

Simulative Evaluierung einer flexibilitätsorientierten Selbststeuerung in frei verketteten Montagesystemen

Simulative Evaluation of a Flexibility-Oriented, Autonomous Production Control in Freely Interlinked Assembly Systems

Daniel Müller, Anne Meyer, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
mueller@lfo.tu-dortmund.de, anne.meyer@lfo.tu-dortmund.de

Abstract: Autonomous, freely interlinked assembly systems are considered as a promising approach to contribute to the resolution of the dilemma between productivity and flexibility when dealing with a high product variety. In this paper, an autonomous control method (flexibility-oriented autonomous control) is proposed which evaluates the available sequencing flexibility in freely interlinked assembly systems based on the present production situation and integrates it into decision-making. The method aims at exploiting the potentials of the degrees of freedom in the situational creation of the assembly sequence. A simulative evaluation shows the potentials of the method with regard to the balancing of the work-in-process to reduce the deviation of promised delivery dates.

1 Einleitung

In der Forschungslandschaft wird aktuell der Einsatz sogenannter frei verketteter Montagesysteme und damit die Auflösung der Taktzeit als prägende Eigenschaft der klassischen Linienmontage diskutiert (Greschke, 2016; Hofmann et al., 2019). Damit soll vorwiegend Austaktungsverlusten infolge hoher Taktzeitspreizungen durch zunehmend individualisierte Produktprogramme entgegen gewirkt werden (Schmitt et al., 2017). Das zentrale Potential der räumlichen und zeitlichen Entkopplung ist die deutlich gesteigerte Materialflussflexibilität und die damit verbundenen Freiheitsgrade in der Abfolge der Montagesequenz. Unter einer Montagesequenz werden in dieser Arbeit in Anlehnung an Wiesbeck (2014) die logische und zeitliche Abfolge einzelner Arbeitsvorgänge (AVOs) beim Zusammenbau eines Produktes verstanden. Begrenzend für die Sequenz sind technologische Restriktionen, die in der Regel durch Montagevorranggraphen abgebildet werden (Küber, 2017). Die verbleibenden Freiheitsgrade werden als Arbeitsplanflexibilität bezeichnet (Dixit, 2015). Im Umgang mit der hohen Materialflusskomplexität derartiger Systeme wird vermehrt die Selbststeuerung logistischer Objekte als vielversprechendes Konzept vorgeschlagen (Martins et al., 2018). Selbststeuernde Produktionssysteme basieren auf cyber-physischen Systemen, die dezentral eigenständige Entscheidungen auf

Basis lokaler Informationen über die Maschinenbelegung treffen (ten Hompel und Henke, 2014).

Die Variabilität in den Prozesszeiten frei verketteter Montagesysteme führt in Kombination mit einer kurzfristigen Entscheidungsfindung von Selbststeuerungsmethoden zu unvorhersehbaren Schwankungen der Umlaufbestände und Durchlaufzeiten. Diese Volatilität erschwert die Einhaltung von Planterminen, erhöht die Unsicherheit in Planungsprozessen und gilt als wesentliche Implementierungshürde selbststeuernder Produktionssysteme (Zeidler et al., 2019).

Vor diesem Hintergrund sollen die Freiheitsgrade aus der Arbeitsplanflexibilität gezielt für eine verbesserte Systemnivellierung genutzt werden. Um das Flexibilitätspotential auszuschöpfen, ist von den Autoren eine neue Selbststeuerungsmethode – die flexibilitätsorientierte Selbststeuerung (FOS) – entwickelt worden. Der zentrale Beitrag dieser Arbeit sind Kennzahlen zur Messbarkeit sowie der Nachweis von Arbeitsplanflexibilität, die Berücksichtigung dieser bei der Selbststeuerung und das Aufzeigen des Potentials für frei verkettete Montagesysteme.

In Abschnitt 2 wird der Untersuchungsgegenstand in die bisherige Literatur eingeordnet. Abschnitt 3 behandelt, wie sich die Freiheitsgrade in Montagevorranggraphen bei lokalen Entscheidungen entwickeln. In Abschnitt 4 wird die FOS sowie die Umsetzung innerhalb eines ereignis-diskreten Materialflusssimulationsmodells vorgestellt. Die simulationsbasierte Evaluierung der Potentiale und Grenzen bei der Verwendung von Arbeitsplanflexibilität in selbststeuernden, frei verketteten Montagesystemen wird anschließend in Abschnitt 5 vorgenommen. Abschließend fasst Abschnitt 6 die wesentlichen Erkenntnisse dieses Beitrags zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten im Themenfeld.

