

Systemische Fertigungsprozessmodellierung und -optimierung mit integrierter Simulation

Systemic manufacturing process modelling and optimization with integrated simulation

Volker Grienitz, Michael Hausicke, Stefan Görzel, Universität Siegen, Siegen
(Germany), volker.grienitz@uni-siegen.de, michael.hausicke@uni-siegen.de,
stefan.goerzel@uni-siegen.de

Abstract: GraFem is a functional and graphical oriented modelling method to analyse and describe manufacturing processes in a comprehensive way. One of the main targets is to reduce the complexity of a manufacturing process to a manageable degree. This is possible by focusing on a defined process target and its modelling. The presented paper gives a detailed overview to the systematic process modelling with “GraFem” and the possibility of improvement and optimization with integrated simulation. After a short introduction concerning the need and the complexity of simulation, a brief overview of existing (semi-)automated modelling methods is given. It is followed by an introduction in the functionally orientated modelling method GraFem and a detailed description of the integrated simulation with the help of an example. In conclusion, a summary and an outlook of future simulation potential are given.

1 Einleitung

In vielen Anwendungsbereichen von produzierenden Unternehmen hat sich die Materialflusssimulation zu einem etablierten Werkzeug zur Entscheidungsfindung und -unterstützung entwickelt (Acél 1996; Wenzel et al. 2008; Müller-Sommer und Straßburger 2010; März und Weigert 2011). In der Regel ist mit dem Einsatz einer Simulation allerdings ein erheblicher Aufwand verbunden (Müller-Sommer und Straßburger 2010). Allein die „Datenerfassung“ und „Modellgestaltung“ sind mit Abstand die beiden umfangreichsten Aufgabenschritte und machen zusammen über 50 % des gesamten Zeitaufwands aus (Kaul und Ulbrich 2008; Müller-Sommer und Straßburger 2010; Schumacher und Wenzel 2000). Ursache für den hohen Aufwand sind die zeitintensiven und komplexen Tätigkeiten dieser beiden Phasen.

Der Aufwand für die Datenerfassung wird sehr häufig unterschätzt. Dies ist oft darauf zurückzuführen, dass i.d.R. zwar viele Daten und Informationen vorliegen, diese aber nicht primär für die jeweilige Aufgabenstellung erhoben worden sind.

Das führt dazu, dass diese Daten in einem Prüfschritt auf ihre Verwendbarkeit hin untersucht werden müssen. Darüber hinaus müssen meist immer zusätzliche relevante Daten erhoben und vorhandene Datensätze erweitert werden (Wenzel et al. 2008).

Für den hohen Aufwand bei der „Modellgestaltung“ ist die zeitintensive Implementierung des realen Systems in die Simulationssoftware verantwortlich. Dabei erfordert die Erstellung des Simulationsmodells ein hohes Expertenwissen und stellt an den Modellierer hohe Anforderungen, da hier z.B. alle relevanten Systemeigenschaften herausgearbeitet werden müssen. Wird das Modell dabei zu detailliert beschrieben, so steigt der benötigte Zeitaufwand enorm an und das Modell wird zu umfangreich. Das heißt, dass der Detaillierungsgrad die Komplexität des Modells und den Aufwand bei der Modellgestaltung bestimmt (Kühn 2006; Wenzel 2000; Wenzel et al. 2008).

Um dem entgegen zu wirken, werden in der Wissenschaft seit einiger Zeit Ansätze erarbeitet, die Simulationen für jede Unternehmensgröße zugänglich machen. Diese sollen eine effizientere und leichtere Erstellung der Simulationsmodelle ermöglichen (Straßburger et al. 2010). Dieser Beitrag zeigt einen Ansatz, wie eine Simulationsstudie auf Basis einer GraFem-Modellierung teil- bzw. vollautomatisiert durchgeführt werden kann.

