

Emulation als Werkzeug in der Entwicklung von Steuerungssoftware

Development of Control Software with the Aid of Emulation

Ruth Fleisch, Robert Schöch, Thorsten Prante, V-Research GmbH, Dornbirn
(Austria), ruth.fleisch@v-research.at, robert.schoech@v-research.at,
thorsten.prante@v-research.at

Robert Pfliegerl, Schelling Anlagenbau GmbH, Schwarzach (Austria),
robert.pfliegerl@schelling.at

Abstract: This paper presents the deployment of emulation in the field of development of control software for the special case of cut-to-size plants featuring feedbacks in the material flow. In contrast to classical layouts of cut-to-size plants with linear material flow, panels can be allocated to the same saw via a feedback line as many times as it is required for their partitioning in the new plant layout. These circles in the material flow impose new challenges as they may cause deadlocks. In order to achieve the objective of operating a cut-to-size plant in a non-blocking way and at the same time with a high utilization of the saws, a deadlock-avoidance strategy is implemented into the software of the plant control layer. For its testing and fine tuning an emulation tool is used, which connects the plant control software with the virtual analogues of the control and the field layer.

1 Einführung

Plattenaufteilanlagen werden eingesetzt, um Platten aus Holzwerkstoffen mittels Sägen in die gewünschten Formate aufzuteilen, die fertigen Teile zu sortieren und zu stapeln. Diese Prozesse werden von verschiedenen Typen von Maschinen, wie zum Beispiel Längs- und Quersägen, Sortierwagen, Dreh- und Stapelgeräte oder Rollenbahnen, voll automatisiert durchgeführt. Abbildung 1 stellt die Bereiche dar, in die die Maschinen entsprechend ihren Funktionen gruppiert sind, und die von den aufzuteilenden Platten in der Reihenfolge Beschickung, Sägen, Sortierung und Stapelung durchlaufen werden.

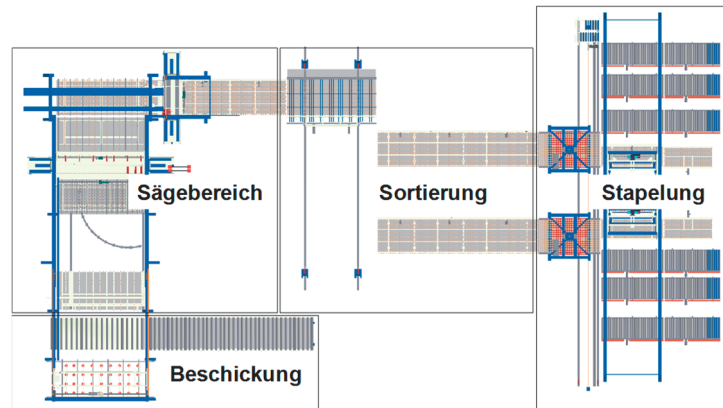


Abbildung 1: Klassisches Layout einer Plattenaufteilanlage

Der Einsatz von Plattenaufteilanlagen in der Auftragsfertigung bedingt die Produktion von immer kleineren Losen, was komplexere Schnittpläne der Platten zur Folge hat. Abbildung 2 stellt einen einfachen und einen etwas aufwändigeren Schnittplan gegenüber.

