Analysis*, 5th edition. New York: McGraw-Hill 2015.
- Optimised Konsortium: Projekthomepage. <https://www.optimised-h2020.eu/>, Abrufdatum 11.05.2019
- Selmair, M., Herrmann, F., Claus, T., Teich, E.: Potentiale in der Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs einer Werkstattfertigung in der Maschinenbelegungsplanung. In: Rabe, Markus; Clausen, Uwe (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015* (2015), S. 177-186.
- Steinhauer, D.; Soyka, M.: Development and Application of Simulation Tools for One-of-a-Kind Production Processes, *Winter Simulation Conference (WSC)*, 2012, S. 1434-1440.
- Taylor, S.J.E.; Kiss, T.; Anagnostou, A.; Terstyanszky, G.; Kacsuk, P.; Costes, J.; Fantini, N.: The CloudSME simulation platform and its applications: A generic multi-cloud platform for developing and executing commercial cloud-based simulations. *Future Generation Computer Systems* 88 (2018), S. 524-539.
- Teufl, S., Owa, K., Steinhauer, D., Castro, E., Herries, G., John, R., Ratchev, S.: Optimised – developing a state of the art system for production planning for industry 4.0 in the construction industry using simulation-based optimisation. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 2018, S. 731-740.
- Xu, j.; Huang, E.; Hsieh, L.; Lee, L.H.; Jia, Q.; Chen C.: Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet, *Journal of Simulation*, 10 (2016) 4, S. 310-320, DOI: 10.1057/s41273-016-0037-6