2 Stand der Forschung und Handlungsbedarf

Der Einzug cyber-physischer Systeme in die Produktionsumgebung ermöglicht es prinzipiell, den Grad an Autonomie bei der Entscheidungsfindung und Steuerung zu erhöhen (Gronau, 2018). Wenn logistische Objekte die Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst leisten, ist eine Selbststeuerung der produktionslogistischen Prozesse gegeben (Böse und Windt, 2007). Es haben sich bereits zahlreiche Methoden im Themenfeld etabliert. Diese lassen sich gemäß ihrem Funktionsprinzip in regelbasierte und bioanaloge Methoden einteilen. Gemein haben alle Methoden zur Selbststeuerung, dass sie mit kurzfristigen Entscheidungen arbeiten, um häufige Umplanungen im Kontext eines zunehmend dynamischen Umfelds zu vermeiden (Grundstein, 2017).

Arbeitsplanflexibilität repräsentiert Entscheidungsfreiräume auf Basis von Montagevorranggraphen (Dixit und Dharamvir, 2015). In Abhängigkeit der Graphtopologie wird der Entscheidungsfreiraum nachgelagerter Arbeitsvorgänge bei lokalen Entscheidungen unterschiedlich reduziert (Ramos et al., 1998). Dieser hat jedoch maßgeblichen Einfluss auf den Umgang mit Variabilität und damit die Effizienz von selbststeuernden Systemen (Blunck und Windt, 2013). Selbststeuerungsmethoden müssen daher die zukünftige Entwicklung des Entscheidungsfreiraums berücksichtigen. Existierende Methoden zur Selbststeuerung beschränken sich jedoch auf logistische und monetäre Kriterien bei der

Entscheidungsfindung. Auswirkungen auf zukünftige Entscheidungsfreiräume werden bisher nicht berücksichtigt. (Zeidler et al., 2019)

Vor diesem Hintergrund bedarf es einer situativen Bewertung und damit Quantifizierung der Arbeitsplanflexibilität, sowie einer darauf aufbauenden Integration in die Entscheidungsfindung von Selbststeuerungsmethoden. In Mueller et al. (2018) haben die Autoren aufgezeigt, dass die bisherigen Ansätze zur Quantifizierung der Arbeitsplanflexibilität aufgrund ihres statischen Charakters nicht für die Flexibilitätsbewertung während eines Montagedurchlaufs und damit den Einsatz in selbststeuernden Systemen geeignet sind.

3 Quantifizierung von Entscheidungsfreiräumen in Montagevorranggraphen

Montagevorranggraphen repräsentieren die Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen von AVOs und damit die Restriktionen bei der situativen Bildung von Montagesequenzen (Ramos et al., 1998). Damit beschreiben sie die für eine Produktionssteuerung verfügbare Arbeitsplanflexibilität (Dixit und Dharamvir, 2015). Im Folgenden wird anhand zwei verschiedener Vorranggraphen (vgl. Abbildung 1) mit jeweils 27 AVOs aufgezeigt, wie sich Entscheidungsfreiräume bei lokalen Entscheidungen entwickeln. Beide Graphen sind der Literatur zur Fließbandabstimmung entnommen (Mertens, 1967). Graph 1 weist viele Freiheitsgrade auf, während Graph 2 ein Produkt mit weniger Freiheitsgraden in der Montagesequenz repräsentiert.

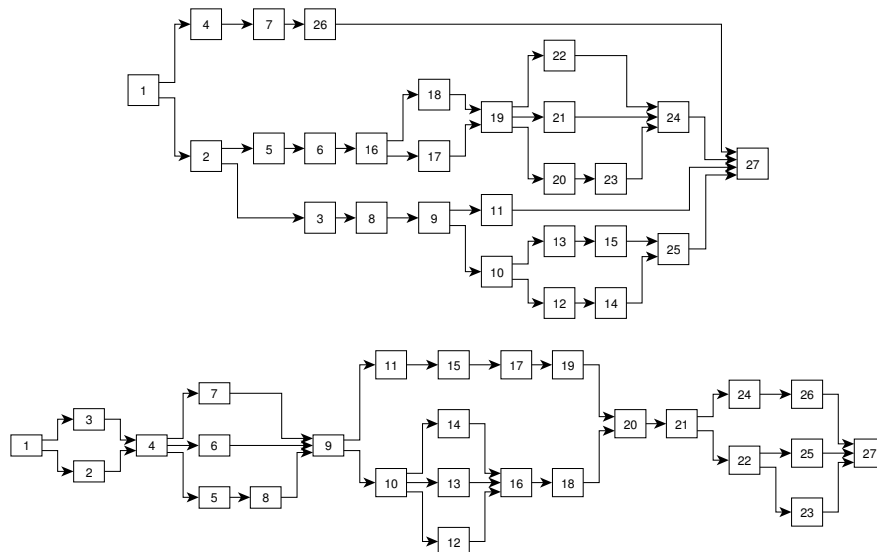


Abbildung 1: Montagevorranggraphen mit vielen (oben: Graph 1) und wenigen (unten: Graph 2) Freiheitsgraden