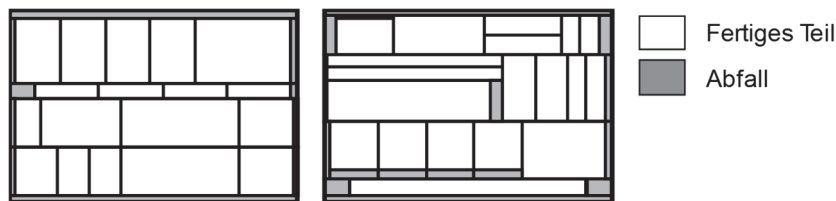


Abbildung 2: Einfacher (links) und komplexerer Schnittplan einer Platte

Die Platte, deren Schnittplan links in Abbildung 2 wiedergegeben ist, kann problemlos auf einer klassischen Plattenaufteilanlage bearbeitet werden: zuerst wird sie auf der Längssäge in Streifen geschnitten, die anschließend auf der Quersäge weiter aufgeteilt werden. Es ist jedoch nicht möglich, Platten mit komplexeren Schnittplänen wie der auf der rechten Seite auf einer herkömmlichen Anlage effizient zu produzieren. Um dieses Problem zu lösen, ist das Anlagenlayout dahingehend geändert worden, dass der Materialfluss nun Rückführungen aufweist. Das bedeutet im Kontext von Plattenaufteilanlagen, dass eine Platte beziehungsweise Teile davon, die bereits auf einer Säge geschnitten worden sind, über eine Rückführstrecke erneut derselben Säge für ihre weitere Aufteilung zugeordnet werden können – und das beliebig oft. Der Materialfluss der neuen Plattenaufteilanlage weicht somit wesentlich von der bisherigen linearen Grundkonzeption ab und bringt neue Herausforderungen mit sich, da Rückführungen Deadlocks verursachen können. Ein Deadlock ist als ein Zustand der Plattenaufteilanlage definiert, in dem die Anlage oder Teile davon auf unbestimmte Zeit blockiert ist und seine anstehenden Aufgaben nicht beenden kann (Fanti und Zhou 2004). Um das Auftreten eines Deadlocks zu verhindern, wird ein Algorithmus entwickelt und in die Software implementiert, die die Plattenaufteilanlage steuert.

Das Verfahren trifft die Entscheidungen, die den deadlockfreien Betrieb der Anlage bewirken sollen, in Echtzeit und basierend auf Analysen des aktuellen Systemzustandes. Die Feinabstimmung der Parameter des Algorithmus für eine optimale Lösung der Anlagensteuerung ist auf einer realen Anlage nicht durchführbar, da zum einen zum Zeitpunkt, wenn die Anlagensteuerung programmiert wird, eine Anlage noch nicht fertig gebaut sein muss, und zum anderen, falls die Anlage bereits aufgestellt ist, es zu hohe Kosten verursachen würde und meist seitens des Anlagenbetreibers auch nicht erwünscht ist. Die erforderlichen Abstimmungen erfolgen daher mittels Emulation der Plattenaufteilanlage. Das Emulationswerkzeug, das auf diese Weise zur Entwicklung der Steuerungssoftware für Anlagen mit Rückführungen im Materialfluss beiträgt, ist beim Anlagenbauer bereits als entscheidungsunterstützendes System im Vertrieb in Verwendung (Schöch et al. 2011; Schöch et al. to appear). Die Anwendung der Emulation in der vorliegenden Problemstellung ist somit ein weiterer Schritt in Richtung des Zieles der Mehrfachnutzung des Emulationswerkzeuges.

In Abschnitt 2 wird auf das Emulationswerkzeug näher eingegangen. Im Anschluss daran erfolgt eine Beschreibung der Plattenaufteilanlagen mit Rückführungen im Materialfluss, bevor in Abschnitt 4 der Algorithmus zur Vermeidung von Deadlocks in Plattenaufteilanlagen und damit zusammenhängend die Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung unter Zuhilfenahme des Emulationswerkzeuges präsentiert werden. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick.

2 Emulation einer Plattenaufteilanlage

Die Steuerung einer Plattenaufteilanlage erfolgt mittels eines zentralen hierarchischen Systems. Wie in Abbildung 3 dargestellt, sendet die Anlagensteuerungsebene Befehle an die speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) der einzelnen Maschinen. Die SPS dient dann wiederum der Steuerung der Maschine beziehungsweise seiner mechanischen Komponenten (Feldebene). Diese beiden letzteren Schichten sind nun virtuell abgebildet worden. Da sie mit der Steuerungssoftware, die auch in der Realität die Plattenaufteilanlagen steuert, verbunden sind, spricht man von Emulation (McGregor 2002).

