

## **Simulationsbasierte Untersuchung von Prioritäts- und Kommissionierregeln zur Steuerung des Materialflusses in der Blechindustrie**

### ***Simulation-Based Investigation of Priority and Picking Rules for the Control of Material Flows in the Sheet Metal Industry***

Carina Mieth, Nicole Schmid, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG,  
Ditzingen (Germany), carina.mieth@trumpf.com, nicole.schmid@trumpf.com

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

Lutz Sommer, Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Albstadt (Germany),  
sommer@hs-albsig.de

**Abstract:** This article examines the influence of priority and picking rule combinations on the important logistic targets in sheet metal production. First, all rules of intralogistics of sheet metal production are gathered by expert interviews, questionnaires and a detailed literature review. The rules that are relevant for practice, are implemented in a discrete event simulation model. For the simulation experiments, realistic order data for four scenarios are generated based on real-world data. The evaluation of the simulation results shows that the rule combinations have a significant influence on the logistic target variables throughput time and delivery reliability. From the results of the simulation, recommendations for practical applications are derived.

## **1 Einleitung und Problemstellung**

Steigende Anforderungen der Kunden, wie kurze Lieferzeiten und eine hohe Termintreue, führen in Kombination mit sinkenden Losgrößen zu einem erhöhten Anpassungsdruck auf Produktionssysteme der Blechindustrie. Vor allem in Hochlohnländern wie Deutschland sind Blechfertiger kontinuierlich mit der Verbesserung ihrer Produktionsprozesse beschäftigt, um gegen die niedrigen Preise der Konkurrenz aus dem Ausland zu bestehen.

Blechbearbeitungsmaschinen verfügen schon heute über eine sehr hohe Effizienz und Zuverlässigkeit, sodass vor- und nachgelagerte Prozesse das größte Optimierungspotential bieten. Die Steuerung der vor- und nachgelagerten Prozesse erfolgt heute überwiegend regelbasiert über die Kombination von sogenannten

Prioritäts- (engl. priority rules) und Kommissionierregeln (engl. picking rules). Unter Prioritätsregeln versteht man hierbei eine Regel, die für den Fall, dass mehrere Aufträge vor einer Maschine warten, festlegt, welcher der wartenden Aufträge als nächstes bearbeitet wird. Kommissionierregeln beziehen sich darauf, nach welchem Kriterium mehrere Aufträge nach der Bearbeitung an einer Maschine gemeinsam für den Transport auf einen Ladungsträger kommissioniert werden. Die Prioritäts- und Kommissionierregeln werden lokal durch die Produktionsmitarbeiter angewandt und beeinflussen sich gegenseitig. Das komplexe Zusammenwirken der unterschiedlichen Regeln und deren Einfluss auf die relevanten logistischen Kenngrößen Durchlaufzeit und Termintreue ist für den Menschen jedoch nur schwer überschaubar.

Ziel dieses Beitrags ist es daher, die Kombinationen der in der Praxis auftretenden Prioritäts- und Kommissionierregeln auf deren Eignung für die Blechfertigung hinsichtlich der logistischen Leistung simulativ zu evaluieren und daraus Handlungsempfehlungen für die Praxis abzuleiten. Ergebnis dieser Arbeit ist eine Simulationsanwendung, welche den Vergleich verschiedener Regelkombinationen ermöglicht, indem typische Blechfertigungen schnell mit den relevanten regelbasierten Steuerungsmethoden abgebildet werden können.

## 1.1 Vorgehen und Aufbau

Zunächst wurden über eine Literaturrecherche die zehn gängigsten Prioritätsregeln identifiziert. In Experteninterviews und der direkten Begehung von Blechfertigungen wurde diese Auswahl an Prioritätsregeln auf die für die Praxis in der Blechindustrie relevanten sechs Regeln begrenzt und zudem eine Erhebung der in der Praxis vorkommenden Kommissionierregeln angefertigt. Die praxisrelevanten Regeln wurden in einem Simulationsmodell implementiert, welches den sequenziellen Bearbeitungsablauf in einer Blechfertigung allgemein abbildet. Die Untersuchung des Einflusses der Regelkombination auf die Kennzahlen Durchlaufzeit und Termintreue wurde für vier für die Praxis typische Szenarien durchgeführt. Die vier Szenarien sind weiter unten in Tabelle 1 beschrieben und orientieren sich stark an Realdaten aus einem blechspezifischen Produktionsplanungs- und Steuerungssystem des Anwenders. Auf Basis des simulativen Vergleichs der Regelkombinationen wurden Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet, die vor allem in der Beratung von Unternehmen der Blechindustrie hilfreich sind.

