

Simulationsgestützte Feinplanung im Produktionsumfeld – vom SAP zur SPS

Simulation-Based Dispatching in a Production System – from SAP to PLC

Norbert Höppe, Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik, Obernburg (Germany),
n.hoepp@reisrobotics.de

Florian Seeanner, SimPlan Systems GmbH, Maintal (Germany),
florian.seeanner@SimPlan.de

Sven Spieckermann, SimPlan AG, Maintal (Germany),
sven.spieckermann@SimPlan.de

Abstract: This paper is focused on a case study on system design, system operation, and simulation of a complex flexible welding cell. After an explanation of the material handling operations in the cell, it is demonstrated how the results of a discrete-event simulation study during system design, supported the decision on the implementation of a simulation-based manufacturing execution system (MES). The usage of the MES by the dispatchers of the real-world manufacturing system, the role of simulation during daily system operation, and technical details such as the interfaces with the SAP ERP and the PLC are described.

1 Einleitung

Der Einsatz von Simulation begleitend zum Betrieb eines Produktions- und Logistiksystems ist eine schon vor vielen Jahren beschriebene Möglichkeit, Simulation zu nutzen (vgl. etwa Noche und Scholtissek 1993 sowie Wenzel und Meyer 1993). Auch die VDI-Richtlinie 3633 (VDI 2007) beschreibt neben Anwendungsfällen in der Planungs- und Realisierungsphase einige Beispiele für den Simulationseinsatz in der Betriebsphase. Tatsächlich dominiert in der Praxis der Simulationseinsatz im Rahmen der Planungsphase von Produktions- und Logistiksystemen deutlich. Danach folgt die Verwendung von Simulation zur Unterstützung der Inbetriebnahmephase und erst dann Anwendungen im operativen Betrieb. Diese Erfahrungen belegen auch die in den Literaturübersichten z. B. von Jahangirian et al. (2010) und von Smith (2003) zusammengefassten Arbeiten.

Im vorliegenden Artikel wird eine Simulationsanwendung beschrieben, die im Rahmen der operativen Steuerung einer Laserschweißanlage zum Einsatz kommt, wobei das folgende Kapitel zunächst einen Überblick über den Aufbau der Anlage

und die Fertigungsabläufe gibt und dann das operative Auftragseinplanungsproblem skizziert. Kapitel 3 enthält eine kurze Einordnung in vergleichbare Aufgabenstellungen. Das vierte Kapitel geht auf die Simulation in der Phase der Anlagenplanung ein, aus der sich die Idee und Notwendigkeit einer simulationsbasierten Feinplanungslösung ergeben hat. Diese Lösung wird dann im fünften Kapitel inhaltlich und technisch erläutert. Das sechste und letzte Kapitel fasst die bisherigen Erfahrungen mit den Planungsläufen zusammen.

2 Problemstellung

Die betrachtete Anlage besitzt vier parallele Bearbeitungsplätze, zwei Schweißkabinen, ein automatisches Transportsystem, einen Warenträgerspeicher für bis zu elf leere Warenträger sowie einen Platz zur Ein- und Ausschleusung von Warenträgern. Die Warenträger (WT) werden zwischen den Arbeitsplätzen und den Schweißkabinen durch einen als „Shuttle“ bezeichneten Querverteilwagen transportiert. Der Shuttle hat zwei Aufnahmeplätze für WT. Auf den WT sind Vorrichtungen installiert, und in diese Vorrichtungen werden Blechteile eingelegt und zu Gehäusen zusammenschweißt. Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Layout der Anlage.