2 (Teil-)automatisierte Simulation

In der Elektrotechnik oder Informatik werden bereits einige Modellierungsmethoden beschrieben, die eine automatisierte bzw. teilautomatisierte Simulation von modellierten Modellen erlauben (Schönherr und Rose 2010). Dazu zählen unter anderem die Methoden UML (Unified Modelling Language) sowie Petri-Netze (Barbarisi und Vecchio 2005; Priebe und Wimmel 2008). In der Informatik ist die automatisierte Codegenerierung mit Hilfe dieser Methoden seit einiger Zeit verbreitet (vgl. Fowler 2003). Diese Ansätze sind aber in der Regel ungeeignet, um Fertigungssysteme umfassend, systematisch und funktional zu modellieren.

Aufbauend auf der Unified Modelling Language wurde von der Object Management Group die Systems Modelling Language (SysML) entwickelt und 2006 veröffentlicht. SysML legt den Fokus weniger auf die Softwareentwicklung, sondern ist für die Modellierung von allgemeinen technischen Systemen zuständig (Alt 2012). Diese Modelle lassen sich auch simulieren, allerdings stellt die abstrakte Sichtweise und die große Anzahl von Modellierungsmöglichkeiten für Ingenieure ein Hindernis für die effektive Anwendung von SysML dar (Schönherr und Rose 2010).

Aktuelle Forschungen zum Thema Simulation sind vor allem im Bereich der Modellierung und Datenbereitstellung für Simulationstools zu finden. Ein Beispiel ist das Core Manufacturing Simulation Data Information Model (CMSD), das darauf abzielt, die gleichen Datenstrukturen für die Simulation als auch für den realen Fertigungsablauf zu nutzen (Bergmann et al. 2010). Diese in dem Datenformat enthaltenen Daten, wie beispielsweise Layout- und strukturbezogene Informationen wie auch Systemlast- oder Steuerdaten, können beispielsweise in Plant Simulation verarbeitet werden. Ein weiteres Beispiel dafür ist das etwas ältere Simulation Data Exchange (SDX) Format, welches allerdings auf Layoutinformationen beschränkt

ist. Diese Informationen können mit simulationsrelevanten Parametern versehen werden. Das SDX-Format ist im Gegensatz zum CMSD proprietär, was einen Nachteil bzgl. der Weiterentwicklung darstellt (Straßburger et al. 2010).

3 Grafische Fertigungsmodellierung – GraFem

Die von Grienitz entwickelte grafische und funktional orientierte Modellierungsmethode „GraFem“ stellt ein Werkzeug zur Beschreibung von Produktions- und Fertigungssystemen dar. Sie wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Flusssysteme eines Wertschöpfungs-systems umfangreich analysieren zu können. Diese Flusssysteme betreffen nach Schenk und Wirth (2004) vor allem den Energie-, Informations- und Materialfluss. Diese werden zusammen mit den Wertschöpfungsverlusten in einer Grafik zusammengefasst (vgl. Abb. 1), um sie darauf aufbauend umfangreich mit Hilfe von Partialmodellen analysieren zu können (Grienitz und Hausicke 2012).