## 1.2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Bisherige Arbeiten untersuchten Prioritätsregeln lediglich einzeln oder in Kombination untereinander (Huebl et al., 2013; Niehues, 2016; van Brackel, 2009; Sels et al., 2012; Scholz-Reiter et al., 2009; Herrmann, 2011; Wiendahl et al., 1996), jedoch nie in Kombination mit weiteren Regeln, wie z.B. Kommissionierregeln. Aus der Literatur von Herrmann (2011), Huebl et al. (2013) und Wiendahl et al. (1996) konnten die folgenden Prioritätsregeln als die zehn gängigsten identifiziert werden:

- Längste Wartezeit (First In First Out [FIFO])
- Frühester Fälligkeitstermin (Earliest Due Date [EDD])
- Höchste Priorität (Priority Numbers [PN])
- Kürzeste Pufferzeit (Slack Time Remaining [STR])
- Kürzeste Operationszeit (Shortest Processing Time [SPT])
- Kürzeste Restbearbeitungszeit (Shortest Remaining Processing Time [SRPT])

- Frühester Fertigungseintrittstermin (First In System [FIS])
- Kritisches Verhältnis (Critical Ratio [CR])
- Geringster Umrüstaufwand
- Geringste Anzahl an ausstehenden Operationen

In der Literatur wurden keine Kommissionierregeln für den vorliegenden Anwendungsfall gefunden. Es existiert jedoch Literatur zu ähnlichen Problemstellungen in der Lagerlogistik. Dort gibt es Kommissionierlisten, die dem Logistiker vorgeben, welche Produkte er in welcher Reihenfolge kommissionieren muss. Diese Kommissionierlisten resultieren aus der Lösung eines mathematischen Optimierungsproblems, das als „batching problem“ (Gu et al. 2007) bekannt ist und bei dem die Größe des Batches sowie die Zuordnung von Produkten zu einem Batch variiert werden kann. Die Produkte werden dabei häufig nach der Zugehörigkeit zu einem Kunden gruppiert, da dieses Vorgehen nachgelagerte Prozesszeiten, wie z.B. Sortierzeiten reduziert (Liu 1999). Vor allem, wenn die Kundenaufträge recht groß sind, kann diese sogenannte „single-order picking policy“ sinnvoll sein (De Koster et al. 2007). Werden mehrere Kundenaufträge auf einmal kommissioniert, so unterscheidet man zwischen der „sort-while-pick“ und der „pick-and-sort“ Strategie (Le Duc 2005). Der Unterschied zwischen beiden besteht darin, dass bei der ersten Strategie im Vergleich zur zweiten die Aufteilung des Kundenauftrags auf verschiedene Batches nicht erlaubt ist.

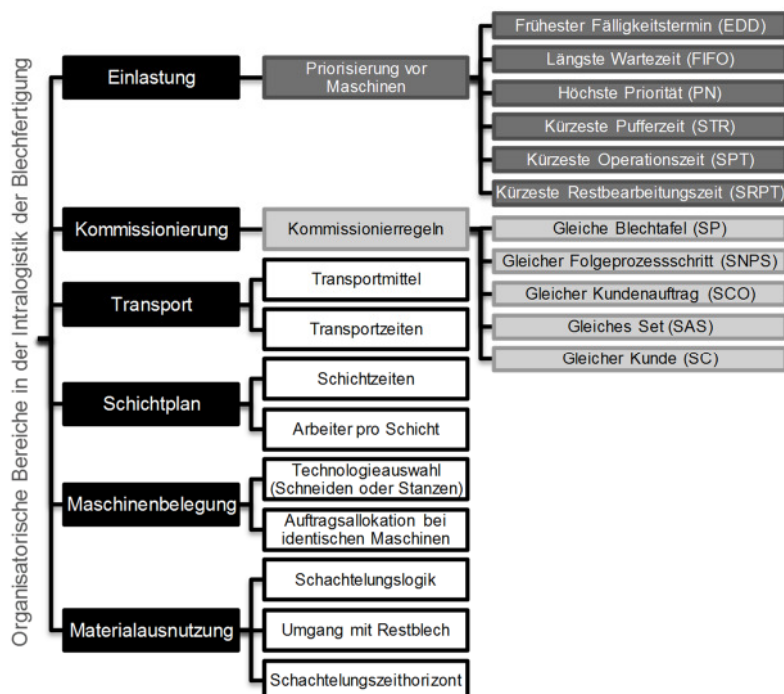
Die strikte Vorgabe der Batches über einer Kommissionierliste, welche aus einer mathematischen Optimierung resultiert, ist in der Blechfertigung nicht analog zur Lagerlogistik umsetzbar. Das liegt daran, dass aufgrund der Fertigungssystem-inhärenten Dynamik (niedriger Automatisierungsgrad) das Kommissionieren nicht zentral im Voraus planbar ist.