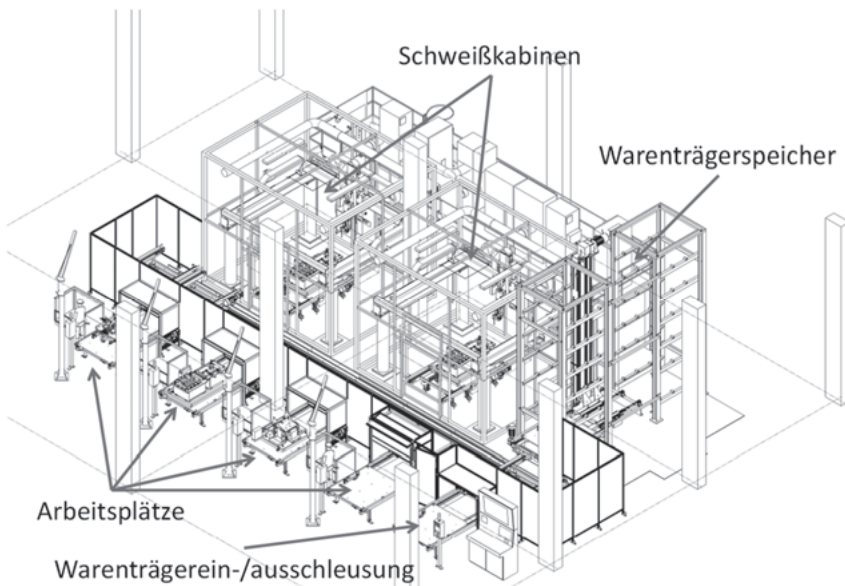


Abbildung 1: 3D-Layout der Laserschweißanlage

Auf den meisten WT befindet sich exakt eine Vorrichtung. Es gibt jedoch auch WT auf denen mehrere Vorrichtungen gleichzeitig montiert sind. Auf letzteren können mehrere, sogenannte Kleinteile simultan gefertigt werden. Die Zuordnung von Vorrichtungen zu WT ist prinzipiell fix, dennoch können die Vorrichtungen grundsätzlich umgerüstet werden. Eine solche Umrüstung erfolgt außerhalb der Anlage und die WT müssen dazu aus- und wieder eingeschleust werden. Zudem

existieren identische Vorrichtungen, die parallel eingesetzt werden und dasselbe Teilespektrum fertigen können.

Ein Fertigungsauftrag, der in der Regel ein Los von gleichartigen Produkten umfasst (Losgröße > 1), wird immer vollständig an einem der vier Arbeitsplätze bearbeitet, da hierzu die vorbereiteten Blechteile, z. B. per Stapler, an den entsprechenden Platz gebracht werden müssen. Ein Arbeiter setzt die Blechteile in die Vorrichtung (bei Kleinteilen ggf. in die Vorrichtungen) auf dem WT ein. Sobald dies geschehen ist, signalisiert der Arbeiter der Anlage durch Tastendruck auf einem Bedienpult am Arbeitsplatz, dass geschweißt werden kann. Der Shuttle holt daraufhin den WT ab und fährt ihn in eine freie Schweißkabine. Die beiden Schweißkabinen sind gleich ausgestattet und können alle Warenträger aufnehmen. Da allerdings immer nur in einer Kabine zur gleichen Zeit geschweißt wird (da es nur einen Laser gibt, der über Spiegeltechnik umgeleitet wird), erfüllt die zweite Kabine primär eine Pufferfunktion zur schnelleren WT-Bereitstellung. Die Steuerungslogik, wann ein WT abgeholt und in welcher Kabine er gebraucht wird, ist Teil der Anlagen-SPS. Nachdem ein Auftrag geschweißt wurde, holt der Shuttle den WT wieder ab und bringt ihn zum Ausgangsarbeitsplatz zurück. Abhängig vom zu fertigenden Auftrag ist es nun möglich, dass weitere Blechteile eingelegt werden oder dass das gesamte Gehäuse durch den Arbeiter in der Vorrichtung gedreht wird und der WT anschließend erneut in einer Schweißkabine bearbeitet wird.

Die Entscheidung darüber, welche Aufträge in die Schweißanlage eingesteuert werden sollen, liegt bei der Arbeitsvorbereitung. Die Bereitstellung der Fertigungsaufträge erfolgt im SAP ERP. Im PP-Modul des SAP-Systems werden mit Hilfe der Durchlaufterminierung Eckstart- und Eckendtermine berechnet, die als früheste Start- und späteste Endtermine bei der Einplanung berücksichtigt werden müssen (vgl. für einen einführenden Überblick zum SAP ERP Dickersbach und Keller 2010). Der jeweils verantwortliche Arbeitsvorbereiter legt anhand des Arbeitsinhalts der Fertigungsaufträge und des aktuellen Zustands der Anlage fest, welche offenen Aufträge als nächstes bearbeitet werden sollen. Dabei dürfen nur Aufträge eingeplant werden, wenn sich mindestens eine dazugehörige Vorrichtung auf einem WT im System befindet. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Anlage nicht auf die Umrüstung eines WT auf eine andere Vorrichtung warten muss.

