

Produktivität vs. Termintreue

Logistikorientierte Auftragsreihenfolgebildung für mehrstufige Produktionsprozesse

Melissa Seitz¹, Jonas Mayer¹, Alexander Mütze¹, Peter Nyhuis¹

1) Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover

Die logistische Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit einer Produktion werden durch die Auftragsreihenfolgebildung beeinflusst. Mathematische Modelle zur Beschreibung der Auswirkungen verschiedener Reihenfolgeregeln auf logistische Zielgrößen einzelner Arbeitssysteme können zur Ableitung von Reihenfolgestrategien für mehrstufige Produktionen genutzt werden. Die Festlegung der Strategie erfolgt dabei durch eine bewusste Positionierung im Spannungsfeld zwischen Produktivität und Termintreue.

1. Einleitung

Produzierende Unternehmen sind zunehmend gefordert, eine hohe Vielfalt an Produktvarianten bei gleichzeitig wachsenden Kundenanforderungen an Lieferzeit und Liefertermintreue am Markt anzubieten. Diesen Anforderungen bei möglichst geringen Kosten gerecht zu werden, stellt eine zentrale logistische Herausforderung für produzierende Unternehmen dar [1]. Zur Generierung von Produktivitätssteigerungen in der industriellen Produktion stehen insbesondere nicht-wertschöpfende Prozesse, wie beispielsweise das Rüsten von Arbeitssystemen, im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen und industrieller Optimierungsprozesse. Sofern die Rüstzeiten beim Auftragswechsel in der Produktion abhängig von der Bearbeitungsreihenfolge sind und sich nicht durch technologische oder organisatorische Maßnahmen vermeiden lassen, kann eine Reduzierung von Rüstaufwänden durch die Bildung von rüstopimalen Auftragsreihenfolgen an Arbeitssystemen erreicht werden. [2] Diese Vertauschung der Auftragsreihenfolge führt zu einer aufeinanderfolgenden Bearbeitung von Aufträgen, die ähnliche Rüstanforderungen aufweisen. Die hierdurch erzielbare Reduzierung des Rüstaufwandes bei der Auftragsbearbeitung führt zu einer Erhöhung der Produktivität des Arbeitssystems. [2,3] Die durch die Bildung einer rüstopimalen Auftragsreihenfolge erzielbaren Produktivitätsgewinne werden jedoch durch eine negative Veränderung des Terminverhaltens des Arbeitssystems begleitet, da aus einer derartigen Reihenfolgebildung eine Erhöhung der Terminabweichungstreuung im Abgang des Arbeitssystems resultiert. Als Folge wird die Termintreue als weitere zentrale Zielgröße eines Arbeitssystems unmittelbar negativ beeinflusst [2, 4, 5]. Im Vergleich zu rüstopimalen Reihenfolgeregeln führen terminorientierte Reihenfolgeregeln aufgrund der Verringerung der Terminabweichungstreuung im Abgang von Arbeitssystemen zu einer positiven Beeinflussung der Termintreue. Eine Auftragsreihenfolgebildung gemäß einer First-In/First-Out-Logik (FIFO-Reihenfolgeregel) führt zu keiner Veränderung des Terminabweichungsverhaltens im Abgang des betrachteten Arbeitssystems [5]. Die Reduzierung von Rüstaufwänden und die damit verbundene Erhöhung der Produktivität sind jedoch weder durch eine FIFO-Reihenfolgebildung noch durch eine terminorientierte Reihenfolgebildung realisierbar. [2,3]

Die Auftragsreihenfolgebildung im Rahmen der Auftragsbearbeitung erfolgt somit innerhalb eines Spannungsfelds zwischen der kostenorientierten Zielgröße Produktivität und der leistungsorientierten Zielgröße Termintreue [2, 4]. Aufgrund der hohen Relevanz der Termintreue als eine der wichtigsten Kenngrößen zur Beurteilung der logistischen Leistungsfähigkeit [8] sowie des Einflusses der Produktivität auf die Wirtschaftlichkeit ist eine zielorientierte Positionierung im beschriebenen

Spannungsfeld durch die Auswahl geeigneter Reihenfolgeregeln bei der Planung und Steuerung von Produktionssystemen von großer Bedeutung [2, 4, 5, 7].