Sowohl für die Festlegung der Bearbeitungsreihenfolge für vor der Maschine wartende Aufträge, als auch für die Kommissionierung für den Weitertransport nach der Bearbeitung gilt, dass einfache, für den Menschen verständliche Prioritäts- und Kommissionierregeln benötigt werden. Diese haben den großen Vorteil, echtzeitfähig zu sein (Scholz-Reiter et al., 2009; van Brackel, 2009). Laut Sels et al. (2012) können bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn mehrere Prioritätsregeln gleichzeitig Anwendung finden, anstatt sie einzeln zu verwenden. Die Aussage, welche Regelkombination zu einer guten Systemleistung führt, ist jedoch nicht allgemein für unterschiedliche Fertigungssysteme möglich. Dies hängt vom Anwendungsfall, der Komplexität und dem gewünschten Nutzungsgrad ab (Scholz-Reiter et al., 2009).

## 2 Identifikation der relevantesten Regeln

Abbildung 1 zeigt alle organisatorischen Bereiche einer Blechfertigung, in denen Menschen gemäß bestimmter Regeln auf dem Shop Floor Entscheidungen treffen. Die grau hervorgehobenen Regeln werden in dieser Arbeit untersucht. Von den in dunkelgrau hervorgehobenen Prioritätsregeln finden die obersten drei Prioritätsregeln bereits Anwendung in der Blechfertigung. Laut der befragten Experten ist ein Ziel in der Praxis, zukünftig die Bearbeitungszeit stärker bei regelbasierten Entscheidungen zu berücksichtigen. Daher werden zusätzlich zu den bereits in der Praxis genutzten Regeln noch die Regeln Kürzeste Pufferzeit (STR), Kürzeste Operationszeit (SPT) und Kürzeste Restbearbeitungszeit (SRPT) für die simulative Untersuchung

ausgewählt, sodass insgesamt sechs verschiedene Prioritätsregeln in dieser Arbeit berücksichtigt werden.



**Abbildung 1:** Übersicht über die organisatorischen Bereiche in der Intralogistik der Blechfertigung, in denen Regeln angewendet werden

Die für die Blechindustrie wichtigen Kommissionierregeln (siehe hellgrau markierte Regeln in Abbildung 1) fanden in der Literatur bisher keine Berücksichtigung. Eine im Anwenderunternehmen im Jahr 2015 durchgeführte, nicht veröffentlichte Studie bei 30 Referenzunternehmen hat die folgenden für die Blechfertigung relevanten Kommissionierregeln erhoben:

- Gleiche Blechtafel (Same Panel [SP]): alle Blechteile, die aus der gleichen Blechtafel herausgetrennt wurden, werden zusammen kommissioniert.
- Gleicher Folgeprozessschritt (Same Next Process Step [SNPS]): alle Blechteile, die den gleichen nächsten Folgeprozessschritt haben, werden zusammen kommissioniert, unabhängig von der Zugehörigkeit zu einem Kunden.
- Gleicher Kundenauftrag (Same Customer Order [SCO]): alle Blechteile eines Kundenauftrags (selbes Produkt), werden gemeinsam kommissioniert. Diese Regel ist vergleichbar mit der „single-order picking policy“ aus der Lagerlogistik.
- Gleiches Set (Same Set [SAS]): alle Blechteile, die zu einem Set gehören, werden gemeinsam kommissioniert. Ein Set stellt dabei eine Teilmenge der Blechteile, die zu einem Produktauftrag gehören, dar. Beispiele dafür sind ein Lackier-Set oder ein Schweiß-Set.