Der Arbeitsvorbereiter versucht eine Anlagenbelegung für die gewählten Aufträge zu finden, bei der die Gesamtdauer (Zykluszeit) zur Fertigung der Aufträge möglichst minimal ist. Damit soll auch gleichzeitig das komplementäre Ziel der maximalen Laserauslastung erreicht werden, da der Schweißblaser die teuerste Komponente der Anlage darstellt. Eine wichtige Restriktion ist hierbei, dass für alle Aufträge die frühesten Start- und Endtermine eingehalten werden.

Die Anzahl der zulässigen Lösungen, die dem Arbeitsvorbereiter prinzipiell zur Verfügung stehen, ist sehr hoch. Es werden ca. 90 Sachnummern, 30 Vorrichtungen und 15 Warenträger betrachtet. Einige der Vorrichtungen sind identisch, so dass bestimmte Sachnummern auf verschiedenen WT gefertigt werden können. Ferner ist es möglich, dass die WT auf verschiedene Arbeitsplätze gefahren werden, wobei hier (wie oben erläutert) nicht alle Zuordnungen von Sachnummern zu Arbeitsplätzen erlaubt sind. Des Weiteren müssen Aufträge für Kleinteile zusammengefasst werden, da für jedes Kleinteil in SAP eigene Fertigungsaufträge

angelegt werden, diese jedoch gleichzeitig auf einem WT gefertigt werden können und sollen.

Zusätzlich können Sperrungen für einzelne WT, für einzelne Vorrichtungen, für eine der beiden Schweißkabinen und für ausgewählte Arbeitsplätze vorliegen (aufgrund von Störungen an der Ausrüstung, erforderlicher Wartung oder fehlender Teile). Die gesperrten Ressourcen dürfen dann bei der Belegungsplanung nicht berücksichtigt werden. Neben den Sperrungen sind natürlich die Schichtzeiten und das verfügbare Personal weitere limitierende Faktoren.

3 Stand der Technik

Sowohl für die Simulation von Anlagentechnik, wie im vorliegenden Beispiel, als auch für den Einsatz von Feinplanungsapplikationen zur Unterstützung der Ermittlung von Auftragsreihenfolgen finden sich zahlreiche Beispiele in der Literatur. Chan und Chan (2004) beschreiben mehr als 120 Studien, die sich mit der Steuerung von Aufträgen und Ressourcen in flexiblen Fertigungssystemen unter Verwendung von Simulation befassen. Dabei geben sie Definitionen von flexiblen Fertigungssystemen an, die so gefasst sind, dass sich das in Kapitel 2 beschriebene System in diese Kategorie einreicht. Gemäß diesen Definitionen sind flexible Fertigungssysteme Anlagen, in denen automatische Arbeitsstationen und manuelle Arbeitsplätze durch ein (teil-)automatisiertes Transportsystem miteinander verbunden sind.

Smith (2003) geht auf eine Reihe von Beispielen sowohl für den Einsatz von Simulation im Rahmen der Planung von flexiblen Fertigungssystemen („Flexible Manufacturing System Design“) als auch im Betrieb der Systeme („Manufacturing Systems Operation“) ein, wobei im letzteren Fall die Anzahl der Beispiele deutlich kleiner ist als im ersten Fall.

Werden die Feinplanungsapplikationen zur Steuerung flexibler Fertigungssysteme aus ablauforganisatorischer Sicht dem Scheduling und technisch den MES (Manufacturing Execution Systems) als einer Systemebene zwischen den unternehmensweiten Produktionsplanungs- und steuerungssystemen und der Anlagenebene zugeordnet, dann findet sich eine schier unerschöpfliche Fülle von Literatur wie der Blick in Lehrbücher (Pinedo 2012) oder jüngere Überblicksartikel (Quelhadj und Petrovic 2009, Framinan und Ruiz 2010, Saenz de Ugarte et al. 2010) zeigt. Die dort enthaltenen Beispiele weisen teilweise ganz ähnliche Merkmale auf wie die Feinplanungsapplikation, die in Kapitel 5 näher beschrieben wird.