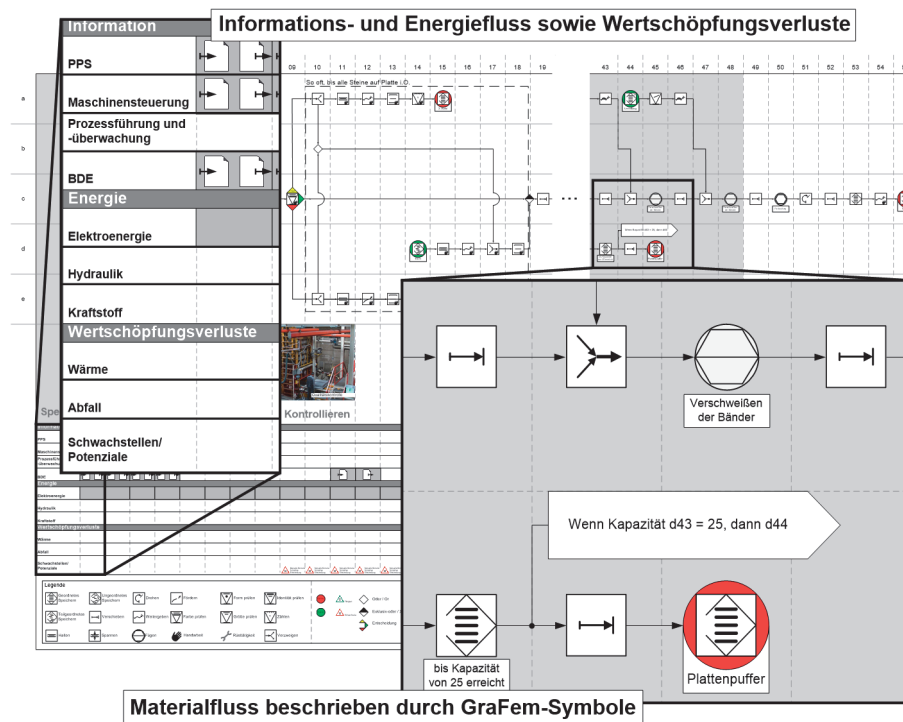


Abbildung 1: Ausschnitt der GraFem-Tapete zur Pflastersteinfertigung

GraFem basiert im Wesentlichen auf drei unterschiedlichen Ansätzen. Zum einen auf dem Ansatz von Košturiak und Gregor (1995), die Produktionssysteme mit der Hilfe von Teilsystemen und deren dynamischen-, stationären- sowie Schnittstellenelementen beschreiben. Der zweite Ansatz stellt die von Wirth (Schenk und Wirth 2004) aufgestellte Flusssystemtheorie dar. Sie unterstellt, dass sich alle Prozessfolgen innerhalb eines Produktionssystem bzw. einer Fabrik als Flüsse und

Flusssysteme aufgefasst werden können (Stoff-/Material-, Informations- oder Energiefluss). Ebenso lassen sich die zur Ausführung einer Prozessaufgabe erforderlichen Aufgaben zum Zweck der Beschreibung von Flüssen in die Grundfunktionen Transformieren, Speichern und Transportieren gliedern. Die VDI Richtlinie 2860 stellt als dritter Ansatz eine wesentliche Basis der Methode GraFem dar (Verein Deutscher Ingenieure 1990). Sie liefert klare Einordnungen, Abgrenzungen und Definitionen des Handhabens und seiner Teilfunktionen sowie die dazugehörigen Symbole, die zur Visualisierung verwendet werden. Diese können durch eigene Symbole ergänzt werden.

Mittels der Methode GraFem und der Vorgehensweise (vgl. Abb. 2) können Prozesse in einer für die Zielgruppe verständlichen Art und Weise visualisiert werden (vgl. Abb. 1). Somit kann ein ganzheitliches Verständnis über das Produktionssystem sowie dessen Schwachstellen und Potentiale erlangt werden.

Dafür wurden für die Methode GraFem sogenannte Partialmodelle entwickelt, die den Anwender bei einer nachhaltigen und erfolgreichen Modellierung sowie bei der Optimierung und Verbesserung von Produktions- bzw. Fertigungssystemen unterstützen sollen. Ein Beispiel stellt das Energiemodell dar, das auf die Art und Menge der verwendeten Energieform (beispielsweise elektrische Energie, Druckluft) eingeht. Weitere wichtige Partialmodelle stellen das Wertschöpfungsmodell, das die Potentiale und Schwachstellen der Prozesse herausstellt, sowie das Informationsmodell mit Details zur Betriebsdatenerfassung oder der Maschinensteuerung bzw. PPS dar.