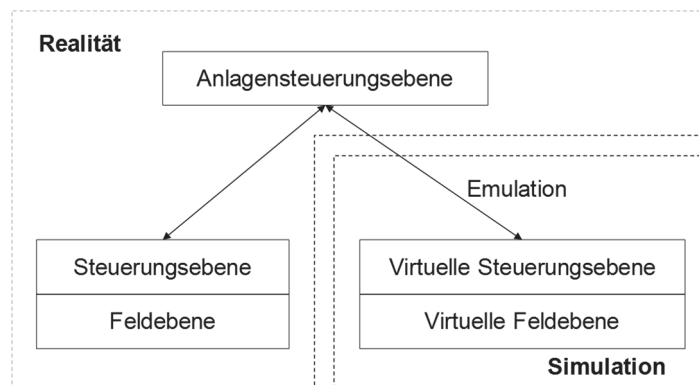


Abbildung 3: Zentrales hierarchisches Steuerungssystem

Genauer beschrieben schickt die Anlagensteuerungssoftware die Befehle an die virtuelle mittlere Schicht, die das Analogon zur SPS-Ebene darstellt. Sie teilt einen Befehl in eine Folge von Tasks auf. Solch eine Sequenz von Tasks wird dann anschließend von der mittleren Schicht an das Simulationsmodell übermittelt, das mit Hilfe einer Simulationssoftware implementiert ist. Die Tasksequenzen werden im Simulationsmodell den entsprechenden Maschinen zugeteilt. Nach Abarbeitung der einzelnen Tasks erfolgt über die mittlere Schicht die Bestätigung des Befehles an die Anlagensteuerung. Das Simulationsmodell umfasst also die virtuelle Abbildung der Feldebene: Es visualisiert die mechanischen Komponenten der Maschinen und stellt deren kinematische Bewegungen im Zusammenhang mit Materialtransport und -bearbeitung dar.

Die Modellierungstechniken für die Emulation entsprechen denen der ereignisdiskreten Simulation. Da die virtuellen Ebenen ihren Input von der Anlagensteuerung erhalten, enthält das Modell keine stochastischen Daten, was bedeutet, dass Unsicherheiten nicht abgebildet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Zeiten in der Anlagensteuerung und dem Simulationsmodell müssen die Ereignisse jedoch synchronisiert werden. Zu diesem Zweck ist eine Variante des „Blocking rendezvous pattern“ (Douglass 2004) implementiert worden, das korrekte zeitliche Abfolgen in der Befehlsübermittlung gewährleistet, und dadurch Simulationsgeschwindigkeiten, die ein Vielfaches der Realzeit betragen, erlaubt.

Eine ausführlichere Beschreibung des Emulationswerkzeuges, insbesondere der Systemarchitektur, sowie der Modellierungs- und Emulationsprozesse findet sich in Schöch et al. (2011) und Schöch et al. (to appear).

3 Anlagenlayout mit Rückführungen

In diesem Abschnitt wird ein Layout einer Plattenaufteilanlage beschrieben, dessen Materialfluss Rückführungen aufweist, und mit dem bisher gängigen Layout verglichen.

Wie in der Einführung bereits erwähnt ist aufgrund komplexerer Schnittpläne eine Änderung des Materialflusses erforderlich geworden, sodass nun eine Platte beliebig oft wieder derselben Säge zugeführt werden kann. Abbildung 4 zeigt die wichtigsten Maschinen einer beispielhaften Plattenaufteilanlage mit *Rückführungen im Materialfluss*: Nach der Beschickung des Systems mit Rohplatten und nach den ersten Aufteilungen auf Säge 1 wird entschieden, ob noch nicht fertig geschnittene Platten über eine Rückführstrecke wiederum der Säge 1 zugeteilt werden oder ob sie der zweiten oder dritten Säge zugeführt werden. Wird eine Platte der zweiten (oder dritten) Säge zugeordnet, so verbleiben sie beziehungsweise ihre Teile solange in diesem Sägekreis, bis sie fertig aufgeteilt sind. Jeder Sägekreis enthält eine Rollenbahnstrecke, die Pufferzwecken dient.

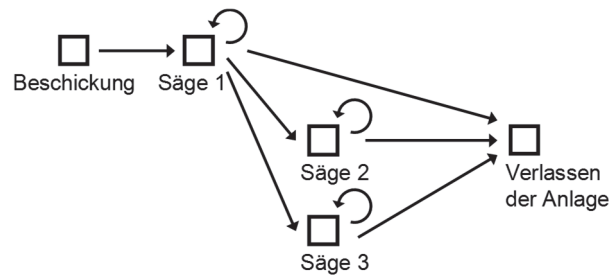


Abbildung 4: Materialfluss einer Plattenaufteilanlage mit Rückführungen

Die Herausforderung des neuen Anlagenlayouts liegt nun darin, dass Rückführungen im Materialfluss *Deadlocks* verursachen können. Es kann also vorkommen, dass eine Menge S von Platten existiert, von der jede Platte eine Maschine (Ressource) belegt und gleichzeitig auf das Freiwerden einer anderen Maschine wartet. Diese angeforderten Maschinen sind aber gerade von Platten aus der Menge S besetzt und können deshalb nicht freigegeben werden. Um zu verhindern, dass solche Situationen auftreten, muss eine in der Anlagensteuerung zu integrierende Strategie entwickelt werden.