Zur Beschreibung des Entscheidungsfreiraums während des Montageprozesses werden zwei Kennzahlen entwickelt: Die erste Kennzahl entspricht der Anzahl verschiedener, möglicher Montagesequenzen. Sie dient der Charakterisierung des verbleibenden Entscheidungsfreiraums (VEF) und repräsentiert eine globale, d.h. den gesamten weiteren Bearbeitungsverlauf bzw. Graphen betreffende, Flexibilität. Die

Berechnung der Anzahl verschiedener Montagesequenzen wird mit Hilfe des Slot-Block-Verfahrens durchgeführt (vgl. hierzu Ramos et al. (1998)). Die zweite Kennzahl ist die Anzahl der Entscheidungsmöglichkeiten (d.h. AVOs) im jeweiligen nächsten Bearbeitungsschritt (EMNS). Die EMNS repräsentiert die lokal verfügbare Arbeitsplanflexibilität und ist als der für eine Selbststeuerungsmethode bei lokalen Entscheidungen tatsächlich verfügbarer Entscheidungsfreiraum zu interpretieren.

Gemäß der Knotenanzahl existieren jeweils 26 sogenannte Entscheidungsstufen innerhalb der zugrundeliegenden Montagevorranggraphen, in denen jeweils eine Entscheidung getroffen werden muss, um den vollständigen Vorranggraphen zu durchlaufen. In Abbildung 2 sind für beide Montagevorranggraphen jeweils die VEF und EMNS verschiedener Montagesequenzen über die Anzahl der Entscheidungsstufen aufgetragen. Die Montagesequenzen mit den minimalen und maximalen Werten sind durch fette Linien dargestellt. Diese basieren auf durchgängigen Entscheidungen für die jeweils minimalen bzw. maximalen Werte der Anzahl verbleibender Montagesequenzen im jeweiligen Bearbeitungsschritt. Weiterhin in der Abbildung aufgeführt sind Ergebnisse für fünf zufällig erzeugte Montagesequenzen (dünne Linien).

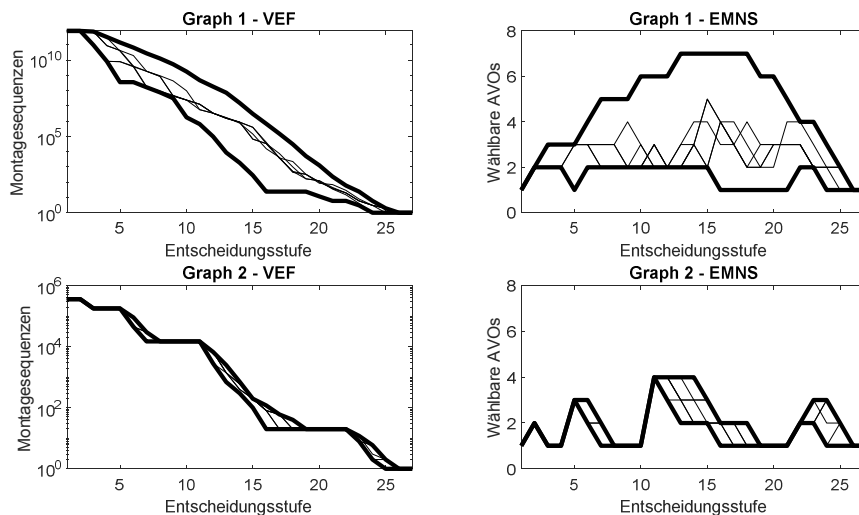


Abbildung 2: Minimale und maximale Entscheidungsfreiräume (dicke Linien) in Vorranggraph 1 und 2 sowie fünf zufällig erzeugte Montagesequenzen (dünne Linien)

Zunächst wird deutlich, dass durch die Freiheitsgrade der AVO-Abfolge eine beträchtliche Anzahl verschiedener möglicher Montagesequenzen bei beiden Vorranggraphen resultiert. Weiterhin zeigt sich insbesondere bei Graph 1 eine ausgeprägte Diskrepanz der Minimal- und Maximalwerte des VEF und der EMNS, was die Motivation zur Berücksichtigung von Arbeitsplanflexibilität in der Entscheidungsfindung unterstreicht. Aufgrund der deutlich kleineren Entscheidungsfreiräume fallen bei Graph 2 aufgrund der eher sequentiell geprägten Topologie die Unterschiede zwischen minimalem und maximalem Wert deutlich geringer aus.