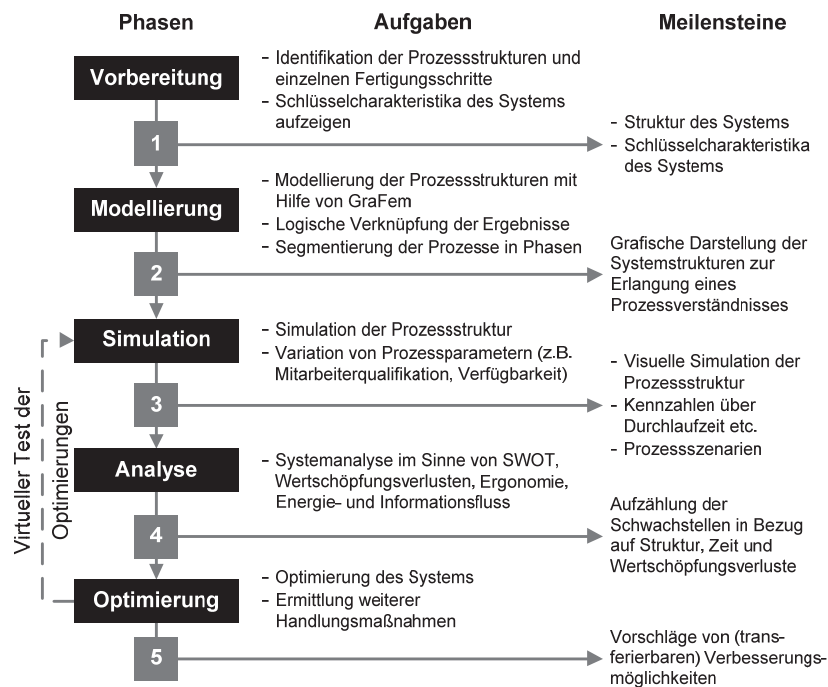


Abbildung 2: Erweitertes GraFem-Phasenmodell

Standardgemäß wird die Optimierung bzw. Visualisierung eines Fertigungsprozesses mit der Methode GraFem in vier Phasen durchgeführt (Grienitz et al. 2010). Die im Folgenden beschriebene Integration der Simulation führt zu einer Anpassung des GraFem-Phasenmodells. Dies erfolgt, indem die Phase der Simulation darin integriert wird (vgl. Abb. 2).

4 Simulation als Partialmodell

Die detaillierte Analyse eines Systems kann allerdings aufgrund seiner Vielzahl von Attributen und Abhängigkeiten schnell zu einem Verlust der Übersichtlichkeit und Anstieg der Komplexität führen (Dangelmaier 2003). Die iterative Analyse und der Vergleich verschiedener Varianten und Attributkonstellationen sind oftmals mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden.

Um dem entgegen zu kommen ist die Simulation als Partialmodell in GraFem integriert worden. Durch die Simulation wird die bisweilen qualitative Analyse mit Hilfe von beispielsweise Lean Methoden durch die quantitative Analyse z.B. in Form einer Materialflusssimulation oder der Berechnung der optimalen Losgrößen, Taktzeiten etc. erweitert. Das bedeutet, dass eine Verbesserung des Produktionssystems z.B. durch eine bessere Abstimmung der einzelnen Prozessschritte aufeinander erreicht werden kann. Die Integration fokussiert dabei nicht nur die Verbesserung, sondern ebenfalls die Planung von Produktionssystemen.

Daneben wird die Planung, Analyse und Optimierung durch die Bildung von Fertigungs-, Produktionssystem- oder Systemlastszenarien (Kühn 2006) vereinfacht. Die Fertigungssystemsznarien bieten dabei die Möglichkeit, den Einsatz alternativer Fertigungstechnologien und Produktionssystemsznarien die Anwendung unterschiedlicher Methoden (beispielsweise Einlagerungsstrategien) zu evaluieren. Durch die Systemlastszenarien kann das Systemverhalten durch unterschiedliche Auslastungsgrade (hoch, mittel und gering) geprüft werden.

Um eine effiziente und somit wirtschaftliche Integration der Simulation als Partialmodell zu erreichen, sollte der Aufwand für die Datenbeschaffung und Modellgenerierung reduziert werden. Der Ansatz der teil- bzw. vollautomatisierten Simulation bietet an dieser Stelle eine vielversprechende Lösung. Die Herausforderung dabei ist, auf Grundlage einer Datenbasis ein Simulationsmodell automatisiert zu erstellen und mit allen notwendigen Parametern zu konfigurieren. Darüber hinaus sollte ein gewisser Freiheitsgrad gegeben sein, um das entsprechende Simulationsmodell im Nachhinein ggf. manuell noch anpassen bzw. weiter detaillieren zu können.