Diese kurze Einordnung macht deutlich, dass die in diesem Artikel präsentierte Anwendung im wissenschaftlichen Sinne nicht neu ist. Allerdings ist die gemeinsame Anwendung von diskreter-ereignisorientierter Simulation innerhalb eines umfassenden Planungssystems oder innerhalb eines MES in der praktischen Anwendung immer noch eher die Ausnahme. Sauer (2010) sieht in der Unterstützung von MES durch Simulation einen zukünftigen Trend. Und Framinan und Ruiz (2010) weisen auf die andauernde Diskussion über die Lücke zwischen theoretischen Konzepten und der Umsetzung in konkrete Anwendungen hin. In dieser Hinsicht versteht sich der vorliegende Fall als ein Praxisbeispiel, in dem Simulationsanwendung in der Planung und im operativen Betrieb mit algorithmischen Ansätzen aus dem Scheduling und Applikationskonzepten aus dem Umfeld von MES zusammengeführt werden.

4 Simulation in der Anlagenplanung

Aufgrund der Ablaufkomplexität, die sich aus der unterschiedlichen Bestückung der Warenträger, den variantenabhängigen Bearbeitungszeiten, der Mehrmaschinenbedienung durch Werker und den stochastischen Ausfallzeiten der Schweißkabinen ergibt, wurde in der Planungsphase der Anlage die Ausbringung mit Hilfe von Simulation abgesichert. Zentrale Zielgröße war dabei die Auslastung der Schweißkabinen, die in Abhängigkeit von der Mitarbeiteranzahl und in Abhängigkeit von der Auftragsreihenfolge betrachtet wurde.

Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang von Mitarbeiteranzahl und Auslastung der Schweißkabinen, wobei auch mit der Art der Zuordnung der Mitarbeiter zu den Arbeitsplätzen experimentiert wurde. In der Variante „keine AP Zuordnung“ kann jeder Mitarbeiter Tätigkeiten an jedem der Arbeitsplätze ausführen, an denen gerade ein WT steht. Demgegenüber darf bei der Variante „feste AP Zuordnung“ jeder Mitarbeiter nur an einer definierten Teilmenge der Arbeitsplätze tätig werden.

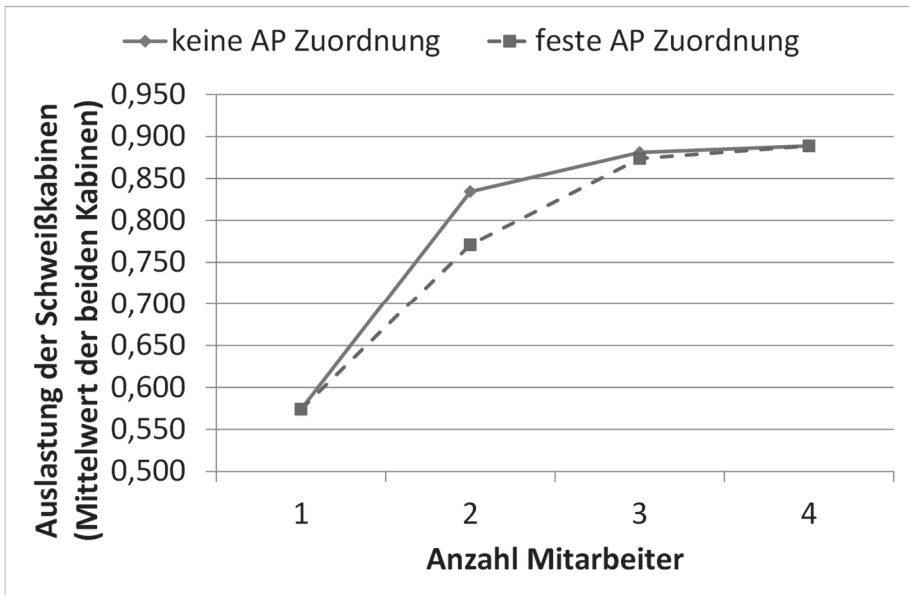


Abbildung 2: Abhängigkeit der Auslastung der Schweißkabinen von der Mitarbeiteranzahl

