

Dynamische Losbildung für eine dezentral geplante und gesteuerte Produktion

Martin Krockert, Marvin Matthes, Torsten Munkelt
HTW Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden

Um die Produktion bestmöglich auszulasten, sowie schnell und termintreu zu produzieren, muss die Produktionsplanung und -steuerung anstehende Arbeitsgänge zu Losen zusammenzufassen, wodurch sie die Anzahl der benötigten Rüstvorgänge und somit auch die kumulierte Rüstzeit reduziert. Während für zentral geplante und gesteuerte Produktionen bereits viele Heuristiken zur Losbildung existieren, gibt es für dezentral geplante und gesteuerte Produktionen noch keine zufriedenstellende Lösung zur Losbildung. Wir stellen ein neues Verfahren zur dynamischen Losbildung für eine dezentral geplante und gesteuerte Produktion vor, das unter Berücksichtigung der Durchlaufterminierung und des Kapazitätsangebotes Arbeitsgänge mit gleichem Rüstbedarf dynamisch zu Losen zusammenfasst. Das Verfahren ergänzt unsere sich selbst organisierenden Produktion um die Losbildung und zeigt in Simulationen seine Überlegenheit gegenüber gängigen Verfahren.

1. Einleitung

Unser Projektpartner aus der metallverarbeitenden Industrie steht vor der Herausforderung, viele Produkte mit unterschiedlichen Kundenspezifika zumeist auf Abruf herzustellen. Bei dem Bearbeiten dieser Kundenaufträge entfallen durchschnittlich 17% der benötigten Zeit auf Rüstvorgänge. Durch die hohe Diversität der Kundenaufträge eignen sich klassische Losgrößenverfahren nicht zum Zusammenfassen gleichartiger Produkte und damit auch nicht zur Reduktion der benötigten Rüstvorgänge. Um dem Problem der hohen Rüstzeiten zu begegnen, stellen wir ein neues Verfahren zur dynamischen Losbildung für die Anwendung in einer dezentralen Produktion vor. Der Ansatz basiert auf einer Losbildung über Arbeitsgänge mit gleichem Rüstbedarf unter Berücksichtigung der Durchlaufterminierung und des zugrundeliegenden Kapazitätsangebots. Die entstehenden Lose von Arbeitsgängen mit gleichem Rüstbedarf werden in diesem Verfahren als Buckets bezeichnet. Buckets werden während der Laufzeit einer Produktion auf Basis von Ereignissen dynamisch erstellt, erweitert oder aufgelöst. Der neue Ansatz einer dynamischen Losbildung für eine dezentral geplante und gesteuerte Produktion erweitert unsere bisherige Forschung an einer sich selbst organisierenden Produktion. Die sich selbst organisierende Produktion zeigte sich in vorherigen Forschungsergebnissen einer zentral geplanten und gesteuerten Produktion überlegen, da der Produktionsplan in der sich selbst organisierenden Produktion durch lokale Neuplanungen ereignisgesteuert angepasst wird [1]. Die Potenziale einer dezentral geplant und gesteuerten Produktion werden insbesondere bei einer Produktion mit einem hohen Bedarf an Flexibilität deutlich, bei der Unsicherheit in Form von variierenden Zwischenankunftszeiten der Kundenaufträge und Schwankungen der Bearbeitungszeiten von Arbeitsgängen auf die Produktion Einfluss nehmen. In der abschließend

vorgestellten empirischen Studie wird dazu das bisher genutzte Verfahren zur Zusammenfassung von Arbeitsgängen mit dem neu entwickelten Verfahren simulativ verglichen.