2. Auftragsreihenfolgebildung an Arbeitssystemen

Reihenfolgeregeln für die Bildung von Auftragsreihenfolgen an Arbeitssystemen legen die Priorität fest, mit der Aufträge an einem Arbeitssystem abgearbeitet sind. Durch diese nach spezifischen Kriterien erfolgende Priorisierung wird die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge festgelegt. Dies kann einerseits dazu führen, dass gegenüber der ursprünglich durch die Produktionsfeinplanung vorgesehenen Plan-Auftragsreihenfolge Abweichungen erzeugt werden. Andererseits können bestehende, durch Vorgängerprozesse verursachte Abweichungen zum Teil kompensiert werden [3].

In der industriellen Praxis werden für die Bildung von Auftragsreihenfolgen häufig einfache arbeitsplatzbezogene Priorisierungsregeln angewendet [9]. Am häufigsten kommen dabei die FIFO-Reihenfolgeregel sowie Regeln zur Bildung terminorientierter sowie rüstoptymaler Auftragsreihenfolgen zum Einsatz [10]. Bei Anwendung der FIFO-Reihenfolgeregel werden die Aufträge nach der tatsächlichen Ist-Reihenfolge im Auftragszugang eines Arbeitssystems abgearbeitet. Folglich werden die Aufträge mit der höchsten Wartezeit am höchsten priorisiert. Terminorientierte Reihenfolgeregeln berücksichtigen bei der Auftragspriorisierung die im Rahmen der Feinplanung festgelegten Plan-Fertigstellungs- bzw. Plan-Abgangstermine.

Eine der bekanntesten terminorientierten Reihenfolgeregeln ist die früheste Plan-Abgangsterminregel (FPA). Die FPA-Reihenfolgeregel weist aus allen wartenden Aufträgen dem Auftrag mit dem frühesten Plan-Abgangstermin die höchste Priorität zu [11-13].

Rüstoptymale Reihenfolgeregeln haben hingegen die Reduzierung von Rüstzeiten und Rüstkosten zum Ziel. Die Bildung rüstoptymaler Auftragsreihenfolgen ist somit nur dann von Bedeutung, wenn im bestehenden Auftragspektrum reihenfolgeabhängige Rüstzeiten vorliegen [3]. Für eine weiterführende Beschreibung verschiedener Regeln zur Bildung von rüstoptymalen Auftragsreihenfolgen sei an dieser Stelle auf [2, 11, 14, 15, 16] verwiesen.

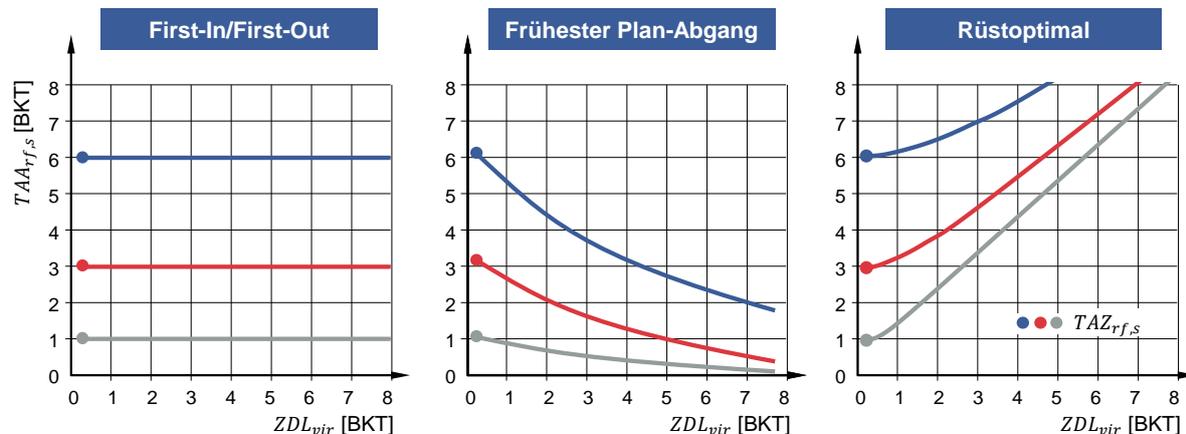
3. Einfluss von Reihenfolgeregeln auf die Terminabweichung und Produktivität eines Arbeitssystems