Die Analyse des Einflusses der Auftragsreihenfolge erfolgt mit Hilfe eines gegebenen Auftragspools. Für die Aufträge in diesem Pool wurden zufällig 500 unterschiedliche Reihenfolgen (Permutationen) gebildet und in das Simulationsmodell eingesteuert. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Simulationsläufe bei drei Mitarbeitern ohne feste Arbeitsplatzzuordnung in der Anlage. Für jede Permutation wurden fünf Replikationen durchgeführt; dargestellt ist jeweils der Mittelwert der Anlagenauslastungen gebildet über diese fünf Replikationen. Es ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite erheblich ist. Selbst ohne Berücksichtigung der hinsichtlich der Auslastung besten und schlechtesten

Reihenfolgen ergibt sich eine Schwankungsbreite in der Auslastung von rund zehn Prozentpunkten. Vergleichbare Untersuchungen mit einem, zwei oder vier Mitarbeitern haben zu ganz ähnlichen Ergebnissen geführt.

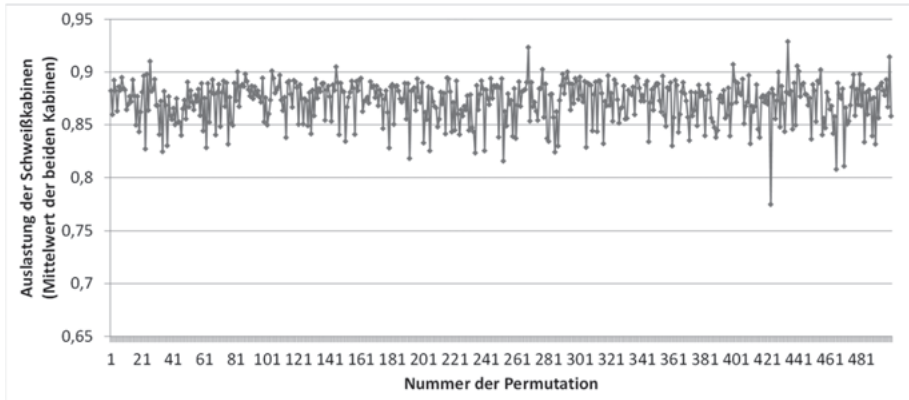


Abbildung 3: *Abhängigkeit der Auslastung der Schweißkabinen von der Auftragsreihenfolge*

Selbst wenn unterstellt wird, dass eine manuelle Arbeitsvorbereitung zu durchschnittlich besseren Ergebnissen kommen wird als der Zufall, machen diese Simulationsläufe die starke Abhängigkeit der Anlagenauslastung von der Auftragseinplanung deutlich. Das hat die Entscheidung bestärkt, in der realen Anlage ein Feinplanungswerkzeug zu implementieren, mit dessen Hilfe automatisiert Pläne zur Anlagenbelegung erzeugt und (simulativ) bewertet werden können.

5 Simulation als Bestandteil eines operativen Steuerungssystems

Das erstellte Feinplanungswerkzeug ist eine rollenbasierte Java-Webapplikation, die grundsätzlich von allen browserfähigen PCs im Intranet des Schweißanlagenbetreibers bedient werden kann. Die Applikation besteht aus einer Reihe von Komponenten, die in Abbildung 4 im Überblick dargestellt sind. Neben einer Schnittstelle zum SAP ERP und zum OPC Server der Schweißanlage enthält die Webapplikation eine Optimierungs- und Simulationskomponente, wobei die Simulationskomponente im Kern aus dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Simulationsmodell besteht. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden bei der Beschreibung des Planungsablaufs erläutert.