2. Problembeschreibung

Die Deutschen Akademie der Technikwissenschaften stellen fest, dass die „[...] Art und Weise der Veredelung und Herstellung von Produkten ... sich noch stärker an den Kundenbedürfnissen ausrichten müssen [...]“ [2]. Unternehmen sind deshalb gefordert, flexibel auf das sich verändernde Nachfrageverhalten von Kunden zu reagieren. Die Bedarfsmengen der Kunden entwickeln sich zu immer kleineren Mengen, die in unregelmäßigen Abständen abgerufen werden. Obwohl die Vorproduktion von größeren Mengen Kosteneinsparungen in der Produktion durch größere Synergieeffekte und weniger Umrüstvorgängen auf den Maschinen ermöglicht, entstehen jedoch zwei potenzielle Probleme: (1.) entstehen Lagerkosten für die vorzeitige Bereitstellung der Produkte und (2.) können bei einer Vorratsproduktion, aufgrund Veränderungen in den Anforderungen der Kundenbestellung, manche Produkte nur mit Verlust verkauft oder müssen vollständig abgeschrieben werden. Diesen Problemen kann begegnet werden, indem die Produktion flexibel auf Änderungen reagiert und nur geringe Stückmengen der jeweiligen Produkte fertigt. Aufgrund der Ungewissheit über Abrufmengen und -zeitpunkte, erzielen Losbildungsverfahren über Materialien hinweg keine wesentliche Effizienzverbesserung der Produktion. Bisher werden Materialien mit gleichem Rüstbedarf für den nächsten Arbeitsschritt vor einer Maschine gesammelt, nach Priorität geordnet und sequenziell abgearbeitet, bis alle Arbeitsgänge mit gleichem Rüstbedarf erschöpft sind. In der Literatur werden Arbeitsgänge mit gleichen Voraussetzungen hinsichtlich des benötigten Rüstbedarfs unter dem Begriff der *Group Technologies*

(kurz GT) geführt. [3,4] Durch das Zusammenfassen von Arbeitsgängen der gleichen GT, findet während der sequenziellen Bearbeitung von Arbeitsgängen der gleichen GT kein Rüstvorgang auf einer Maschine statt. Somit reduziert sich unmittelbar die Rüstzeit für die Maschine. GT wenden ein zweistufiges Verfahren an, bei der zuerst die Gruppe von Arbeitsgängen mittels einer Prioritätsregel ausgewählt und im zweiten Schritt die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsgänge innerhalb der Gruppe mittels einer Prioritätsregel bestimmt wird [5]. Das bisherige Verfahren setzt dabei auf eine Warteschlange, für welche die Prioritätsregel nach der Zielgröße in der Produktion ausgewählt wird. Ist das Produktionsziel die Sicherstellung einer hohen Termintreue werden terminbezogene Prioritätsregeln, wie z.B. die kürzeste Schlupfzeit, eingesetzt. Weiterhin wird bei der Anwendung von GT in zwei Verfahrenstypen unterschieden:

Exhaustiv Verfahren: Nach Auswahl der GT werden alle Arbeitsgänge der GT bearbeitet, bei denen alle Vorbedingungen erfüllt sind.

Nicht-exhaustiv Verfahren: Nach Auswahl der GT werden sukzessive Arbeitsgänge mit gleichem Rüstbedarf bearbeitet, bei denen alle Vorbedingungen erfüllt sind. Im Gegensatz zu exhaustiv Verfahren kann jedoch auch zwischenzeitlich auf andere GT gewechselt werden.

Frazier zeigt in [5], dass exhaustiv Verfahren zur Bearbeitung von Arbeitsgängen in einer Flow-Shop-Fertigung bereits massive Rüstkosten reduzieren und in vielen Fällen den nicht-exhaustiv Verfahren überlegen sind. Exhaustiv Verfahren führen jedoch tendenziell zu größeren Losen, welche wiederum Maschinen auf einem Rüstzustand halten. In dieser Arbeit soll deshalb ein Verfahren zur dynamischen Losbildung entwickelt werden, welches trotz tendenziell kleinerer Lose den Rüstaufwand reduziert und dadurch in einer dezentral geplanten und gesteuerten Produktion weiterhin die notwendige Flexibilität gewährleistet.

3. Dynamische Losbildung

Das Verfahren für eine dynamische Losbildung basiert auf drei Bestandteilen: den Arbeitsgängen, den verfügbaren Maschinen und dem Bucket-Manager zur Zuordnung von Arbeitsgängen in Buckets. Der *erste Bestandteil* umfasst die Arbeitsgänge aller Fertigungsaufträge. Das Verfahren betrachtet ausschließlich sequenzielle