- Gleicher Kunde (Same Customer [SC]): alle Blechteile, die zu einem Kunden gehören, werden gemeinsam kommissioniert, unabhängig davon, ob sie zum gleichen Produkt oder zur gleichen Bestellung gehören.

Alle fünf vorgestellten Kommissionierregeln wurden in den Experteninterviews erneut bestätigt, da sie nach der oben genannten Studie auch im blechspezifischen Produktionsplanungs- und Steuerungssystem des Unternehmens als Vorschläge für die Anwender hinterlegt wurden.

### 3 Implementierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine ereignisdiskrete Simulationsanwendung mithilfe des Simulationsframeworks AnyLogic 8 implementiert. Das Modell der Blechfertigung besteht aus den fünf Prozessschritten Flachbearbeitung, Entgraten, Biegen, Kommissionieren und Schweißen. Diese Prozessschritte sind so abgebildet, dass ein relativer Vergleich der Regelkombinationen ermöglicht wird.

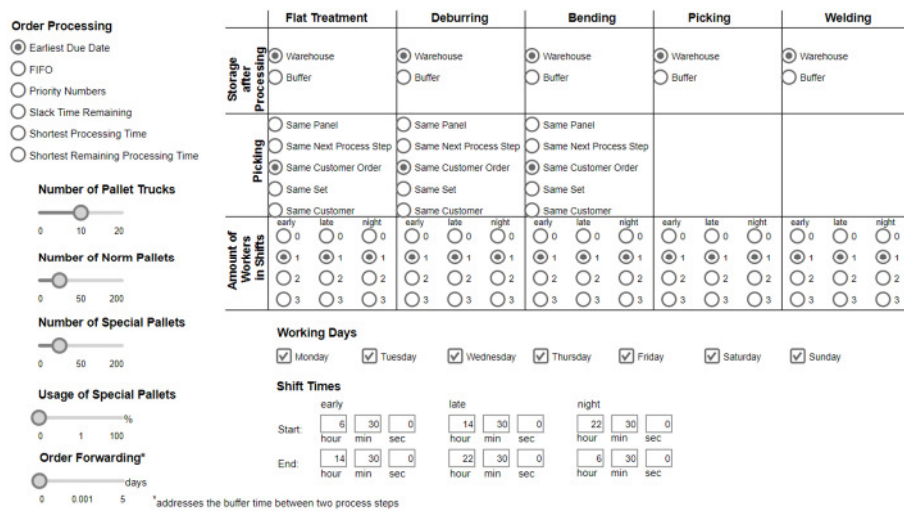


Abbildung 2: Start-Benutzeroberfläche der Simulationsanwendung

Über die in Abbildung 2 dargestellte Benutzeroberfläche ist es möglich, zu Beginn eines Simulationsexperiments verschiedene Parameter zu definieren und damit typische Blechfertigungen mit all ihren Eigenschaften und Ressourcen abzubilden. Alle Parameter aus der Benutzeroberfläche werden zu Beginn eines Simulationsexperiments an das Simulationsmodell übergeben. Die anzuwendende Prioritätsregel kann im Parameter "Order Processing" ausgewählt werden und wird dann auf alle Prozessschritte angewandt. Die Kommissionierregel kann individuell für jede Maschine über den Parameter „Picking“ definiert werden, wird jedoch im Rahmen der Experimente für jede Maschine immer gleich gewählt. Die Anzahl der verfügbaren Paletten und Gabelstapler sowie die Anzahl verfügbarer Mitarbeiter und deren Schichtplan sind über weitere Eingabeparameter definierbar. Die Auswahl des (booleschen) Parameters „Storage after Processing“ ermöglicht es, eine zusätzliche

Rücklagerung zwischen den Prozessschritten in ein Turm- („Warehouse“) oder Flächenlager („Buffer“) zu berücksichtigen.

Es wurden folgende Annahmen bei der Modellierung und dem Experimentdesign getroffen:

- Alle Wegzeiten zwischen den unterschiedlichen Stationen sind gleich und werden in diesem Modell vernachlässigt. Diese Annahme ist vertretbar, da die Wegzeiten in der Realität einen verschwindend geringen Einfluss auf die DLZ haben und zudem kaum variieren.
- Es gibt keine parallelen Maschinen. Folglich werden keine Regeln zur Maschinenbelegung berücksichtigt.
- Es wird kontinuierlich gearbeitet, damit Pausenzeiten die Arbeitsabläufe und somit die Durchlaufzeiten der einzelnen Fertigungsaufträge beim Vergleich der Regeln nicht beeinflussen. Es werden alle Aufträge aus den erzeugten Auftragsdaten abgearbeitet, bevor das Experiment beendet ist.
- Die Maschinenverfügbarkeit wird mit 100% angenommen.
- Die Kapazität der Ladungsträger ist unendlich.