Der Einsatz von GraFem mit Simulation erfolgt in fünf Phasen (vgl. Abb. 2). Diese werden im Folgenden anhand eines Beispiels aus einer trockenseitigen Pflastersteinfertigung erläutert. Das Beispiel betrifft die Entnahme der abgeordneten Pflastersteinlagen aus Hochregallager, das weitere Handling, die Palettierung durch einen Roboter, Verpackung sowie den Abtransport ins Ausgangslager. Die sog. „Frischseite“ (Fertigung vor dem Trocknungsprozess) ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

4.1 Phase 1 „Vorbereitung“

Zu Beginn des GraFem-Einsatzes erfolgt die Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes sowie des Ziels. In dem hier gewählten Anwendungsbeispiel lag der Fokus auf der technologischen Optimierung und Verbesserung der trockenheitigen Pflastersteinfertigung. Dies beinhaltete neben der Identifizierung alternativer Technologien auch die Reduzierung von Verschwendungen durch bspw. Stillstandszeiten. Um diese Ziele erreichen zu können, sind in dieser Phase die einzelnen Prozessschritte mit ihren Schlüsselcharakteristika zu identifizieren. Zu den Schlüsselcharakteristika zählen neben den benötigten Informationen und Energien auch die Kapazitäten, Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten. Zur Bestimmung dieser Informationen kommt das GraFem-Workshop-Set zum Einsatz. Als Ergebnis entsteht die Datenbasis für das Simulationsmodell sowie für die darauffolgende Erstellung der GraFem-Tapete.

In dem hier gewählten Anwendungsbeispiel wurden mittels des Workshop-Sets 89 einzelne Prozessschritte und 22 relevante Technologien in einer Expertenrunde identifiziert. Darüber hinaus wurden bereits erste Schwachstellen herausgearbeitet. Dazu zählten beispielsweise regelmäßige Produktionsstopps aufgrund des überfüllten Puffers, der die Holzplattenstapel lagert. Eine weitere Schwachstelle war eine auf den ersten Blick nicht notwendige Drehung des Roboterarms, um die Europaletten richtig in der Anlage zu positionieren.

4.2 Phase 2 „Modellierung“

Aufbauend auf der Sammlung aller notwendigen bzw. relevanten Daten wird in dieser Phase die GraFem-Tapete erzeugt. Sie ist eine visuelle Aufbereitung, bei der alle gewonnenen Daten in einer Grafik zusammengefasst werden (vgl. Abb. 1). Die Prozessstruktur wird mittels der GraFem-Symbole modelliert und anschließend logisch verknüpft. In der GraFem-Tapete sind die einzelnen Prozessschritte vergleichbar einem Schachbrett angeordnet. Durch eine solche Schachbrettstruktur wird eine eindeutige Zuordnung von Informationen auf den sogenannten Schwimmbahnen ermöglicht. Bei der Modellierung werden nach dem Ansatz von Wiendahl die wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Funktionen berücksichtigt, wobei letztere weiter in Supportfunktionen und Koordinationsfunktionen unterschieden werden. Die Supportfunktionen (bspw. Rüstvorgänge) sind für die Wertschöpfung von elementarer Bedeutung, wohingegen die Koordinationsfunktionen keinen direkten Bezug zur Wertschöpfung aufweisen (Lotter und Wiendahl 2006).

Zusätzlich zur Modellierung der Prozessstruktur erfolgt eine Segmentierung einzelner Prozessschritte zu Gruppen und ein Hinzufügen von Fotos, um Elemente des Produktionsprozesses zum besseren Verständnis veranschaulichen zu können. Neben der Abbildung der Prozessstruktur erfolgt eine Zuordnung relevanter Daten, wie beispielsweise des Zeitbedarfs, der Kapazität, des Informations- und Energieflusses sowie der Wertschöpfungsverluste in den Schwimmbahnen unterhalb der GraFem-Symbole. Die visuelle Aufbereitung erfolgt dabei unter Zuhilfenahme von Visualisierungs-Tools wie z.B. Microsoft® Visio® (Grienitz und Hausicke 2012).