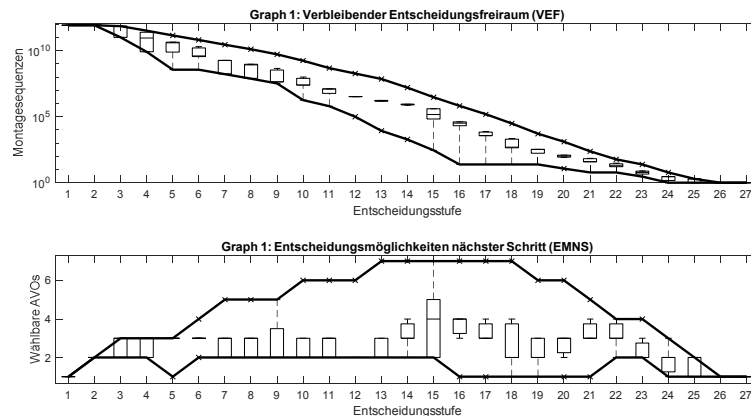


Abbildung 3: Verteilung von Entscheidungsfreiräumen in Montagevorranggraph 1 für 2500 verschiedene, zufällige Montagesequenzen

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Entscheidungsfreiräume pro Entscheidungsstufe für Graph 1 bei Betrachtung von 2500 zufällig erzeugten Montagesequenzen anhand von Box-Whisker-Plots. Auf Basis dieser Darstellung wird deutlich, dass die Entscheidungsfreiräume des überwiegenden Anteils an zufällig gebildeter Montagesequenzen deutlich vom Maximalwert entfernt sind. Diese Erkenntnis motiviert die zielgerichtete Berücksichtigung zukünftiger Entscheidungsfreiräume bei lokalen Entscheidungen selbststeuernder Systeme.

4 Flexibilitätsorientierte Selbststeuerung (FOS)

Um die Arbeitsplanflexibilität in frei verketteten Montagesystemen für eine Nivellierung des produktionslogistischen Systembetriebs auszuschöpfen, wird von den Autoren eine neue Selbststeuerungsmethode – die flexibilitätsorientierte Selbststeuerung (FOS) – vorgeschlagen. Dieser Steuerungsansatz bewertet situativ die vorhandene Arbeitsplanflexibilität und berücksichtigt diese explizit bei der Entscheidungsfindung. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip von FOS kurz skizziert. Für eine detaillierte Betrachtung sei an dieser Stelle auf Mueller et al. (2018) verwiesen.

Grundsätzlich zielt der Ansatz darauf ab, den verbleibenden Entscheidungsfreiraum (VEF) über den gesamten Produktionsablauf möglichst wenig zu reduzieren, sodass in zukünftigen und zum Zeitpunkt einer Entscheidung noch unbekanntem Situationen möglichst variabel reagiert werden kann. Damit soll die für Selbststeuerungsmethoden charakteristische Myopie in der Entscheidungsfindung reduziert werden, mit dem Ziel einen gleichmäßigeren Systembetrieb zu erreichen.

Grundlage von FOS sind die bereits eingeführten Montagevorranggraphen. Ein Montagevorranggraph für ein Produkt ist definiert als Graph $G = (J, K)$, wobei J die Menge der Knoten und K die Menge der gerichteten Kanten abbildet, dargestellt als $(i, j) \in K$ mit $i, j \in J$. Dabei repräsentiert ein Knoten einen AVO, die gerichtete Kante zwischen zwei Knoten (i, j) sagt aus, dass der AVO, der durch i repräsentiert wird, vor dem AVO, der durch j repräsentiert wird, abgearbeitet sein muss. Aus Sicht einer Selbststeuerungsmethode entspricht die Anzahl der Knoten $|J| - 1$ des Vorranggraphen (der Operator $|\cdot|$ bildet die Anzahl der Elemente der Menge ab) der Anzahl der Entscheidungsstufen, denn alle Knoten, die im Vorranggraph repräsentiert

sind, müssen abgearbeitet werden und nach Abarbeitung eines Knoten wird entschieden, welche der laut Vorranggraph zulässige AVO als nächstes bearbeitet wird. Die zulässigen Nachfolger eines Knoten k sind durch $j \in N^k$ gegeben. In der vorliegenden Arbeit gilt eine eindeutige Zuordnung einer AVO und damit eines Knoten $j \in J$ zu einer Arbeitsstation p_j , wobei Parameter p_j ein Element der Menge der Arbeitsstationen L repräsentiert.

Nach erfolgter Bearbeitung eines Knotens und simultanen Entscheidung für den nachfolgenden Knoten wird der Graph angepasst, indem der abgeschlossene Knoten sowie die vorhandenen Eingangskanten des gewählten Nachfolgeknotens gelöscht und notwendige Ausgangskanten an den gewählten Knoten zu den weiteren Knoten der Nachfolgermenge des abgeschlossenen Knotens hinzugefügt werden. Auf diese Weise werden die Vorrangbeziehungen beibehalten und es liegt pro Entscheidungsstufe $i \in \{1..|J| - 1\}$ ein modifizierter Graph G_i vor, der von den bereits abgeschlossenen Knoten abhängt.