### 3.1 Erzeugung der Auftragsdaten für die Experimente

Für die Simulationsexperimente wurden in Anlehnung an Realdaten von Blechfertigungen, die das blechspezifische Produktionsplanungs- und Steuerungssystem des untersuchten Unternehmens benutzen, vier Datensätze erzeugt. Jeder dieser Auftragsdatensätze enthält 500 Produktionsaufträge unterschiedlicher Losgröße, verteilt auf 289 Blechtafeln (siehe Tabelle 1). Die erzeugten 500 Produktionsaufträge wurden dabei zufällig auf 269 Kundenaufträge verteilt. Die Parametrisierung der Bearbeitungszeiten der Produktionsaufträge für die einzelnen Maschinen sowie das Verhältnis von 500 Produktions- zu 269 Kundenaufträgen erfolgte auf Basis der aus den Realdaten ermittelten Mittelwerte. Die untersuchten Auftragsdatensätze spiegeln die gängigsten Kundenszenarien wieder. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Generierung von Jobs und der Verwendung von Prioritätszahlen (siehe Tabelle 1).

Ein Job bezeichnet in der Blechfertigung die geometrische Verschachtelung von Produktionsaufträgen auf Blechtafeln zur besseren Materialausnutzung. Am häufigsten werden mehrere Produktionsaufträge entsprechend dem Fälligkeitstermin (Szenario 1 & 2) zu solchen Jobs zusammengefasst, manchmal jedoch auch nach Kundenauftrag (Szenario 3) oder Eingangstermin (Szenario 4). Der Fälligkeitstermin wurde festgelegt, indem auf den Starttermin eine geschätzte Durchlaufzeit gemäß einer aus den Kundendaten ermittelten Normalverteilung mit einem Mittelwert von zehn Tagen und einer Standardabweichung von elf Tagen addiert wurde. Der Fälligkeitstermin ergibt sich in der Praxis meist auf Basis des Kundenlieferterminwunsches.

Soll eine priorisierte Behandlung von Aufträgen möglich sein, werden Produktionsaufträgen für die Steuerung Prioritätszahlen zugewiesen. Die Untersuchung der Realdaten hat gezeigt, dass nur sehr wenige Unternehmen Prioritätszahlen verwenden. Deshalb wird in den Szenarien 2 und 3 ebenfalls keine Priorisierung von Aufträgen vorgenommen. In Szenario 4 wird die Priorisierung nur in seltenen Fällen angewandt, z.B. wenn ein wichtiger Auftrag mit frühzeitigem Fälligkeitstermin bald fertiggestellt werden muss (Eilauftrag). Um den Einfluss einer

starken Priorisierung auf die Leistung der Regeln zu untersuchen, wird im Szenario 1 ein großer Anteil an Aufträgen priorisiert. Insgesamt wurden für jeden der vier Stereotypen jeweils alle möglichen Regelkombinationen aus den sechs Prioritätsregeln und den fünf Kommissionierregeln simuliert. Es wurden 120 Simulationsexperimente durchgeführt, da das Modell keine Stochastik enthält.

*Table 1: Übersicht über die vier untersuchten Szenarien*

| Szenario            | Generierung der Jobs nach | Verwendung von Prioritätszahlen |
|---------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Auftragsdatensatz 1 | Fälligkeitstermin (FT)    | 23% zufällige Eilaufträge       |
| Auftragsdatensatz 2 | Fälligkeitstermin         | keine                           |
| Auftragsdatensatz 3 | Kundenauftrag             | keine                           |
| Auftragsdatensatz 4 | Eingangstermin            | 15% Eilaufträge gemäß FT        |