4.3 Phase 3 „Simulation“

In dieser Phase geht es um die eigentliche Simulation des Prozesses bzw. des Materialflusses. Dabei kann zwischen der teilautomatisierten und der automatisierten Simulation unterschieden werden. Der Unterschied liegt darin, dass bei der automatisierten Simulation das Plant Simulation Referenzmodell alle anstehenden Aufgaben selbstständig abarbeitet. Das heißt, es importiert die Eingangsdaten, modelliert das Simulationsmodell, simuliert und überträgt die Ausgangsdaten. Der Anwender hat somit keine Möglichkeit in den Prozess einzugreifen. Bei der teilautomatisierten Simulation hingegen hat der Anwender die Möglichkeit nach jedem Schritt in den Simulationsprozess einzugreifen, um ggf. Anpassungen oder Detaillierungen vornehmen zu können.

Bis auf die Informations- und Energieschwimmbahnen sowie die integrierten Bilder besitzt das Simulationsmodell den Aufbau und das Aussehen wie die GraFem-Tapete. Die Simulationselemente weisen dazu dieselbe Symbolik der GraFem-Symbole auf und das Simulationsmodell besitzt die gleiche Schachbrettstruktur im Hintergrund wie die GraFem-Tapete. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anwender bei einer notwendigen Anpassung oder aber auch bei der Analyse eine direkte Verbindung zwischen Tapete und Simulationsmodell herstellen können.

In einer spezifischen Plant-Simulation-Klassenbibliothek sind die einzelnen GraFem-Symbole als Simulationselemente hinterlegt. Ein Fertigungsschritt (z.B. „Fügen“) kann durch alle erforderlichen Parameter, die für die Simulation des Fertigungsschrittes erforderlich sind, wie z.B. Bearbeitungs- oder Rüstzeit, konfiguriert werden. Während der Simulationsmodellerzeugung werden dann die einzelnen Simulationselemente aus der Klassenbibliothek heraus erzeugt, positioniert und mit den notwendigen Parametern aus der Datenbasis konfiguriert.

Sobald das Simulationsmodell erfolgreich erzeugt wurde, wird der Materialfluss darin simuliert. Währenddessen werden in spezifischen Tabellen Daten über das Systemverhalten gesammelt und am Ende zu Kennzahlen zusammengefasst. Zu diesen Daten zählen beispielsweise wie sich Pufferbestände über die Zeit entwickeln, welche Prozessschritte eine hohe Frequentierung besitzen oder welche Schritte große Wartezeiten aufweisen.

Am Ende der Simulation werden die Daten aus den Tabellen, die sog. Simulationsausgangsdaten, an die Datenbasis übermittelt und dort automatisch zu einem Bericht aufbereitet. Dieser enthält zusätzlich zu den statistischen Kennzahlen auch beispielsweise ABC-Analysen. Neben der GraFem-Tapete sind die Erkenntnisse aus der Simulation eine weitere Grundlage für die darauf aufbauende Analyse.

4.4 Phase 4 „Analyse“

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den vorhergegangenen Phasen wird die Analyse durchgeführt. Diese beinhaltet die qualitative sowie quantitative Analyse. In der qualitativen Analyse kommen neben Methoden des Lean Managements auch u.a. SWOT-Analysen zum Einsatz, um beispielsweise Schwachstellen in Bezug auf die Wertschöpfung, die Ergonomie oder die Flusssysteme zu identifizieren (Grienitz und Hausicke 2012). Als Grundlage dafür dient weitestgehend die erstellte GraFem-Tapete.

Die quantitative Analyse erfolgt auf Basis der Simulationsausgangsdaten. Dazu wird das System z.B. auf Wertschöpfungsverluste durch sog. „Bottlenecks“, überdimensionierte Lager bzw. Puffer oder nicht optimal ausgelegte Losgrößen untersucht. Das Ziel dieser Phase ist es, eine Grundlage für die Entwicklung effizienter Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten.