Sei nun der gerade abgearbeitete Knoten durch k repräsentiert, so weist die Flexibilitätskennzahl $A_{G_i k j}^{\text{flx}}$ jedem zulässigen Nachfolger $j \in N^k$ in Abhängigkeit des aktuellen Graphen G_i jeweils eine Attraktivität mit einer reellen Zahl im Intervall $[0,1]$ zu:

$$A_{G_i k j}^{\text{flx}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu(G_i, j)}{\mu(G_i, k)} + \frac{v(G_i, j)}{\sum_{m \in N^k} v(G_i, m)} \right), \forall j \in N^k \quad (1)$$

Dabei gibt die Funktion $\mu(G_i, j)$ die Anzahl der verbleibenden, möglichen Montagesequenzen bei Entscheidung für einen Knoten j an. In Analogie zu Kapitel 2 wird für die Berechnung das von Ramos et al. (1998) vorgeschlagene Slot-Block-Verfahren verwendet. Die zweite Funktion $v(G_i, j)$ gibt in Abhängigkeit des aktuellen Graphen G_i die Anzahl der zulässigen Nachfolger eines Knoten j an. Wie in Abschnitt 3 beschrieben, zeichnet sich die zweite Funktion zur Flexibilitätsbewertung durch einen lokalen Charakter aus, während die erste Funktion auf eine globale Betrachtung der Flexibilität des gesamten Montageablaufs abzielt. Der erste Quotient relativiert die Anzahl verbleibender Montagesequenzen bei der Entscheidung für einen Nachfolgeknoten $j \in N^k$ auf die Anzahl aller verbleibenden Möglichkeiten des Vorranggraphen im vorherigen Schritt, d.h. bei Betrachtung des Knotens k . Die Summe der möglichen Montagesequenzen in der Entscheidungsstufe $i + 1$, d.h. aller Nachfolgeknoten $j \in N^k$, ist gleichbedeutend mit der Anzahl möglicher Montagesequenzen in Entscheidungsstufe i , also bei Betrachtung des Knotens k . Der zweite Term bildet das Verhältnis aus der Anzahl der Entscheidungsmöglichkeiten in Entscheidungsstufe $i + 1$ für einen betrachteten Knoten $j \in N^k$ und der Summe der insgesamt verfügbaren Entscheidungsmöglichkeiten in Entscheidungsstufe $i + 1$.

Es erscheint naheliegend, dass eine alleinige flexibilitätsbasierte Entscheidungsfindung für das logistische Verhalten eines Systems nicht zielführend ist. Demnach bedarf es der zusätzlichen Berücksichtigung logistischer Zielgrößen. Die FOS verwendet dafür den in Scholz-Reiter et al. (2005) vorgestellten Queue-Length-Estimator (QLE, dt.: Warteschlangenschätzer), bei dem auf Basis der einzelnen Bearbeitungszeiten der Aufträge die erwartbaren Wartezeiten bis zur Abarbeitung der Warteschlangen an den zur Auswahl stehenden Arbeitsstationen berechnet und diejenige Arbeitsstation mit der kürzesten Wartezeit gewählt wird.

Sei der gerade abgearbeitete Knoten wieder durch k repräsentiert, so weist die logistische Kennzahl A_{kj}^{log} den Nachfolgeknoten $j \in N^k$ eine Attraktivität aus logistischer Sicht mit einer reellen Zahl im Intervall $[0,1]$ zu:

$$A_{kj}^{log} = 1 - \frac{\eta(p_j)}{\sum_{i \in N^k} \eta(p_i)}, \forall j \in N^k \tag{2}$$

Die Funktion $\eta(p_j)$ gibt für die Knoten $j \in N^k$ mit Hilfe des QLE die aktuellen Wartezeiten der zugehörigen Montagestation zurück.

Dem Zielkonflikt zwischen dem Vorhalten von Arbeitsplanflexibilität für den weiteren Bearbeitungsverlauf und opportunistischen Entscheidungen zugunsten einer möglichst kurzen erwarteten Wartezeit wird über eine Gewichtungsfunktion Rechnung getragen. Damit kann die Gesamtattraktivität $A_{G_i k j}$ eines Nachfolgeknotens $j \in N^k$ eines gerade abgeschlossenen Knotens k in Abhängigkeit des aktuellen Graphen G_i und eines vorzugebenden Gewichtungsfaktors α wie folgt angegeben werden:

$$A_{G_i k j}(\alpha) = (1 - \alpha) \cdot A_{kj}^{log} + \alpha \cdot A_{G_i k j}^{flx} \tag{3}$$

Auf diese Weise werden die flexibilitätsbasierte (vgl. Gl. (1)) und die logistisch orientierte (vgl. Gl. (2)) Attraktivität in einer Gesamtattraktivität für die Nachfolgeknoten $j \in N^k$ eines abgearbeiteten Knotens k zusammengeführt. Die Entscheidung über den nächsten zu bearbeitenden Knoten wird nach Abschluss eines Montagevorgangs anhand des höchsten Gesamtattraktivitätswerts getroffen.