Zur quantitativen Beschreibung des logistischen Systemverhaltens von Arbeitssystemen haben sich u.a. die am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) entwickelten logistischen Modelle etabliert. Logistische Modelle zeichnen sich durch deduktiv hergeleitete, mathematische Gesetzmäßigkeiten aus. Ggf. werden sie gezielt mit empirisch abgeleiteten Näherungsfunktionen und -parametern kombiniert, um spezielle Einflussgrößen, die auf reale Systeme wirken, berücksichtigen zu können [17].

Für die Reihenfolgeregeln FIFO und FPA sowie die rüstoptymale Auftragsreihenfolgebildung entwickelte BERTSCH logistische Wirkmodelle, die unter Berücksichtigung struktureller Größen das Terminabweichungsverhalten beschreiben. In der Modellierung wird zwischen reihenfolgebedingter und rückstandsbedingter Terminabweichung differenziert [5].

Das Terminabweichungsverhalten eines Arbeitssystems kann durch die Verteilung der Terminabweichung im Abgang sowie über die Verteilungskennzahlen mittlere Terminabweichung und Streuung der Terminabweichung beschrieben werden. Im Falle einer auftragszeitunabhängigen Reihenfolgebildung (FIFO, FPA, rüstoptymal) führt an einem Arbeitssystem jede Beschleunigung eines Auftrags in Folge einer Reihenfolgevertauschung zu einer entsprechenden Verzögerung eines oder mehrerer anderer Aufträge. Folglich ist die mittlere reihenfolgebedingte Terminabweichung stets null und hat somit keinen Einfluss auf die mittlere Terminabweichung im Abgang des Arbeitssystems [5, 18]. Die reihenfolgebedingte Terminabweichungsstreuung im Abgang eines Arbeitssystems ist dagegen von der reihenfolgebedingten Terminabweichung abhängig [5]. Aus diesem Grund wird zur

Beschreibung des Einflusses der genannten Reihenfolgeregeln auf das Terminabweichungsverhalten ausschließlich die reihenfolgebedingte Terminabweichungsstreuung im Abgang eines Arbeitssystems betrachtet.



$TAA_{rf,s}$ Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Abgang
 $TAZ_{rf,s}$ Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang

ZDL_{vir} Virtuelle Durchlaufzeit
 BKT Betriebskalendertage

Bild 1 - Iso-Kurven zur Abbildung der Wirkzusammenhänge zwischen verwendeter Reihenfolgeregel, virtueller Durchlaufzeit und Abgangsterminabweichungsstreuung [4, 5, 7]

Im Rahmen jüngster Forschungsarbeiten am IFA wurden Modelle zur quantitativen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Bestand an einem Arbeitssystem und der resultierenden Streuung der Abgangsterminabweichung in Abhängigkeit der verwendeten Reihenfolgeregel entwickelt [vgl. 2, 5, 7]. Mittels einer Parameterstudie wurden diese Zusammenhänge für eine FIFO-, FPA- und rüstoptimale Auftragsreihenfolgebildung untersucht und in Form von Iso-Kurven in eine mathematische, quantitative Beschreibung überführt [4, 5, 7], siehe Bild 1.