#### 4 Ergebnisse des simulativen Vergleichs der Regeln

Die Regelkombinationen wurden für die vier Szenarien hinsichtlich ihrer logistischen Zielerreichung für Liefertreue und Durchlaufzeit untersucht. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse für den Median der Durchlaufzeit und in Abbildung 4 der Anteil der pünktlichen Aufträge für jede Regelkombination in jedem Szenario dargestellt.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass sich die besten Ergebnisse mit den Prioritätsregeln Frühester Fälligkeitstermin (EDD) und Kürzeste Operationszeit (SPT) erzielen lassen. Welche der beiden Prioritätsregeln bevorzugt werden soll, hängt von der als wichtiger betrachteten logistischen Zielgröße, der realistischen Definition von Fertigstellungsterminen und der Auslastung an den Maschinen ab. Bei voller Auslastung (Szenario 2) oder Überlastung (Szenario 1 und 4) der Produktion gewährleistet die SPT-Prioritätsregel eine gute Liefertreue, wohingegen die EDD-Prioritätsregel eine gute Liefertreue gewährleistet, wenn es möglich ist, alle Aufträge termingerecht zu produzieren (Szenario 3). Beide Prioritätsregeln zeigten in Kombination mit den Kommissionierregeln Gleicher Folgeprozessschritt (SNPS) und Gleicher Kundenauftrag (SCO) die besseren Ergebnisse. Vor allem die Leistung mit einer gewählten Kommissionierregel hängt stark von der Maschinenauslastung der nachfolgenden Maschine ab, da die folgende Maschine aufgrund zu großer Kommissioniermengen der vorherigen Maschine vorübergehend leerlaufen kann.