Eine weitere Neuerung betrifft die Steuerung des Materialflusses durch die Anlage. Hinsichtlich der Wahl der Sägen gibt es zwar aufgrund technischer Spezifikationen Einschränkungen (beispielsweise betragen die maximalen Schnittlängen der Sägen 2 und 3 in Abbildung 4 jeweils nur 2,3 m, wohingegen die der ersten Säge 4,3 m misst), im Allgemeinen jedoch wird die Entscheidung, welche der Sägen benutzt werden soll, in Echtzeit auf Basis des aktuellen Zustandes der Anlage gefällt. Somit ist der Weg eines Teiles durch die Anlage zum Zeitpunkt, wenn es in die Anlage eintritt, noch nicht festgelegt und folglich ist der Materialfluss im Gegensatz zu bisherigen Anlagen nicht mehr vorausberechenbar. Diese Eigenschaft wird *flexibles Routing* genannt (De Toni und Tonchia 1998).

Die nächsten beiden Merkmale kennzeichnen zwar nicht nur Plattenaufteilanlagen mit Rückführungen, sondern ebenso solche mit linearem Materialfluss, sie müssen bei der Handhabung von *Deadlocks* aber berücksichtigt werden.

Wie die Bezeichnung „Plattenaufteilanlage“ schon impliziert, entstehen in einem Sägevorgang aus einer Platte zwei kleinere Platten, die in Folge meistens wieder als eigenständige Platten aufgefasst werden und deren nächste Bearbeitungsschritte auf unterschiedlichen Sägen erfolgen können. Die Anzahl der Platten im System kann sich demnach erhöhen, auch wenn keine neue Platte der Anlage zugeführt wird. Neben dieser Eigenschaft der *divergierenden Erzeugnisstruktur* (Günther und Tempelmeier 2012) betrifft eine weitere die Kapazität einer Maschine. In einer Plattenaufteilanlage werden die Teile überwiegend mittels Rollenbahnen transportiert. Je nach Größe der Platten passen unterschiedlich viele Platten auf eine Rollenbahn. Da die Rollenbahn einen Bauteil einer Maschine bildet, ist die *Kapazität der Maschine variabel*.

4 Deadlock-Vermeidung in einer Plattenaufteilanlage

Im Umgang mit Deadlocks in automatisierten Fertigungssystemen ist nach Zajac (2004) Deadlock-Vermeidung der bevorzugte Ansatz, da sich zum einen die umfangreichen Restriktionen der Strategien zur Deadlock-Verhinderung oft nachteilig auf die Auslastung der Maschinen auswirken und zum anderen die Deadlock-Erkennung und -Beseitigung ebenso wenig sinnvoll anwendbar ist. Letzteres ist dadurch bedingt, dass in automatisierten Fertigungssystemen der Abbruch von im Deadlock involvierten Prozessen meist unzulässig ist.

Das Verfahren zur Deadlock-Vermeidung, das im vorliegenden Fall einer Plattenaufteilanlage mit Rückführungen verwendet wird, und damit zusammenhängend die Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung mit Hilfe des Emulationswerkzeuges werden nun ausführlicher behandelt.

4.1 Verfahren zur Deadlock-Vermeidung

Um das Ziel eines deadlockfreien Betriebes der Plattenaufteilanlage bei gleichzeitiger hoher Auslastung der Sägen zu erreichen, ist in der Anlagensteuerungssoftware ein Verfahren zur Vermeidung von Deadlocks implementiert worden, die zu bestimmten Zeitpunkten den aktuellen Zustand der Anlage analysiert und aufgrund dessen eine Entscheidung fällt. Es gibt *zwei verschiedene Arten von Entscheidungen*. Zum einen muss nach der Freigabe der Maschinen, die einen Sägekreis beschicken, die Frage beantwortet werden, ob eine neue Platte dem Sägekreis zugeführt werden soll oder ob eine Platte, die sich bereits im Sägekreis befindet, der Maschine zugeteilt werden soll (Entscheidungen E1, E2 und E3 in Abbildung 5). Als Entscheidungsgrundlage dient hierfür der *diskrete Füllgrad* eines Sägekreises. Die zweite Art von Entscheidungen betrifft die Zuordnung der Teile zu den einzelnen Sägen in Echtzeit, oder anders gesagt das flexible Routing. Die Entscheidung E4 in Abbildung 5 ist diejenige zwischen Säge 1 und den anderen beiden Sägekreisen. Im Falle, dass die Platte nicht der ersten Säge zugeteilt wird, erfolgt anschließend noch die Wahl zwischen Säge 2 und 3 (E5). Diese Art von Entscheidungen beruht auf der Anzahl der *offenen Bearbeitungsschritte* der Platten, die sich in einem Sägekreis befinden. Sie beeinflusst hauptsächlich die Auslastung der Sägen, ist aber auch hinsichtlich der Vermeidung von Deadlocks relevant aufgrund der vorhin erwähnten Restriktionen in Bezug auf die Wahl der Sägen.