In diesen Modellen stellt die mittlere virtuelle Durchlaufzeit die Stellgröße dar. Die mittlere virtuelle Durchlaufzeit entspricht dem Quotienten des mittleren Auftragsbestands und der ungewichteten mittleren Leistung gemessen in Anzahl fertig gestellter Aufträge pro Betriebskalendertag. Somit beschreibt sie, wie lange sich ein Auftrag im Mittel im Auftragsbestand eines Arbeitssystems befindet [17]. Durch logistische Maßnahmen, wie beispielsweise die Auswahl und Parametrierung des Auftragsfreigabeverfahrens, kann beispielsweise der der Auftragsbestand und somit auch die virtuelle Durchlaufzeit beeinflusst werden [3, 17].

Bei einer Reihenfolgebildung nach der FIFO-Regel treten gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 2 an dem Arbeitssystem keine Reihenfolgevertauschungen auf. Folglich wird an dem Arbeitssystem keine reihenfolgebedingte Terminabweichung erzeugt, weshalb die reihenfolgebedingte Abgangsterminabweichung der reihenfolgebedingten Zugangsterminabweichung entspricht. Werden an einem Arbeitssystem jedoch terminorientierte oder rüstoptimale Auftragsreihenfolgen gebildet, kommt es im Vergleich zum Auftragszugang zu Vertauschungen der Auftragsreihenfolgen. Aus der mathematischen Beschreibung dieser Reihenfolgevertauschungen kann eine reihenfolgebedingte Terminabweichungsverteilung für das betrachtete Arbeitssystem berechnet werden. [5] Für eine detaillierte Beschreibung der Abhängigkeit der reihenfolgebedingten Terminabweichungsstreuung in Abhängigkeit des Bestandes an einem Arbeitssystem für terminorientierte sowie rüstoptimale Auftragsreihenfolgen sei an dieser Stelle auf [2, 4, 5, 7] verwiesen.

Der durch die Bildung von rüstoptimalen Auftragsreihenfolgen erzielbare Produktivitätsgewinn an einem Arbeitssystem kann gemäß verschiedener Arbeiten von NYHUIS und MAYER ebenfalls modellbasiert quantitativ beschrieben werden [2, 4, 7]. Der mittels rüstoptimaler Reihenfolgebildung

erzielbare Produktivitätsgewinn und die Auswirkungen einer rüstopimalen Reihenfolgebildung auf die Terminabweichungstreuung im Abgang eines Arbeitssystems können einander gegenübergestellt werden und ermöglichen so eine Positionierung im beschriebenen Zielkonflikt zwischen Produktivität und Terminabweichung [2, 4, 7] siehe Bild 2.