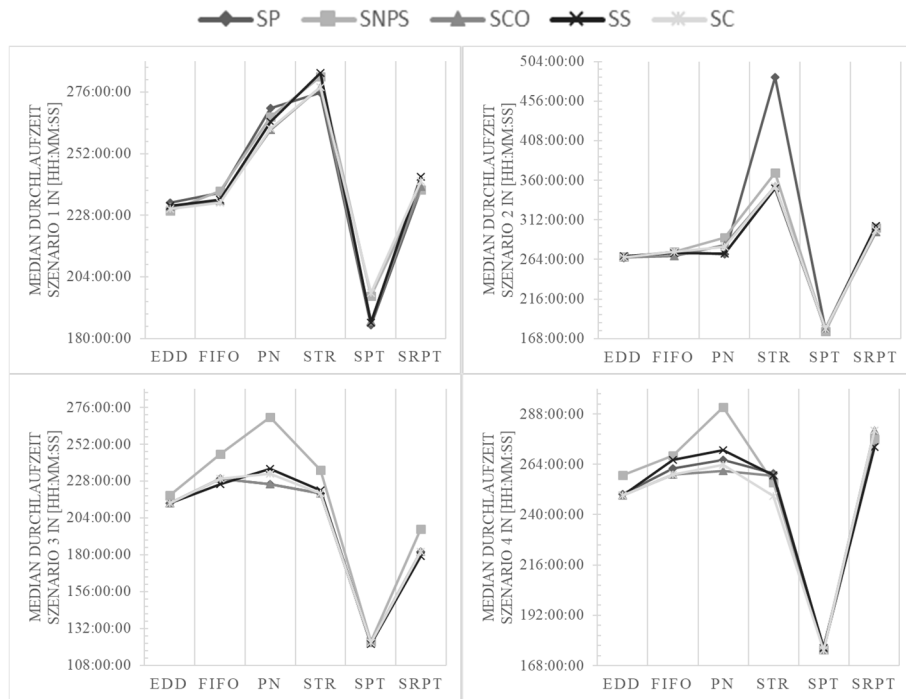


Abbildung 3: Median der Durchlaufzeiten der Aufträge für die vier Szenarien

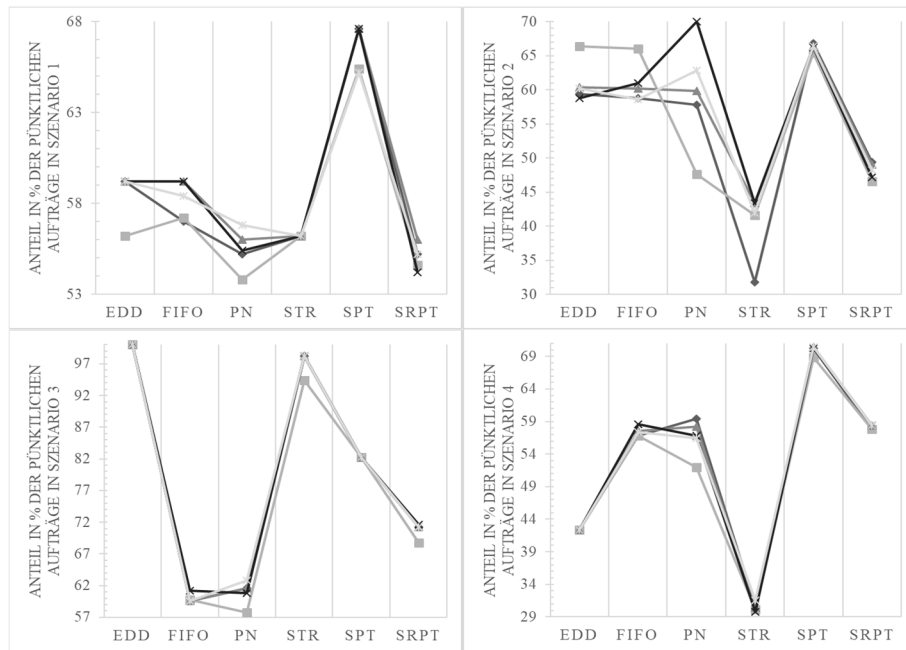


Abbildung 4: Anteil der pünktlichen Aufträge in den vier Szenarien



Die Kommissionierregel Gleicher Kunde (SC) wird auf Basis der Simulationsergebnisse nicht empfohlen, da sie Aufträge sammelt, die abgesehen vom selben Kunden in der Fertigung nicht miteinander in Beziehung stehen. Zudem können sich die Liefertermine der verschiedenen Aufträge eines Kunden unterscheiden, was sich vor allem nachteilig auf die Einhaltung der Termine der Bestellung mit dem früheren Fertigstellungstermin auswirkt. In Kombination mit den Prioritätsregeln EDD werden akzeptable Ergebnisse erzielt, da diese Regel dem oben beschriebenen Effekt entgegenwirkt.

Die Kommissionierregel Gleiche Blechtafel (SP) wird nicht empfohlen, da die hierbei kommissionierten Aufträge nichts außer der gemeinsamen Bearbeitung beim Laserschneiden zu Beginn des Produktionsprozesses gemeinsam haben. Daher führt diese Kommissionierregel, insbesondere in Kombination mit den Prioritätsregeln Längste Wartezeit (FIFO) und Höchste Priorität (PN), zu schlechten Ergebnissen, da in diesem Fall die Aufträge einer Blechtafel noch nacheinander auf den folgenden Maschinen bearbeitet werden und so häufig aufeinander warten müssen.

Die Kommissionierregel Gleiches Set (SAS) liefert in den meisten Fällen keine besonders guten Ergebnisse. Das lässt sich über den geringen Anteil der zu einem Set zugehörigen Aufträge in den erzeugten Auftragsdaten erklären. Die Regel ist so implementiert, dass alle nicht zu einem Set gehörenden Aufträge solange zusammen kommissioniert werden, bis ein Auftrag eintrifft, der wirklich zu einem Set gehört. Erst dann stehen die kommissionierten Aufträge ohne Set-Zugehörigkeit für den nächsten Prozessschritt zur Verfügung. In zukünftigen Experimenten sollte daher der Anteil an Sets bei der Erzeugung der Testdaten berücksichtigt werden, da die Definition von Sets eine wichtige Grundlage für eine rüstopimierte Produktion ist.

Der Nachweis, dass sich die überwiegende Anzahl an verschiedenen Regeln untereinander beeinflussen, wurde mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test erbracht. Bei den Kommissionierregeln unterscheiden sich 49 von 60 (81,67%) der möglichen Regelkombinationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% und bei den Prioritätsregeln sind es 54 von 75 (72%) möglichen. Zusätzlich wurden die größten prozentualen Abweichungen der Durchlaufzeiten und der Termintreue bei der Verwendung unterschiedlicher Prioritäts- und Kommissionierregeln berechnet und in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2:** Größte prozentuale Abweichung der Durchlaufzeit (DLZ) bzw. Termintreue (TT) bei unterschiedlichen Prioritätsregeln und Kommissionierregeln

| Betrachtungsgröße / Szenario   | größte prozentuale Abweichung |       |       |      |
|--|-------------------------------|-------|-------|------|
|  | 1                             | 2     | 3     | 4    |
| für die Mediane der DLZ bei unterschiedlichen <i>Prioritätsregeln</i>    | 52 %                          | 172 % | 119 % | 66 % |
| für die Mediane der DLZ bei unterschiedlichen <i>Kommissionierregeln</i> | 7 %                           | 38 %  | 19 %  | 12 % |
| für die TT bei unterschiedlichen <i>Prioritätsregeln</i>                 | 13 %                          | 35 %  | 42 %  | 40 % |
| für die TT bei unterschiedlichen <i>Kommissionierregeln</i>              | 3 %                           | 22 %  | 5 %   | 7 %  |