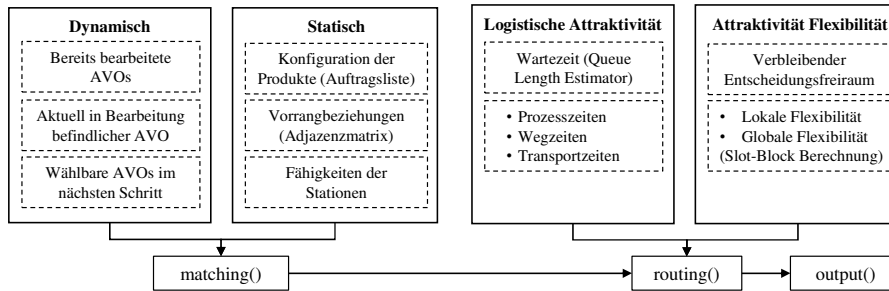


Abbildung 4: Schematische Funktionsweise des implementierten Leitsystems von FOS

Das Funktionsprinzip des Steuerungsleitsystems von FOS ist in Abbildung 4 schematisch abgebildet. Die matching-Funktion ermittelt auf Basis von statischen Eingabedaten und dynamischen Informationen über bereits abgearbeitete AVOs potentielle Nachfolger-AVOs. Im nächsten Schritt wird diesen möglichen AVOs durch eine routing-Funktion eine logistische und flexibilitätsbasierte Attraktivität zugewiesen. Als Ergebnis wird die AVO mit der höchsten Gesamtattraktivität zurück gegeben (output()).

5 Simulative Evaluierung

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der eingeführten Methode wurde ein ereignis-diskretes Materialflusssimulationsmodell eines frei verketteten Montagesystems mit Hilfe der Simulationssoftware AnyLogic (Version 8.4.0) umgesetzt.

Das Modell besteht aus neun Arbeitsstationen mit einer Einzelverfügbarkeit von 96% (Mean Time to Repair=300s), denen jeweils drei AVOs zugeordnet sind. Weiterhin liegt dem Modell neben den beiden bereits aufgezeigten Vorranggraphen ein weiterer ähnlicher Graph zugrunde, der aus Platzgründen an dieser Stelle nicht aufgeführt ist. Als Input für die Simulationsstudie werden vor Bearbeitungsbeginn individualisierte Produkte durch die zufällige Wahl eines der drei Vorranggraphen sowie durch das zufällige Entfernen einzelner AVOs generiert, um ein variantenreiches Produktprogramm abzubilden. Die Dauern einzelner AVOs sind normalverteilt, wobei die Erwartungswerte im Intervall [40s, 200s] liegen und die Standardabweichungen jeweils 15% des Erwartungswertes betragen. Aufträge werden bestandsorientiert, das heißt abhängig vom Umlaufbestand (engl. Work-in-Process oder WIP), freigegeben. Der WIP bezeichnet dabei den freigegebenen Arbeitsvorrat innerhalb des Montagesystems in Vorgabestunden.

Die Simulationszeit beträgt 50 Tage. Zur Sicherstellung unabhängiger Stichprobenwerte wird die Batch-Means-Methode angesichts des vorliegenden nicht terminierenden Systems angewendet. Um autokorrelierte Messwerte zu vermeiden, wird bei der Versuchsauswertung die Batchgröße so gewählt, dass die von Page (1991, S. 132) postulierte maximal zulässige Lag-1-Autokorrelation von $r(1)=0.05$ nicht überschritten wird. Weiterhin wird darauf geachtet, dass sich bei der gewählten Batchgröße ein ausreichend kleines Konfidenzintervall ergibt. Dabei liegt der Betrachtung ein Signifikanzniveau von 5% (t-Verteilung) zu Grunde. Einschwingzeiten wurden grafisch ermittelt und sind nicht in den Statistiken berücksichtigt. Diese Vorgehensweise und der eingeführte Grenzwert der Autokorrelation sind bei der gesamten Versuchsauswertung automatisiert berücksichtigt worden, sodass die statistische Signifikanz der Ergebnisse gegeben ist.