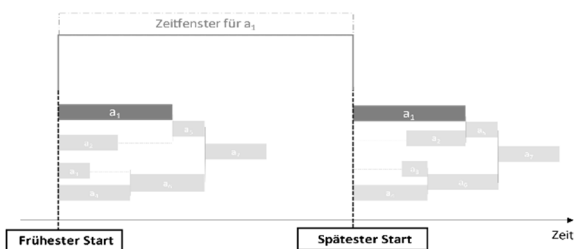


Abbildung 1: Zeitfensters mittels Durchlaufterminierung

Arbeitsgänge. Für jeden Arbeitsgang liegen die folgenden Informationen vor: voraussichtliche Bearbeitungszeit, angestrebter Fertigstellungstermin für den Fertigungsauftrag in der Produktion, Übergangszeit, benötigter Rüstzustand auf einer Maschine sowie das Zeitfenster zur Bearbeitung, welches sich aus frühestem Startzeitpunkt und spätestem Startzeitpunkt der Vorwärts- und Rückwärtsterminierung des Fertigungsauftrags ergibt (siehe Abb. 1). Alle in der Produktion verfügbaren Maschinen bilden den *zweiten Bestandteil*. Jede Maschine ist einer Maschinengruppe zugeordnet und kann mit einer Reihe von Werkzeugen gerüstet werden. Eine Maschine kann jedoch nur mit einem mit einem Werkzeug gleichzeitig gerüstet sein. Jede Kombination einer Maschine mit einem der ihr zur Verfügung stehenden Werkzeuge steht für einen Rüstzustand. Wird eine Maschine mit einem Werkzeug gerüstet, kann die Maschine alle Arbeitsgänge, die diesem Rüstzustand zugeordnet sind, durchführen. Da jeder Maschine ihr eigenes Set an Werkzeugen zur Verfügung steht, können Maschinen derselben Maschinengruppe zur selben Zeit mit dem gleichen Werkzeug ausgerüstet sein. Somit können bei Bedarf Arbeitsgänge mit dem gleichen benötigten Rüstzustand an unterschiedlichen Maschinen parallel bearbeitet werden. Der *dritte Bestandteil* umfasst die Bucket-Manager. Bucket-Manager stellen eine Menge von virtuellen Entitäten dar, welche auf Basis der existierenden Rüstzustände erstellt werden.

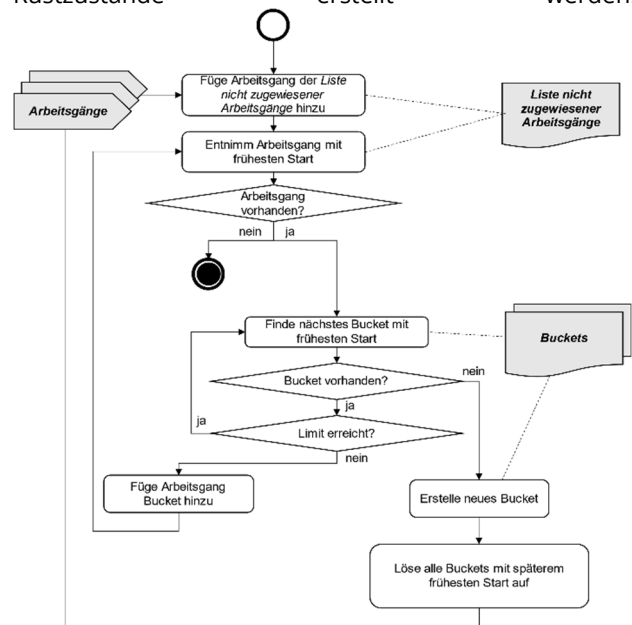


Abbildung 2: Einordnung von Arbeitsgängen in Buckets

Jeder Bucket-Manager organisiert alle Arbeitsgänge, die genau seinem Rüstzustand zugeordnet sind. Der Algorithmus für die Zuordnung von Arbeitsgängen in Buckets ist in Abbildung 2 dargestellt. Nach der Freigabe eines Fertigungsauftrags in die Produktion und der darauffolgenden Stücklistenauflösung, werden alle Arbeitsgänge des Fertigungsauftrags in die Produktion überführt. Mit jedem neu eintreffenden Arbeitsgang wird der Algorithmus zur Einordnung von Arbeitsgängen in Buckets aus-