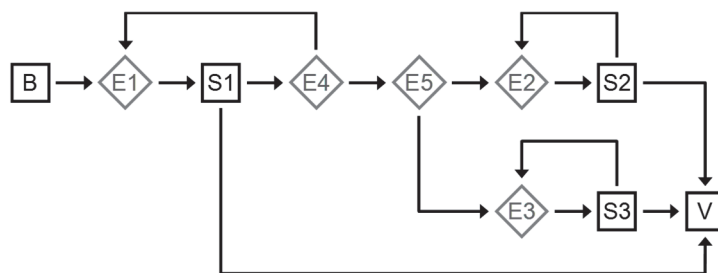


Abbildung 5: Materialfluss mit Entscheidungen (B – Beschickung, S – Säge, V – Verlassen der Anlage, E – Entscheidung)

Beide Arten von Entscheidungsregeln werden nun genauer beschrieben. Damit entschieden werden kann, ob eine neue Platte einem Sägekreis zugeführt werden soll, wird der *diskrete Füllgrad* dieses Sägekreises berechnet. Die Bestimmung erfolgt in vier Schritten:

1. *Auflisten der Maschinen des Sägekreises:* Die Maschinen des Sägekreises werden entgegen der Materialflussrichtung aufgelistet, beginnend mit derjenigen, die sich im Materialfluss vor der Maschine befindet, deren Aufgabe auch die Beschickung des Sägekreises ist.
2. *Auflisten der Platten des Sägekreises:* Die Platten, die sich aktuell im Sägekreis befinden, werden in derselben Reihenfolge wie die Maschinen betrachtet. Um aber der divergierenden Erzeugnisstruktur Rechnung zu tragen, wird nicht die Platte in die Liste aufgenommen, sondern stattdessen die Teile, die im Zuge des nächsten Sägendurchlaufes aus der Platte entstehen werden. Dabei werden Abfallteile in der Auflistung nicht berücksichtigt, da sie sofort nach dem Sägen entsorgt werden.
3. *Bestimmung der Größen der aufgelisteten Platten:* Für jedes aufgelistete Teil wird die längere der beiden Seitenabmessungen als Größe herangezogen, ungeachtet, wie das Teil auf einer Maschine platziert werden wird – die längere Seite parallel oder im rechten Winkel zur Materialflussrichtung. Es wird also der ungünstigere Fall unterstellt. Die Größe einer Maschine ist in diesem Kontext definiert als ihre Länge in Materialflussrichtung.
4. *Zuordnung der aufgelisteten Platten zu den Maschinen:* Die aufgelisteten Teile werden der Reihe nach den Maschinen zugeordnet. Ein Teil kann einer Maschine zugeteilt werden, wenn deren Kapazität noch nicht ausgeschöpft ist. Durch einen Vergleich der Platten- und Maschinengröße wird die Kapazität der nächsten Maschine in der Liste bestimmt, um derart die variablen Kapazitäten der Maschinen zu berücksichtigen.

Der diskrete Füllgrad eines Sägekreises ist nun die Anzahl der aufgelisteten Maschinen mit ausgeschöpfter Kapazität. Er wird als Entscheidungskriterium herangezogen: Ist die Anzahl größer als ein festgelegter Grenzwert, dann wird keine neue Platte dem Sägekreis zugeführt.