Der grundsätzliche Ablauf zur Erstellung von Anlagenbelegungen ist in vier Hauptschritte unterteilt:

1. Der Arbeitsvorbereiter importiert Fertigungsaufträge mitsamt der in SAP verfügbaren Statusinformation in das Feinplanungswerkzeug. Die Kommunikation mit SAP erfolgt über Remote Function Calls (RFC), der Standardschnittstelle des ERP-Systems. Im Einzelnen wird zum Auslesen der Aufträge ein RFC-Funktionsbaustein verwendet. Dieser Baustein gibt eine Liste aller freigegebenen

Aufträge zurück, für die noch keinerlei Quittierungen im SAP ERP vorliegen. Die Liste umfasst neben der Auftrags-, Vorgangs- und Sachnummer auch eine Losgröße, ein Prioritätskennzeichen sowie den Eckstart- und Eckendtermin. Für die Quittierung werden (am Ende der Bearbeitung) über einen weiteren RFC-Funktionsbaustein die aktuell bearbeitete Auftragsnummer und die bearbeitete Sachnummer, der Status (IO, NIO) sowie ein Zeitstempel an das ERP-System übertragen. Aus den offenen Aufträgen wird vom Arbeitsvorbereiter eine Teilmenge einzuplanender Aufträge bestimmt. Diese Auswahlmöglichkeit war explizit gewünscht, um den Arbeitsvorbereiter die volle Freiheit zu lassen, welche Aufträge bearbeitet werden sollen. Wählt er nur einen einzelnen Auftrag aus, kann er somit explizit bestimmen, wo dieser gefertigt werden soll. Wählt er alle offenen Aufträge aus, liegt die Entscheidung fast vollständig bei der Optimierungs- und Simulationskomponente.

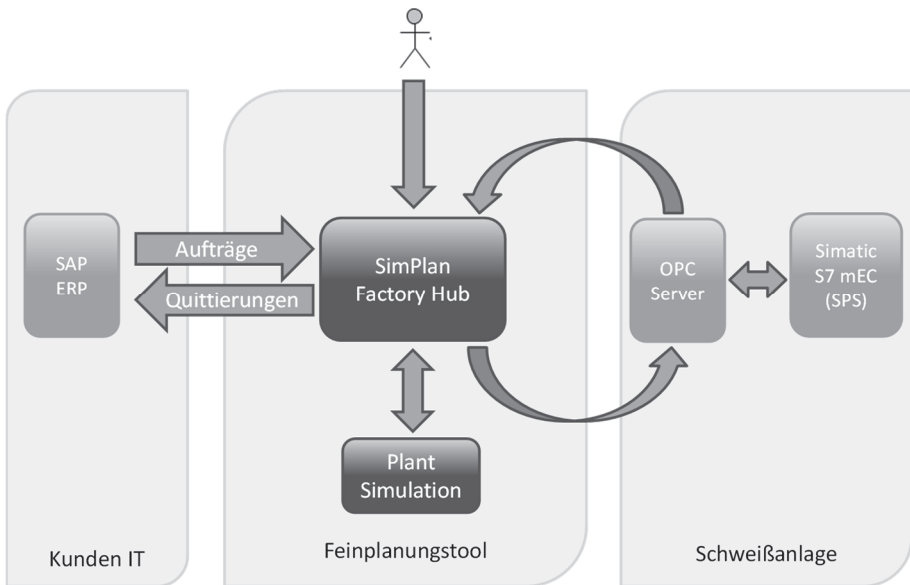


Abbildung 4: Systemarchitektur des Feinplanungswerkzeugs

2. Im nächsten Schritt stellt der Arbeitsvorbereiter die Anzahl verfügbarer Mitarbeiter und die aktuellen Schichtpläne ein, sperrt – falls erforderlich – einzelne Ressourcen wie Warenträger oder Maschinen und kann auf diese Weise eine Reihe sogenannter Planungsszenarien definieren. Das führende Anlagensystem (SPS) bestimmt, welche Einheiten (Arbeitsstationen, Schweißkabinen, WT und Vorrichtungen) grundsätzlich verfügbar sind. Bei der Erstellung eines Planungsszenarios können nur verfügbare Einheiten zusätzlich ausgewählt werden. Es können jedoch keine Einheiten wieder aktiviert werden, die gemäß Daten der SPS in der Anlage nicht verfügbar sind.
3. Im dritten Schritt werden für die Planungsszenarien Produktionspläne erzeugt und bewertet. In der Regel werden vier bis acht verschiedene Pläne erstellt. In den ersten vier Plänen sind typischerweise Früh- und Spätschicht aktiv, und der