gelöst, um für den jeweiligen Arbeitsgang ein passendes Bucket zu finden oder zu erzeugen. Im ersten Schritt wird jeder Arbeitsgang der *Liste nicht zugewiesener Arbeitsgänge* hinzugefügt. Die *Liste der nicht zugewiesener Arbeitsgänge* ist sortiert nach dem frühesten Startzeitpunkt, resultierend aus der Vorwärtsterminierung eines jeden Arbeitsganges. Für die Zuordnung zu einem Bucket wird der erste Arbeitsgang aus der *Liste der nicht zugewiesenen Arbeitsgänge* entnommen. Wenn die Liste leer ist und somit alle Arbeitsgänge bereits einem Bucket zugeordnet sind, terminiert der Algorithmus an dieser Stelle. Andernfalls wird für den entnommenen Arbeitsgang zuerst ein passendes Bucket gesucht. Dazu wird aus der Liste der existierenden Buckets jenes Bucket mit dem frühesten Startzeitpunkt ausgewählt. Der früheste Startzeitpunkt eines jeden Buckets entspricht dem frühesten Startzeitpunkt des Arbeitsganges, welcher zuerst dem Bucket hinzugefügt wurde und das Bucket somit erstellt hat. Wird ein Bucket gefunden, wird im nächsten Schritt geprüft, ob das maximale Limit für das Bucket erreicht wurde. Die Bestimmung des Limits erfolgt auf Basis des Kapazitätsangebots nach Formel (1).

$$l_B \geq \sum_{j=1}^{|A_B|} d(a_j) + d(a_i) \quad (1)$$

$$l_B = \min(l_{scope}, l_{setup}) \quad (2)$$

$$l_{scope} = rts_{a_{1B}} - vts_{a_{1B}} \quad (3)$$

$$l_{setup} = f \cdot \frac{|W_{mg}|}{|M_{mg}|} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{|A_w|} d(a_j)}{\sum_{j=1}^{|A_{mg}|} d(a_j)} \quad (4)$$

mit:

- rts ... Startzeitpunkt aus der Rückwärtsterminierung
- vts ... Startzeitpunkt aus Vorwärtsterminierung
- d ... Fertigungsdauer in Minuten
- $a \in A$... Arbeitsgang ist ein Spaltenvektor mit $\{d, rts, vts, w, mg\}^T$
- a_i ... aktueller Arbeitsgang
- B ... Bucket ist ein Spaltenvektor mit $\{A, w, mg\}^T$
- f ... vordefinierter Bucket-Faktor
- w ... Werkzeuge
- m ... Maschine
- mg ... Maschinengruppe ist ein Spaltenvektor mit $\{W, M\}^T$
- P ... Produkt (Baugruppe)

Das Verfahren setzt als Bucket-Limit zuerst das ermittelte Zeitfenster des ersten Arbeitsgangs im Bucket nach Formel (3) an. Darüber hinaus wird in Formel (4) eine zweite Grenze für das Limit des Buckets in Abhängigkeit von der Verwendungshäufigkeit des betrachteten Rüstzustands einbezogen. Der Parameter f in Formel (4) beschreibt einen Faktor, der sich aus der zugrundeliegenden Produktion ergibt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein Faktor in Abhängigkeit von üblichen Schichtzeiten (8 Stunden bzw. 480 Minuten) eingesetzt. In Formel (2) wird das Minimum der beiden zuvor ermittelten Werte mit der Summe über alle Arbeitsgänge im Bucket

und dem noch nicht zugewiesenen Arbeitsgang verglichen. Wird das Limit unterschritten, wird das Arbeitsgang dem Bucket hinzugefügt. Andernfalls wird das nächste Bucket geprüft. Wird kein Bucket ermittelt oder ist bei allen Buckets das Limit erreicht, wird für den Arbeitsgang ein neues Bucket erstellt und der Arbeitsgang dem neu erstellten Bucket hinzugefügt. Bei der Erstellung eines neuen Buckets wird darüber hinaus geprüft, ob weitere Buckets mit dem gleichen Rüstbedarf aber einem späteren „Frühesten Start“ existieren. Buckets mit einem späteren „Frühesten Start“ werden aufgelöst und alle Arbeitsgänge der aufgelösten Buckets werden wiederum über den Algorithmus zur Einordnung von Arbeitsgängen in Buckets einem Bucket hinzugefügt.