Die Entscheidungsregel für die Wahl der Säge vergleicht die Anzahl der noch anstehenden Bearbeitungsschritte der Sägekreise und priorisiert denjenigen Sägekreis mit den wenigsten Bearbeitungsschritten. Die Formel für die Berechnung der Anzahl der *offenen Bearbeitungsschritte* eines Sägekreises *OBS* lautet

$$OBS = \sum_{p \in P} (S_p + SD_p). \quad (1)$$

Es wird für jede Platte p aus der Menge P aller Platten, die sich in einem Sägekreis befinden, die Anzahl der offenen Bearbeitungsschritte ermittelt und anschließend aufsummiert. Die offenen Bearbeitungsschritte einer Platte p setzen sich aus der Anzahl der anstehenden *Schnitte* S_p und der Anzahl der dazu notwendigen *Sägendurchläufe* SD_p zusammen. Ein Sägendurchlauf umfasst alle Schnitte einer Platte, die durchgeführt werden können, ohne dass die Platte gedreht werden muss. Für die Platte mit dem in Abbildung 6 dargestellten Schnittplan berechnet sich die Anzahl der offenen Bearbeitungsschritte wie folgt. Die Anzahl der Schnitte beträgt sechzehn. Für die Aufteilung der Platte sind fünf Sägendurchläufe erforderlich: Die

Schnitte mit Nummern 1, 2 und 3 erfolgen, wenn die Platte das erste Mal eine Säge durchläuft. Die beiden schmalen Teile an den Rändern sind Abfall und werden sofort nach dem Sägen entsorgt, die anderen beiden Plattenteile durchlaufen jeweils erneut eine Säge, jedoch um neunzig Grad gedreht. Das sind Sägendurchlauf 2 mit Schnittnummern 4 bis 7 und Durchlauf 3 mit Schnittnummern 10 bis 14. Die Schnitte mit Nummern 8 und 9 bilden den vierten Sägendurchlauf und diejenigen mit Nummern 15 und 16 den fünften. Für die Anzahl der offenen Bearbeitungsschritte der dargestellten Platte ergibt sich somit $16 + 5 = 21$.

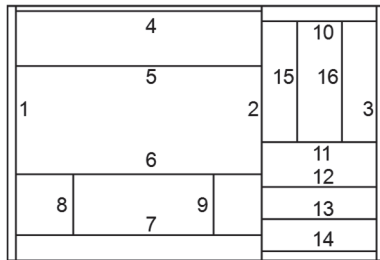


Abbildung 6: Schnittplan einer Platte

4.2 Deadlockfreie, optimierte Anlagenmodelle

Wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt, ist das Ziel der Strategie zur Vermeidung von Deadlocks, eine hohe Auslastung von deadlockfreien Sägekrisläufen zu definieren. Die Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung soll anhand festgelegter kritischer Kennzahlen erfolgen. Solche Kennzahlen sind beispielsweise Zykluszeiten von Sägekrisläufen, Durchsatzraten von geschnittenen Teilen pro Minute und Auslastung einzelner Anlagenmodule. Dabei ist zu beachten, dass die Emulation nicht automatisch eine optimale Lösung erzeugt, sondern anhand von Entscheidungsregeln verschiedene Simulationsläufe erstellt und die Bestimmung einer optimalen Lösung ermöglicht.

In der Modellierung von Anlagen (Schöch et al. 2011) werden für eigens festgelegte Maschinen Entscheidungsregeln hinterlegt, die den Füllgrad sowie die anstehenden Bearbeitungsschritte für einen Sägekrislauf beschreiben. Die im Anlagenmodell hinterlegten Meta-Informationen dienen zur Simulationslaufzeit der Anlagensteuerung der automatischen Aktivierung der Entscheidungsregeln.

Nach Emulationsstart berechnet der Entscheidungsalgorithmus fortlaufend den aktuellen Füllgrad sowie die anstehenden Bearbeitungsschritte und vergleicht diese mit den in den einzelnen Maschinen hinterlegten Grenzwerten. In Abhängigkeit vom Vergleichsergebnis werden die nötigen Aufträge von der Anlagensteuerung den Maschinen zur Erzeugung und Abarbeitung der Tasksequenzen übergeben. Die anschließende Analyse der Simulationsergebnisse kann als Eingabe für Änderungen der Parameterwerte der Entscheidungsregeln dienen und zur erneuten Simulation führen. Das folgende Verfahren veranschaulicht die iterative Vorgehensweise zur Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung:

1. *Initialisierung*: Auswahl der minimalen Werte der Entscheidungsregeln, so dass gesichert ein deadlockfreier Sägekrislauf mit geringer Anlagenauslastung gegeben ist.