Arbeitsvorbereiter variiert die Anzahl der Mitarbeiter. Lassen sich die zu bearbeitenden Aufträge mit vier Mitarbeitern in zwei Schichten nicht bearbeiten, können Pläne unter Aktivierung der Nachtschicht (wiederum mit variabler Mitarbeiterzahl) erzeugt werden. Grundsätzlich kann der Arbeitsvorbereiter natürlich auch noch zusätzliche Parameter variabilisieren und sich auf diese Weise weitere Pläne berechnen lassen. Aufgrund der algorithmischen Komplexität kommen zur Ermittlung der Produktionspläne prioritätsregelbasierte Heuristiken zum Einsatz. Die erzeugten Pläne werden an das Simulationsmodell der Anlage übergeben. Da die Steuerungslogik der SPS nahezu vollständig im Simulationsmodell abgebildet ist, können Details zur Auslastung der Maschinen, zu den Wegen und Auslastungen der Werker, zu Auftragsdurchlaufzeiten und zu weiteren Kennzahlen kalkuliert werden. Diese Auftragsdurchlaufzeiten dienen nachgelagert auch als Sollzeiten für den Soll-/Ist-Vergleich.

4. Nach heuristischer Berechnung und simulativer Bewertung werden die Ergebnisse dem Arbeitsvorbereiter tabellarisch und in Form von konfigurierbaren Grafiken visualisiert. Auf dieser Basis kann dann der gewünschte Produktionsplan ausgewählt und schließlich über eine Schnittstelle an die Anlagensteuerung überspielt werden. Die Kommunikation mit der SPS erfolgt über das sogenannte Distributed Component Object Model (DCOM) mit dem Siemens OPC-Server, der auf der Siemens SPS (Simatic S7) läuft (vgl. Mahnke et al. 2009). Hierbei werden die Daten immer paarweise in der Form <Adresse, Nutzdatum> gesendet und empfangen, wobei die Adresse eine eindeutige Zeichenkette darstellt und das Nutzdatum einem Basisdatentyp (Ganzzahl, Kommazahl etc.) entsprechen muss. Für die Steuerung des Shuttles müssen Fahraufträge generiert werden. Neben der entsprechenden WT-Nummer beinhalten diese Fahraufträge die Bewegung von Schweißkabine zum Arbeitsplatz und umgekehrt sowie die Ein- und Auslager-Prozesse leerer WT im Speicherturm. Zu jeder Vorrichtungsnummer muss zudem eingetragen sein, welche Sachnummer sich darauf befindet, sodass der Schweißroboter weiß, was zu fertigen ist. Die Übertragung von Auftragsdaten an die SPS stellt sich dann beispielsweise dar, wie in Tabelle 1 gezeigt. Jede Zeile der Tabelle repräsentiert dabei ein Tupel der oben angegebenen Form <Adresse, Nutzdatum>. Sobald der erste Fahrauftrag zur Anlage überspielt wurde, kann mit der Produktion begonnen werden.

Tabelle 1: Beispiel für die Datenübertragung zwischen MES und SPS

Adresse	Nutzdatum
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Auftragsnummer	SAP_001
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Warentraeger	WT_05
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Vorrichtung01.Name_Vorrichtung	VT_07
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Vorrichtung01.Sachnummer	MAT_013
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Vorrichtung01.Stueckzahl_soll	1

Die Feinplanungssoftware überwacht kontinuierlich den Produktionsfortschritt. Für jedes Teil, das geschweißt wurde, erfolgt eine Gutmeldung an das SAP ERP. Es ist jedoch möglich, dass Teile eines Fertigungsauftrages in der Anlage übersprungen werden, weil z. B. nicht genügend Bleche an den Arbeitsplätzen bereitgestellt sind.

In diesem Fall meldet das System das Teil als Nicht-in-Ordnung (NIO). Die Bearbeitung muss dann zu einem späteren Zeitpunkt komplettiert werden. Grundsätzlich wird der komplette Produktionsfortschritt in der Datenbank persistiert, sodass verschiedene Auswertungen (z. B. Soll-/Ist-Vergleiche oder tatsächliche Durchlaufzeiten) durchgeführt werden können.