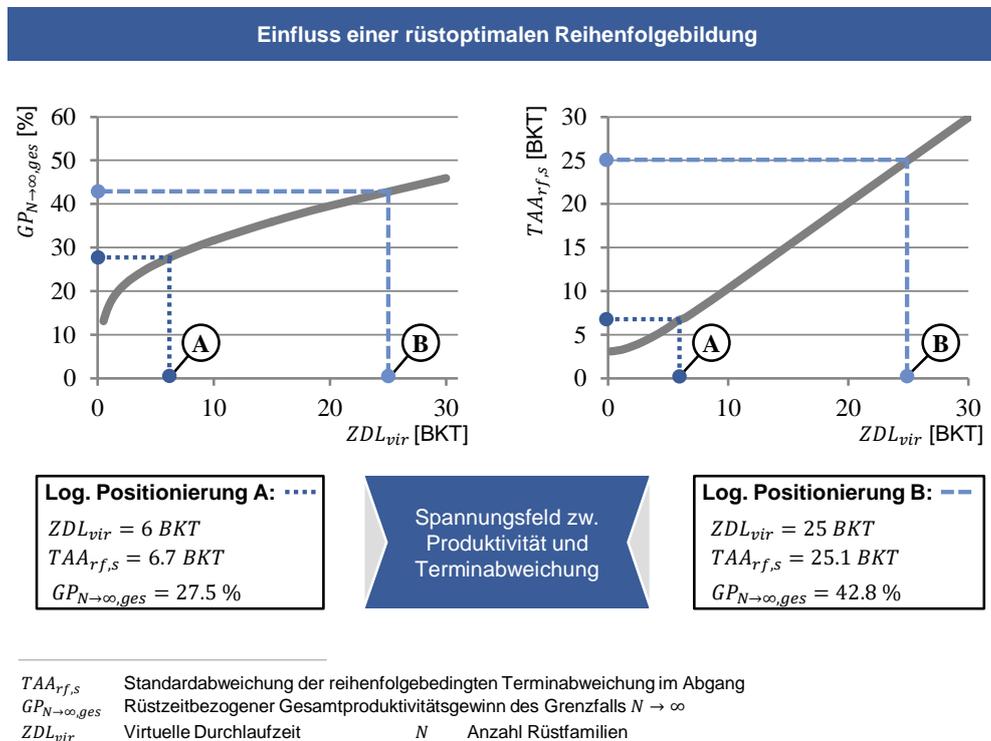


Bild 2 - Beispielhafte Anwendung des Wirkmodells zur Positionierung im Zielkonflikt zwischen Produktivität und Terminabweichung [7]

4. Ableitung von Reihenfolgestrategien für mehrstufige Produktionen

Eine auf den in Abschnitt 3 aufgezeigten Forschungsergebnissen basierende Entwicklung eines Modells zur Festlegung einer logistikorientierten Reihenfolgestrategie für Produktionsbereiche mit mehreren verschiedenen Arbeitssystemen ist das Ziel aktueller Forschungsarbeiten. Die Ermittlung der Reihenfolgestrategie erfolgt dabei im aufgezeigten Spannungsfeld zwischen Produktivität und Termintreue. Dafür sind folgende Voraussetzungen erforderlich: Zum einen die Kenntnis des durch rüstopimale Reihenfolgeregeln erzielbaren Produktivitätsgewinns einzelner Arbeitssysteme sowie der resultierenden negativen Effekte in Bezug auf das Terminabweichungsverhalten im Abgang von Arbeitssystemen. Zum anderen die Kenntnis der Auswirkungen einer Reihenfolgebildung nach der FIFO- oder der terminorientierten FPA-Reihenfolge auf das Terminabweichungsverhalten zur Bewertung von alternativen Möglichkeiten der Reihenfolgebildung.

Im Rahmen eines Erkenntnistransferprojektes erfolgt daher gemeinsam mit dem Anwendungspartner Koenig & Bauer Industrial AG & Co. KG die Anpassung, Weiterentwicklung und Nutzung logistischer Modelle zur Beschreibung der genannten Zusammenhänge für einzelne Arbeitssysteme im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen und Rahmenbedingungen aus der industriellen Praxis. Basierend auf der logistischen Bewertung der Auswirkungen verschiedener Reihenfolgeregeln auf die Terminabweichung sowie mögliche Produktivitätsgewinne an einzelnen Arbeitssystemen erfolgt die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Ableitung logistikorientierter Reihenfolgestrategien für Produktionsbereiche. Eine Reihenfolgestrategie kann sowohl eine grundsätzliche Entscheidung für eine Reihenfolge für alle Arbeitssysteme eines Bereichs als auch die sinnvolle Kombination mehrerer Reihenfolgeregeln im betrachteten Produktionsbereich darstellen. Neben den

beschriebenen zu berücksichtigenden Auswirkungen der einzelnen Reihenfolgeregeln werden bei der Strategieentwicklung zudem mögliche Kompensationsmaßnahmen etwaiger Negativauswirkungen aufgezeigt (wie beispielsweise eine Entkopplung durch Pufferbestände).

Das Ziel der aktuellen Forschungsarbeiten lässt sich somit in folgender Forschungshypothese zusammenfassen: „Die quantitative Bewertung der logistischen Auswirkungen verschiedener Reihenfolgeregeln auf das Terminabweichungsverhalten sowie Produktivitätsgewinne einzelner Arbeitssysteme ermöglicht unter Abwägung konfliktärer Zielgrößen und unter Berücksichtigung von Kompensationsmaßnahmen die Festlegung einer logistikorientierten Reihenfolgestrategie für Produktionsbereiche“.