Als Kennzahlen stehen in der Simulationsstudie die Kapazitätsauslastung und die Standardabweichung der relativen Auftragsplanabweichung im Vordergrund. Die zweite Kenngröße trägt der Termintreue als häufig wichtigste logistische Zielgröße und der mit selbststeuernden Systemen assoziierten Unsicherheit durch die Streuung der Durchlaufzeiten Rechnung. Je höher die Standardabweichung der relativen Planabweichung ist, desto schwieriger ist die Bestimmung von Durchlaufzeiten und damit die Angabe und die Einhaltung von Lieferterminen. Die Kapazitätsauslastung dient als Gegenspieler zur Termintreue. Damit wird sichergestellt, dass FOS nicht nur eine veränderte logistische Positionierung innerhalb des Dilemmas der Ablaufplanung (siehe hierzu Lödging (2016)) verursacht, sondern das FOS tatsächlich eine Steigerung der logistischen Effizienz hervorruft.

Die relative Planabweichung berechnet sich durch den Quotienten aus der realen Auftragsdurchlaufzeit und einer Plandurchlaufzeit, die sich aus der Summe der Bearbeitungs-, Transport- und Rüstzeiten zusammensetzt. Variiert wurde in der Simulationsstudie der Parameter WIP, um Szenarios mit unterschiedlich hoher Auslastung zu erzeugen. Außerdem wurde der Gewichtungsfaktor α , der den Grad der Berücksichtigung der Flexibilität steuert, in Schritten von je 0.2 im Intervall [0, 1] variiert. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudie in Form relativer Abweichungen für verschiedene Werte des Gewichtungsfaktors α und des WIP.

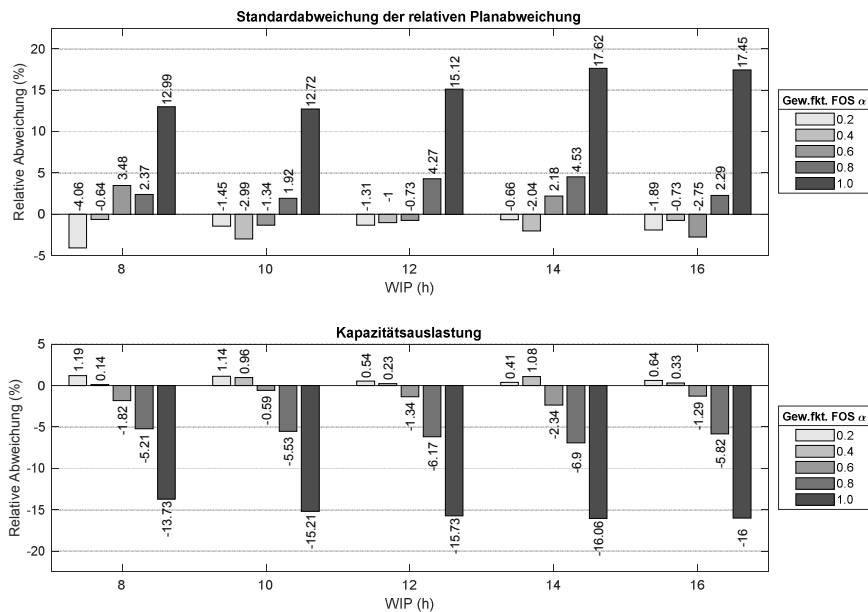


Abbildung 5: Ergebnisse der Materialflusssimulation für die FOS nach WIP und α (Gew. fkt. FOS)

Grundsätzlich ist für beide Kenngrößen eine leichte, jedoch signifikante Verbesserung durch die Berücksichtigung von Arbeitsplanflexibilität für jedes WIP-Niveau festzustellen. Positive Effekte manifestieren sich insbesondere bei Werten des Gewichtungsfaktors $\alpha = 0.2$ bis $\alpha = 0.6$. In diesem Bereich sind Reduzierungen der Standardabweichung der relativen Planabweichung von bis zu 4% sowie einer gleichzeitigen Steigerung der Kapazitätsauslastung von ca. 1,2% beobachtbar. Damit trägt FOS zu einer Verbesserung der Termintreue bei, ohne dass Produktivitätseinbußen in Kauf genommen werden müssen. Diese Leistungssteigerung erscheint insbesondere bei niedrigeren WIP-Niveaus ausgeprägt zu sein. Bei Werten des Gewichtungsfaktors $\alpha > 0.6$ zeigt sich hingegen bei beiden Kenngrößen ein massiver, flächendeckender Leistungsabfall bis zu ca. 17% für die Schwankungen der relativen Planabweichung (Zunahme) und 16% für die Kapazitätsauslastung. Diese Leistungsabnahme verstärkt sich tendenziell mit zunehmendem WIP-Niveau.