## 5 Fazit

Dieser Beitrag hat gezeigt, dass durch die situationsabhängige Auswahl und Kombination von Prioritäts- und Kommissionierregeln die Durchlaufzeit und Liefertreue in einer Blechfertigung optimiert werden können. Zudem wurde nachgewiesen, dass sich Prioritäts- und Kommissionierregeln wechselseitig beeinflussen. Welche Prioritätsregel in einem Produktionsszenario die beste logistische Leistung erzielt, hängt folglich nicht nur von der Auslastung ab, sondern auch von der verwendeten Kommissionierregel.

Um zukünftig die Auswahl von Prioritäts- und Kommissionierregeln für die Praxis zu erleichtern, fokussieren sich weitere Arbeiten auf die Ableitung von Entscheidungsbäumen aus den Ergebnissen der Simulationsexperimente. Dazu wird das Modell der Blechfertigung um alternative Produktionspfade erweitert, damit die Maschinenbelegung bei vorhandener Routingflexibilität ebenfalls berücksichtigt werden kann. Außerdem werden die Szenarien so erweitert, dass unterschiedliche Auslastungen nicht mehr nur implizit enthalten sind. In weiteren Simulationsexperimenten kann auch eine flexiblere Variation der Regeln für jede Station in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus sollten anstelle der Mittelwerte der Prozesszeiten Wahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit der Regeln in einem stochastischen Umfeld zu untersuchen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem, die in dieser Arbeit identifizierten Regeln aus den Bewegungsdaten eines Echtzeitortungssystems abzuleiten. Diese Information könnte dann für die Erstellung von Simulationsmodellen und in der Beratung beim Kunden eingesetzt werden.

## Literatur

- De Koster, R., Le-Duc, T., and Roodbergen, K.J.: Design and control of warehouse order picking: a literature review. *European Journal of Operational Research* 182 (2007) 2, S. 481–501.
- Gu, J.; Goetschalckx, M.; McGinnis, L. F.: Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European journal of operational research*, 177 (2007) 1, S. 1-21.
- Herrmann, F.: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise von Verfahren und Parametern. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / Springer Fachmedien 2011.
- Huebl, A.; Jodlbauer, H.; Altendorfer, K.: Influence of dispatching rules on average production lead time for multi-stage production systems. *International journal of production economics* 144 (2013) 2, S. 479–484.
- Le-Duc, T.: Design and control of efficient order picking processes, Dissertation Erasmus University Rotterdam, Erasmus Research Institute of Management, 2005.
- Liu, C.; Clustering techniques for stock location and order-picking in a distribution center. *Computers & Operations Research* 26 (1999) 10-11, S.989–1002.

- Niehues, M.R.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgenbildung, Dissertation Technical University of Munich, Department of Mechanical Engineering, 2016.
- Scholz-Reiter, B.; Heger, J.; Hildebrandt, T., 2009: Analysis And Comparison Of Dispatching Rule-Based Scheduling in Dual-Resource Constrained Shop-Floor Scenarios. In: Ao, S. I.; Douglas, C.; Grundfest, W. S.; Burgstone, C. (Hrsg.): Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2009 (WCECS 2009), San Francisco (USA), 20-22 October 2009, S. 921-927.
- Sels, V.; Gheysen, N.; Vanhoucke, M.: A comparison of priority rules for the job shop scheduling problem under different flow time- and tardiness-related objective functions. *International Journal of Production Research* 50 (2012) 15, S. 4255–4270.
- van Brackel, T.: Adaptive Steuerung von flexiblen Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen. Wiesbaden: Gabler 2009.
- Wiendahl, H.-P.; Mertens, P.; Eversheim, W.: Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Hütte. Berlin, Heidelberg: Springer 1996.