Zur Erreichung des aufgezeigten Forschungsziels wurde gemeinsam mit dem Kooperationspartner das Arbeitsprogramm des Erkenntnistransferprojekts formuliert, welches sich wie folgt gliedert: Zunächst werden die Prozesse der Auftragsabwicklung in einem ausgewählten Pilotbereich aufgenommen und die Arbeitssysteme einer logistischen Analyse unterzogen, um die logistische Ist-Situation zu erfassen. Im nächsten Schritt werden die am IFA entwickelten Modelle zur Beschreibung der Auswirkungen von Reihenfolgeregeln auf logistische Zielgrößen im Hinblick auf die spezifischen Rahmenbedingungen der Koenig & Bauer Industrial AG & Co. KG hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit geprüft und im Nachgang entsprechend erweitert. Ebenfalls werden neue Modelle entwickelt. Zur Sicherung eines nachhaltigen Transfers der Modelle in die Praxis wird zudem ein anwenderfreundlicher Softwaredemonstrator zur automatisierten, datenbasierten Analyse der Auswirkungen der drei zuvor genannten Reihenfolgeregeln auf die Zielgrößen einzelner Arbeitssysteme und deren Verknüpfung programmiert. Abschließend wird ein Vorgehen zur Ableitung logistikorientierter Reihenfolgestrategien unter Berücksichtigung von logistischen Kompensationsmaßnahmen im Hinblick auf unternehmerische Zielsetzungen entwickelt und eine Reihenfolgestrategie für den betrachteten Pilotbereich abgeleitet.

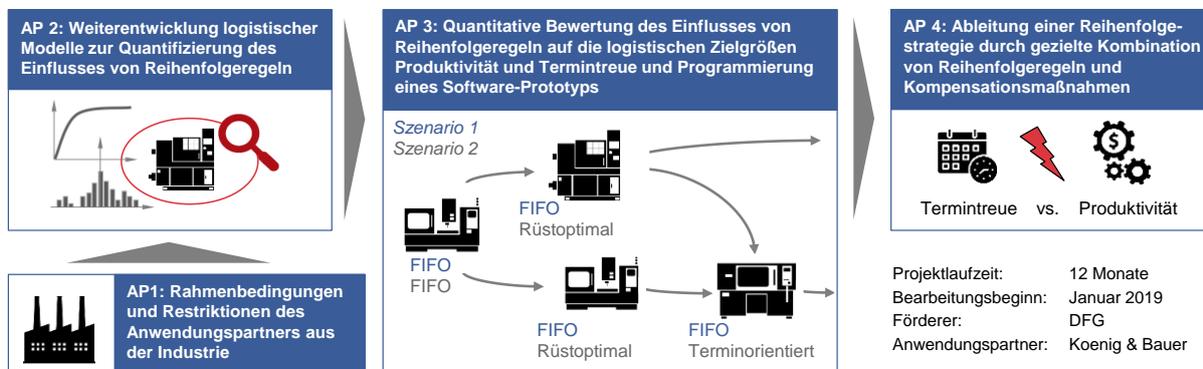


Bild 3 - Übersicht der Arbeitspakete und Eckdaten des Erkenntnistransferprojekts

5. Zusammenfassung

Der in Abschnitt 3.1 vorgestellte generische Ansatz für ein Wirkmodell zur Betrachtung aktueller Forschungstätigkeiten im Rahmen des 12-monatigen DFG-Projektes „NY 4/64-1“ am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) haben die modellbasierte Ermittlung einer geeigneten Strategie zur Bildung von Auftragsreihenfolgen in mehrstufigen Produktionen zum Ziel. Dabei werden Modelle zur quantitativen Beschreibung der Auswirkungen verschiedener Regeln zur Auftragsreihenfolgebildung (FIFO, terminorientiert und rüstoptimal) auf die logistischen Zielgrößen Produktivität und Termintreue genutzt und weiterentwickelt. Die Entwicklung erfolgt in Kooperation mit einem Anwendungspartner aus der industriellen Praxis am Beispiel eines ausgewählten Pilotbereichs.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung ihrer Forschungstätigkeiten im Rahmen des Erkenntnistransferprojekts NY 4/64-1 „Logistikorientierte Reihenfolgestrategien für mehrstufige Produktionen“ - 409759709.