Für eine fundierte Analyse werden während der Simulation u.a. unterschiedliche Systemlastszenarien simuliert. Das heißt, die Simulationsläufe werden mit unterschiedlich großen Stückzahlen gefahren. Durch diese unterschiedlichen Belastungen des Simulationsmodells werden beispielsweise Schwachstellen in der Dimensionierung von Puffern und Lagern im Sinne von Kapazitätsanalysen, in der Abstimmung einzelner Prozessschritte aufeinander, in den Taktzeiten oder in der Losgrößenbestimmung aufgezeigt. Unterstützt werden diese Punkte durch mathematische Methoden, mit denen bspw. die optimale Losgröße, Anzahl der Kanban oder optimale Taktzeit berechnet werden kann. Neben diesen gibt es noch zahlreiche weitere Möglichkeiten, um die Simulationsergebnisse auszuwerten und zu analysieren (Vergleich hierzu u.a. (Fritz 2007; Kühn 2006; März et al. 2011)). Zur Abstimmung dieser Schwachstellen werden in der anschließenden Optimierungsphase Handlungsmaßnahmen herausgearbeitet.

Die Auswertung der Simulation der Pflastersteinfertigung zeigte, dass die anfänglichen Annahmen richtig waren. Je nach Produktionsprogramm entstanden Produktionsstopps aufgrund fehlender Kapazitäten im Puffer für die Holzplatten. Darüber hinaus bestätigte sie auch, dass je nach Produktionsprogramm ein Zeitverlust durch die Roboterarmdrehung entstanden ist, die für eine richtige Positionierung der Paletten notwendig war. Technologiseitig zeigte sich, dass durch den Einsatz des Roboters die Anlage bereits auf einem aktuellen Stand war. Durch Gespräche mit Experten der Anlagenbauer wurde allerdings ersichtlich, dass bereits Bestrebungen dahingehend laufen, die hydraulische Lösung der Steinlage von Holzplatten durch eine elektrische zu substituieren. Auch die zum Zeitpunkt des Projektes durchgeführte Qualitätsprüfung durch Menschenhand kann stellenweise durch eine kameragestützte Prüfung optimiert werden.

4.5 Phase 5 „Optimierung“

Auf Basis der Analyse werden in der letzten Phase Optimierungsmaßnahmen entwickelt. Durch die Realisierung dieser Maßnahmen, soll die Wettbewerbsfähigkeit erhöht werden, indem u.a. aktuelle und zukünftige Marktanforderungen befriedigt und Wertschöpfungsverluste reduziert werden.

Im Sinne der virtuellen Absicherung können die jeweiligen entwickelten Maßnahmen virtuell getestet werden, bevor diese in die Realität umgesetzt werden. Das Ganze erfolgt dabei im Rahmen eines PDCA (Plan, Do, Check, Act) Zyklus (Brunner und Wagner 2008). Das heißt, dass auf Basis der Analyse Optimierungen entwickelt (Plan) und anschließend durch die Simulation (Do) analysiert (Check) werden. Dazu müssen diese Optimierungen in das Simulationsmodell überführt werden. Dies erfolgt indem sie in Form von veränderten Parametern in die Datenbasis eingepflegt werden. Beispiele für diese Veränderungen wären die Ergebnisse der mathematischen Analyse, wie die optimale Losgröße, die berechnete Anzahl der Kanban etc. Im Falle von zufriedenstellenden Ergebnissen können die Optimierungen am System in die Realität umgesetzt werden (Act). Sollte sich

während der Überprüfung herausstellen, dass die Optimierungsmaßnahmen keinen Nutzen für das reale System bringen, können diese sogleich verworfen werden.