Eine verbesserte Nivellierung durch FOS kann nachgewiesen werden. Gleichwohl erscheinen die positiven Effekte von FOS gering auszufallen. Demgegenüber steht, dass FOS ohnehin vorhandene Flexibilitätspotentiale nutzt und damit eine Leistungssteigerung ohne finanziellen Mehraufwand bietet. Auch wenn die Auswirkungen eines veränderten Gewichtungsfaktors α einem scheinbar eindeutigen Schema folgen, bedarf es weiterer Untersuchungen zur Gewährleistung von Leistungssteigerungen durch FOS in unterschiedlichen Produktionssituationen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag schlägt die Flexibilitätsorientierte Selbststeuerung als eine Methode für die Maschinenbelegung in selbststeuernden, frei verketteten Montagesystemen vor. Der Ansatz zielt darauf ab, Entscheidungsfreiräume aus der Arbeitsplanflexibilität für eine verbesserte Systemnivellierung zu nutzen. Der Umfang der zugrundeliegenden Entscheidungsfreiräume wird anhand zwei verschiedener Montagevorranggraphen exemplarisch aufgezeigt. Die simulationsbasierte Evaluierung hat gezeigt, dass FOS die Schwankungen der relativen Planabweichungen bei gleichzeitiger Steigerung der Kapazitätsauslastung reduzieren kann. Damit trägt FOS zu einer erhöhten Planungssicherheit in selbststeuernden, frei verketteten Montagesystemen bei. Weitere Arbeiten werden sich der erweiterten Versuchsdurchführung und der kontextsensitiven Bestimmung des FOS-Gewichtungsfaktors widmen.

Literatur

- Blunck, H.; Windt, K.: Komplexität schafft Spielraum für Selbststeuerung. Werkstatttechnik online 103 (2013) 2, S. 109–113.
- Böse, F.; Windt, K.: Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics. In: Windt, K.; Hülsmann, M. (Hrsg.): Understanding autonomous cooperation and control in logistics. Berlin, New York: Springer 2007, S. 57–72.
- Dixit, D.: Manufacturing Flexibility: Its Need, Type, and Effects. Proceeding of the National Conference on Innovative Developments in Science, Technology & Management (NCIDSTM-2015) (2015) International Journal of Engineering Sciences Paradigms and Researches.
- Martins, L.; Fernandes, N.O.; Varela, M.L.R.: Autonomous Production Control: A Literature Review. In: Machado, J.; Soares, F.; Veiga, G. (Hrsg.): Innovation, engineering and entrepreneurship. Cham: Springer International Publishing 2018, S. 425–431.
- Greschke, P.: Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Dissertation, 2016.
- Gronau, N.: Der angemessene Grad von Autonomie in Cyberphysischen Produktionssystemen. Industrie 4.0 Management 2018 (2018) 6, S. 7–12.
- Grundstein, S.: Fertigungsregelung flexibler Fließfertigungen und Werkstattfertigungen zur Einhaltung von Lieferterminen. Dissertation. Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Dissertation, 2017
- Hofmann, C.; Brakemeier, N.; Krahe, C.; Stricker, N.; Lanza, G.: The Impact of Routing and Operation Flexibility on the Performance of Matrix Production Compared to a Production Line. In: Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): WGP 2018, Advances in Production Research. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 155–165.
- Ten Hompel, M.; Henke, M.: Logistik 4.0. In: Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, S. 615–624.
- Küber, C.: Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage, Universität Stuttgart, Dissertation, 2017.

- Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016.
- Mertens, P.: Fließbandabstimmung mit dem Verfahren der begrenzten Enumeration nach Müller-Merbach. *Ablauf- und Planungsforschung* 8 (1967), S. 429–433.
- Müller, D.; Mieth, C.; Henke, M.: Quantification of Sequencing Flexibility Based on Precedence Graphs for Autonomous Control Methods. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial and Business Engineering - ICIBE' 18*, Macau, New York, USA: ACM Press, 2018, S. 211–220.
- Page, B.: *Diskrete Simulation: Eine Einführung mit Modula-2*. Berlin, Heidelberg: Springer 1991.
- Ramos, C.; Rocha, J.; Vale, Z.: On the complexity of precedence graphs for assembly and task planning. *Computers in Industry* 36 (1998) 1-2, S. 101–111.
- Schmitt, R.; Göppert, A.; Hüttemann, G.: Frei verkettete wandlungsfähige Montage. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): *Internet of Production für agile Unternehmen*. Aachen: Apprimus Verlag 2017, S. 339–368.
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; Beer, C. de; Jagalski, T.: Modelling and Analysis of Autonomous Shop Floor Control. *Proc. of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems* (2005).
- Wiesbeck, M.: *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung*. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München, Dissertation, 2014.
- Zeidler, F.; Müller, D.; Ten Hompel, M.; Henke, M.: WIP-Balancing by autonomous control using flexibility oriented decision-making. In: Zhong R.Y., Dessouky M.I., Xu X. (Hrsg.): *Proceedings of 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*, 2019.