4. Empirische Studie

4.1 Experiment Design

Der entwickelte Algorithmus wurde in unsere existierende Simulation für eine sich selbst organisierenden Produktion implementiert und in einer empirischen Studie untersucht. Der Aufbau und die Funktionsweise der sich selbst organisierenden Produktion ist in der vorherigen Veröffentlichung [1] dargestellt. Für die empirische Studie werden Maschinen, Stücklisten und Arbeitspläne erzeugt, die hinsichtlich ihrer statistischen Kenngrößen einer realen Produktion gleichen, aber nicht mit ihr identisch sind. Das Produktionsmodell ist von einer Produktion eines mittelständigen Unternehmens aus der metallverarbeitenden Industrie abgeleitet und in Tabelle 1 dargestellt.

MASCHINENGRUPPE	TRENNEN	UMFORMEN	FÜGEN	MONTIEREN
ANZAHL MASCHINEN	1	2	4	4
ANZAHL WERKZEUGE	3	4	5	5
Ø FERTIGUNGSZEIT IN MIN	25	26	5	18
Ø RÜSTZEIT IN MIN	20	108	2	6
ANTEIL AN GESAMTZEIT	33,78%	35,14%	6,76%	24,32%

Tabelle 1: Produktionsmodell und Arbeitsplankennwerte

Die Produktion unterteilt sich in vier Maschinengruppen. Die Maschinengruppen sind nach dem Flow-Job-Prinzip organisiert. Für jede Maschinengruppe ist eine Anzahl an Maschinen und Werkzeugen definiert. Die Anzahl der Werkzeuge ergibt die Anzahl der möglichen Rüstzustände. Für Fertigungs- und Rüstvorgänge fällt jeweils eine Zeitspanne an, welche durch eine durchschnittliche Fertigungs- und Rüstzeit je Maschinengruppe festgelegt wird. Der Anteil jeder Maschinengruppe an der Gesamtzeit wird über die durchschnittliche Fertigungszeit festgelegt. Auf Basis der Realdaten des Unternehmens wurden Kenngrößen für den Mehrfachverwendungsgrad (MV) von 4,14 nach Formel (5) und Komplexitätsgrad (KG) von 1,57 nach Formel (6) der Produktion ermittelt [6]. Für die Studie wurde aufbauend auf den Kennwerten für die Mehrfachverwendung und den Komplexitätsgrad eine bis zu drei Stufen tiefe Produktstruktur von 1000 Endprodukten bestehend aus 344 unfertigen

$$MV = \frac{\sum_{p \in P} |succ(p)|}{|P \setminus P_{Endprodukt}|} \quad (5)$$

$$KG = \frac{\sum_{p \in P} |pred(p)|}{|P \setminus P_{Kaufteil}|} \quad (6)$$

Zwischenerzeugnissen und 144 Kaufteilen generiert. Die unfertigen Erzeugnisse und Endprodukte werden jeweils in durchschnittlich fünf Arbeitsgängen gefertigt, denen gleichverteilt eine Maschinengruppe und ein Werkzeug der jeweiligen Maschinengruppe zugeordnet wird. Während der Simulation werden über einen Zeitraum von 4 Wochen Kundenaufträge mit einer exponentialverteilten Zwischenankunftszeit generiert. Für jeden Auftrag wird der Liefertermin individuell, d.h. anhand der Produktionsdauer des Auftrags, bestimmt.

4.2 Ergebnisse der empirischen Studie

Die Ergebnisse der empirischen Studie hinsichtlich der Auslastung und der Rüstzeiten beider Verfahren sind in Tabelle 2 dargestellt. Mit dem Verfahren zur dynamischen Losbildung konnten die Rüstzeit und folglich auch die Gesamtauslastung der Produktion deutlich reduziert werden. Von ursprünglich 17,35%, konnte das Verfahren zur dynamischen Losbildung die Rüstzeiten auf 13,09% reduzieren. Im Verhältnis entspricht das wiederum einer Reduzierung von 24,52%. Die Rüstzeit konnte insbesondere bei denjenigen Maschinengruppen mit einem hohen Rüstaufwand und einer hohen Auslastung reduziert werden. Im Verlauf der empirischen Studie wurden neben der Auslastung und Rüstzeit, weitere Leistungsparameter ausgewertet und in Tabelle 3 dargestellt.