Um den identifizierten Produktionsstopps in der Pflastersteinfertigung zu begegnen, reichte bereits die Entfernung von zwei Einheiten an Holzplatten (2 x 16 Stück) aus dem Puffer. Dies führte dazu, dass die Anlage ungehindert weiter produzieren kann, ohne darauf warten zu müssen, dass die nassseitige Pflastersteinfertigung eine Einheit Holzplatten aus dem Puffer entnimmt. Zur Beseitigung der unnötigen Roboterarmdrehung reichte bereits eine 90°-Drehung des Palettenmagazins. Neben diesen wurden weitere kleine Optimierungen vorgenommen wie beispielsweise die Anpassung der Taktzeiten oder die Verpackung des Steinpaketes.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration der Simulation als Partialmodell stellt eine wesentliche Weiterentwicklung von GraFem dar. Die Möglichkeit, dadurch Produktionssysteme nicht nur auf qualitative (z.B. Lean Methoden) sondern auch auf quantitative (z.B. Simulationen) Weise analysieren zu können, führt zu einem tiefgreifenden Prozessverständnis. Im Sinne der Digitalen Fabrik ermöglicht der vorgestellte Ansatz einerseits die Planung und andererseits die Optimierung von Produktionssystemen. Durch die digitalen Modelle wird beispielsweise eine frühzeitige virtuelle Absicherung von Planungsergebnissen sichergestellt und der Prozess der iterativen Erstellung und Bewertung verschiedener Prozessszenarien vereinfacht.

Die zukünftige Forschung fokussiert u.a. die Umsetzung zusätzlicher Funktionen und Analyse-Methoden im Referenzmodell der Simulation. Des Weiteren wird die stärkere Verzahnung aller Partialmodelle mit dem Partialmodell Simulation verfolgt.

Literatur

- Acél, P.-P.: Simulieren geht über Probieren – aber nicht ohne studieren! In: Betriebswissenschaft und Innovation, BWI ETH: Zürich 1996.
- Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Hanser: München 2012.
- Barbarisi, O.; Vecchio, C. d.: UML Simulation Model for Hybrid Manufacturing Systems. In: Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation. Limassol, Cyprus, June 27-29, 2005, S. 358-363.
- Bergmann, S.; Fiedler, A.; Straßburger, S.: Generierung und Integration von Simulationsmodellen unter Verwendung des Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Information Model. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 461-468.
- Brunner, F. J.; Wagner, Karl W.: Qualitätsmanagement – Leitfaden für Studium und Praxis. Hanser: München 2008.
- Dangelmaier, W.: Produktion und Information: System und Modell. Springer: München 2003.
- Fowler, M.: UML konzentriert: Eine kompakte Einführung in die Standardobjektmodellierungssprache. Heidelberg: Pearson Education 2003.
- Fritz, J.: Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik. Saarbrücken: Dissertation, Universität des Saarlandes 2007.

- Grienitz, V.; Baldus, S.; Schmidt, A.-M: Funktionale Modellierung für Produktionssysteme. Optimierung von Produktionssystemen mit Hilfe der Methode GraFem. In: ZWF – Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 105, Heftnummer 11, 2010, S. 984-990.
- Grienitz, V.; Hausicke, M.: Development of Process Innovations with „GraFem“. In: Lang, R.; Müller, E. (Hrsg.): Proceedings. Methods, strategy, cooperation; Chemnitz, Germany, 29-30 March 2012, S. 142-155.
- Kaul, R.; Ulbrich, A.: 17. Deutscher Materialfluss-Kongress: Workshop Ablaufsimulation – Digitale Systemoptimierung. Garching 2008.
- Košturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Berlin, Heidelberg: Springer 1995.
- Kühn, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Hanser: München 2006.
- Lotter, B.; Wiendahl, H.P.: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Springer: Berlin 2006.
- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Springer: Berlin 2011.
- März, L.; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Springer: Berlin 2011, S. 3-12.
- Müller-Sommer, H.; Straßburger, S.: Methoden zur Plausibilisierung von Eingangsdaten für Belieferungssimulationen in Logistik-Planungssystemen der Digitalen Fabrik. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 61-68.
- Priese, L.; Wimmel, H.: Petri-Netze. 2. Auflage, Berlin, Springer, 2008.
- Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 37-44.
- Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer 2004.
- Schönherr, O.; Rose, O.: Modellierung mit SysML zur Abbildung von Produktionsprozessen. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 453-460.
- Schumacher, R.; Wenzel, S.: Der Modellbildungsprozeß in der Simulation. In: Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Society for Computer Simulation 2000, S. 5-11.
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI Richtlinie 2860 Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.
- Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. SCS-Europe BVBA: Ghent, Belgien 2000.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Springer: Heidelberg 2008.