6 Zusammenfassung der Erfahrungen mit der Feinplanungslösung

Zunächst einmal ist festzuhalten, dass die Gesamtanlage ohne eine Softwarekomponente, die Aufträge aus dem SAP ERP „abholt“, anschließend eine Auswahl unter diesen Aufträgen unterstützt und schließlich freigegebene Aufträge in einzelne Fahraufträge umwandelt, die von der SPS verarbeitet werden können, nicht funktionieren würde.

Es hat sich gezeigt, dass der eigentliche Feinplanungsschritt, die mit Hilfe von Optimierung und Simulation erfolgende Auswahl und Bewertung von Aufträgen, auch bei einer solch vergleichsweise kleinen Anlage und bei der heute zur Verfügung stehenden Rechnertechnologie noch eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Die iterative Erzeugung von Plänen mit anschließender simulativer Bewertung für die nächsten 48 Stunden Anlagenlaufzeit erfordert einige Minuten an Rechenzeit. Ein solcher Plan umfasst dann typischerweise bis zu 130 Fertigungsaufträge und führt zu rund 10.000 Fahraufträgen, die an die SPS überspielt werden müssen.

Die Einschätzung der Auftragsvorbereiter als Hauptanwender der Feinplanungsapplikation ist, dass ihnen die Software die tägliche Arbeit erheblich erleichtert, und dass gegenüber einer manuellen Auswahl von Aufträgen viel Arbeitszeit in der Arbeitsvorbereitung selbst eingespart wird. Die Auslastung der Schweißkabinen liegt (soweit das rund sechs Monate nach Anlauf der Anlage abgeschätzt werden kann) im oberen Bereich der in Kapitel 4 diskutierten Bandbreiten. Insgesamt hat sich das Konzept der simulationsgestützten Feinplanung auch im vorliegenden Fall bewährt, so dass es in vergleichbaren Schweißanlagen des Systemintegrators ebenfalls mit zum Einsatz kommen soll.

Literatur

- Chan, F.T.S.; Chan, H.K.: A comprehensive survey and future trend of simulation study on FMS scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing* 15 (2004), S. 87-102.
- Dickersbach, J.T.; Keller, G.: *Produktionsplanung und -steuerung mit SAP ERP: Grundlagen – Prozesse – Customizingwissen*. 3. Auflage, Bonn, Boston: Galileo Press 2010.
- Framinan, J.M.; Ruiz, R.: Architecture of manufacturing scheduling systems: literature review and an integrated proposal. *European Journal of Operational Research* 205 (2010), S. 237-246.
- Jahangirian, M.; Eldabi, T.; Naseer, A.; Stergioulas, L.K.; Young T.: Simulation in manufacturing and business: a review. *European Journal of Operational Research* 203 (2010), S. 1-13.
- Mahnke, W.; Leitner, S.-H.; Damm, M.: *OPC Unified Architecture*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

- Noche, B.; Scholtissek, P.: Anwendungen der Simulation in der Unternehmensplanung. In: Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Handbuch der Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik, Braunschweig: Vieweg 1993, S. 267-307.
- Ouelhadj, D.; Petrovic, S.: Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling* 12 (2009) 4, S. 417-431.
- Pinedo, M.: *Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems*. 4. Auflage, New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer 2012.
- Saenz de Ugarte, B.; Artiba, A.; Pellerin, R.: Manufacturing execution systems – a literature review. *Production Planning & Control* 20 (2010) 6, S. 525-539.
- Sauer, O.: Trends in manufacturing execution systems. In: Huang, G.Q.; Mak, K.L.; Maropoulos, P.G. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 685-693.
- Smith, J.S.: Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of Manufacturing Systems* 22 (2003) 2, S. 157-161.
- VDI (2007): Richtlinie 3633 Blatt 1 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“. Berlin: Beuth.
- Wenzel, S.; Meyer, R.: Kopplung der Simulation mit Methoden des Datenmanagements. In: Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Handbuch der Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik*, Braunschweig: Vieweg 1993, S. 347-368.