	EXHAUSTIV LOSBIILDUNG	DYNAMISCHE LOSBIILDUNG	DIFFERENZ
LIEFERTERMINTREUE	98,35% (2)	95,45% (5)	-2,94%
Ø VERSPÄTUNG	125 MIN	210 MIN	67,71%
Ø TERMINABWEICHUNG	-744 MIN	-750 MIN	0,81%
Ø DURCHLAUFZEIT	592 MIN	586 MIN	-1,01%
LAGERKOSTEN/PRODUKT	1,66 EUR	0,93 EUR	-43,97%

Tabelle 3: Vgl. Exhaustive- und Dynamische Losbildung
Obwohl beide Verfahren durchschnittlich 750 Minuten vor dem Termin abschließen, kann die Exhaustive Losbildung eine geringfügig höhere Liefertermintreue erreichen. Ebenso erhöht sich die durchschnittliche Verspätung von der Exhaustive Losbildung (125 Minuten) im Vergleich zur Dynamischen Losbildung (210 Minuten). In den terminbezogenen Leistungsparametern zeigt sich

MASCHINENGRUPPE	EXHAUSTIV LOSBIILDUNG		DYNAMISCHE LOSBIILDUNG		VERÄNDERUNG DURCH - DYNAMISCHE LOSBIILDUNG	
	RÜSTZEIT	GESAMTAUSLASTUNG	RÜSTZEIT	GESAMTAUSLASTUNG	RÜSTZEIT	GESAMTAUSLASTUNG
TRENNEN	14,21%	67,96%	14,80%	68,54%	+3,94%	+0,83%
UMFORMEN	52,79%	80,95%	36,96%	65,11%	-42,84%	-24,34%
FÜGEN	0,58%	3,28%	0,10%	2,78%	-460,00%	-18,11%
MONTIEREN	1,80%	11,56%	0,51%	10,29%	-250,29%	-12,36%
GESAMT	17,35%	40,94%	13,09%	36,68%	-24,52%	-10,41%

Tabelle 2: Vergleich der Maschinengruppen der Exhaustiv- und Dynamische Losbildung

das bisherige Verfahren der Exhaustive Losbildung somit überlegen. In den beiden zuletzt betrachteten Kennwerten für die durchschnittliche Durchlaufzeit je Auftrag und die Lagerkosten je Produkt ist die Dynamische Losbildung überlegen. Während sich die Durchlaufzeit nur geringfügig verbessert, können die Lagerkosten je Produkt von 1,66 Euro/Stück auf 0,93 Euro/Stück um fast 44% reduziert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde auf Basis von Arbeitsgängen mit gleichem Rüstbedarf ein Verfahren zur dynamischen Losgrößenbildung konzipiert, prototypisch implementiert und simulativ gegen die exhaustiv Losbildung evaluiert, das in der realen Produktion verwendet wird. Die dynamische Losgrößenbildung und die Evaluationsstudie sind Ergebnisse unserer Forschungsarbeit. Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Verfahren besonders bei hohem Rüstaufwand und einer hohen Auslastung der Maschinen die Rüstkosten erheblich senkt und gleichzeitig die Flexibilität der Produktion gewährleistet.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wird im Rahmen des Förderprogramms „Forschung an Fachhochschulen“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Zeichen: 13FH133PX8).

Literaturverzeichnis

- [1] T. Munkelt, M. Krockert, in 25. *Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida 2018* (Eds: Hochschule Mittweida)
- [2] G. Schuh, R. Anderl, J. Gausemeier, W. Wahlster, *Industrie 4.0 Maturity Index: Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*, München 2017.
- [3] I. Ham, K. Hitomi, and T. Yoshida, *Group technology: Applications to production management, ser. International series in management science/operations research*. Boston: Kluwer-Nijhoff, 1985.
- [4] A. Klausnitzer, J. S. Neufeld, and U. Buscher, *Scheduling dynamic job shop manufacturing cells with family setup times: a simulation study*. U. Logist. Res., 2017.
- [5] Frazier, G. V. *An evaluation of group scheduling heuristics in a flow-line manufacturing cell*. International Journal of Production Research, (1996) 34(4):959–976.
- [6] C. E. Heinrich, *Mehrstufige Losgrößenplanung in hierarchisch strukturierten Produktionsplanungssystemen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 1987.