ENGLISCH

Productivity vs. Schedule Compliance. Logistics-oriented order sequencing for multi-stage production processes

The logistical performance and economic efficiency of a production are influenced by order sequencing. Mathematical models to describe the effects of different sequencing rules on logistic target variables of individual workstations may be used to derive sequencing-strategies for multi-stage productions. The strategy is defined by conscious positioning in the field of tension between productivity and schedule compliance.

Literatur

- [1] Schuh, G., Gottschalk, S., Schöning, S., Gulden, A., Rauhut, M., Zancul, E., Schmidt, A., Ring, T., Augustin, R. (2007): Effizient, schnell und erfolgreich – Strategien im Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt am Main: VDMA Verlag.
- [2] Mayer, J. (2018): Quantitative Modellierung logistischer Auswirkungen von rüsto optimalen Auftragsreihenfolgen an Arbeitssystemen. Berichte aus dem IFA Band 1/2018. Garbsen: PZH-Verlag.
- [3] Lödding, H. (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung – Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage, Berlin: Springer-Verlag.
- [4] Mayer, J., Nyhuis, P. (2017): Describing the influence of set-up optimised sequencing on output lateness of workstations. In: Production Planning & Control 28 (10), S. 791-801.
- [5] Bertsch, S. (2015): Modellbasierte Beschreibung der Termintreue. Dissertation Leibniz Universität Hannover. Garbsen: PZH-Verlag.
- [6] Bertsch, S., Schmidt, M., Nyhuis, P. (2014): Modeling of lateness distributions depending on the sequencing method with respect to productivity effects. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 63 (1), S. 429-432.
- [7] Nyhuis, P., Mayer, J. (2017): Modelling the influence of setup optimized sequencing on lateness and productivity behaviour of workstations. In: CIRP Annals Manufacturing Technology 66 (1), S. 421-424.
- [8] Mayer, J., Pielmeier, J., Berger, C., Engehausen, F., Hempel, T., Hünnekes, P. (2016): Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Garbsen: PZH-Verlag.
- [9] Vahrenkamp, R. (2008): Produktionsmanagement. 6. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- [10] Schuh, G., Stich, V. (2013): Produktion am Standort Deutschland – Ergebnisse der Untersuchung 2013. Aachen: FIR e.V.
- [11] Pinedo, M., Seshadri, S. (2001): Scheduling and Dispatching. In: Salvendy, G. (Hrsg.): Handbook of Industrial Engineering – Technology and Operations Management. NY: Wiley, S. 1718-1740.

- [12] Zäpfel, G., Braune, R. (2005): *Moderne Heuristiken der Produktionsplanung am Beispiel der Maschinenbelegung*. München: Verlag Franz Vahlen.
- [13] Nebl, T. (2011): *Produktionswirtschaft*. 7. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- [14] Arzi, Y., Raviv, D. (1998): Dispatching in a workstation belonging to a re-entrant production line under sequence-dependent set-up times. In: *Production Planning & Control* 9 (7), S. 690-699.
- [15] Pinedo, M.L. (2016): *Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems*. Cham: Springer-Verlag.
- [16] Pickardt, C.W., Branke, J. (2012): Setup-oriented dispatching rules – a survey. In: *International Journal of Production Research* 50 (20), S. 5823-5842.
- [17] Nyhuis, P., Wiendahl, H.-P. (2012): *Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Auflage, Berlin: Springer-Verlag.
- [18] Lödding, H., Kuyumcu, A. (2015): Modelling schedule reliability. In: *International Journal of Production Research* 53 (9), S. 2871-2884.