2. *Durchführung eines Simulationslaufes:* Bei jedem Lauf ist darauf zu achten, dass mit denselben Geschwindigkeiten der Sägen und sonstigen Maschinen simuliert wird.
3. Steht ein deadlockfreies Simulationsergebnis für die Analyse zur Verfügung, so können Parameterwerte für die Entscheidungsregeln erhöht werden. Mit Schritt 2 beginnt die nächste Iteration für einen Simulationslauf.
4. Tritt während der Simulation ein Deadlock auf, so sind die Parameterwerte für die Entscheidungsregeln zu verringern. Mit Schritt 2 beginnt die nächste Iteration für einen Simulationslauf.
5. Tritt während der Simulation ein Deadlock auf und es stehen bereits Simulationsläufe mit validen Einstellungswerten für die Entscheidungsregeln zur Verfügung, so steht die optimale Lösung der Anlagensteuerung zur Verfügung.
6. Treten keine deadlockfreien Simulationsläufe auf, so ist die Kapazität der Maschinen im Sägekreislauf, die der Pufferung dienen, zu erweitern. Mit Schritt 1 beginnt die erste Iteration mit dem neuen, adaptierten Anlagenmodell.

Die optimale Lösung der Anlagensteuerung basiert auf bestimmten Randbedingungen (Größe der Rohplatten und geschnittenen Teile oder Anzahl der Schnitte pro Sägezyklus) in Bezug auf die Flexibilität einzelner Schnittmuster für die Produktionslose.

5 Ergebnisse und Ausblick

Inhalt der Identifikation der prozess- und strukturinvarianten Eckpfeiler von Plattenaufteilanlagen ist die Analyse der Grenzen und Ausprägungen der Anlagen zwischen dem Eingang von Rohplatten und Ausgang zugeschnittener Platten. Das Entscheidungsunterstützungssystem gibt dem Anlagenexperten in Planungsprozessen nun die Möglichkeit, die Modellierung und Auswertung von Anlagen mit Rückführung zu bewerten. Der präsentierte Ansatz assistiert dem Anlagenexperten mit Hilfe der Strategie der Deadlock-Vermeidung inkrementell eine optimale Anlagenauslastung zu bestimmen und spart folglich im Planungsprozess Zeit und Kosten ein.

In der Weiterentwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems hat der nächste Schritt folgender Schwerpunkt: Derzeit basiert die Übertragung von Aufträgen und Tasksequenzen während der Emulation zwischen dem Anlagensteuerungssystem und dem zu steuernden System auf einem Kommunikationskanal. Anlagen mit Rückführungsausprägung haben eine Erhöhung des Kommunikationsaufwandes zur Folge und dadurch eine Verringerung der Simulationsgeschwindigkeit. Durch die Parallelisierung der Kommunikation soll die Simulationsgeschwindigkeit wesentlich erhöht werden.

Danksagung

Die Forschungsergebnisse wurden vom österreichischen COMET-Forschungsprogramm (COMpetence centers for Excellent Technologies) im Rahmen ProDSS (Integrated Decision Support Systems for Industrial Processes) gefördert.

Literatur

- De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing Flexibility: A Literature Review. *International Journal of Production Research* 36 (1998) 6, S. 1587-1617.
- Douglass, B. P.: Real Time UML: Advances in the UML for Real-time Systems. Boston: Addison-Wesley 2004.
- Fanti, M. P.; Zhou, M.: Deadlock Control Methods in Automated Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans* 34 (2004) 1, S. 5-22.
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- McGregor, I.: The Relationship Between Simulation and Emulation. In: Yücesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference 2002*, S. 1683-1688.
- Schöch, R.; Schmid, S.; Hillbrand, C.: Simulation Based Decision Support System for Cut-to-size Plants. In: Buczynski, T.; Kolodziej, J.; Byrski, A.; Carvalho, M. (Hrsg.): *Proceedings 25th European Conference on Modelling and Simulation 2011*, S. 394-400.
- Schöch, R.; Schmid, S.; Hillbrand, C.: Optimising Plant Layout Decisions Based on Emulation Models – Technical Framework and Practical Insights. Angenommen zur Veröffentlichung von *International Journal of Simulation and Process Modelling*, Special Issue on: Research Challenges in Developing Advanced Solutions in Industry and Supply Chains Modelling and Simulation for Building 21st Century Enterprises, <http://www.inderscience.com/info/ingeneral/forthcoming.php?jcode=ijspm>.
- Zajac, J.: A Deadlock Handling Method for Automated Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 53 (2004) 1, S. 367-370.