



*Simulation in Produktion
und Logistik 2021*
Jörg Franke & Peter Schuderer (Hrsg.)
Cuvillier Verlag, Göttingen 2021

Optimierung der Auslastung eines Matrix-Montage-Systems durch Konzeptionierung und Implementierung eines Genetischen Algorithmus für Maschinenbelegungsplanung

Optimization of the utilization of a matrix assembly system by conceptual design and implementation of a Genetic Algorithm for Machine Scheduling

Jana Purgander, Julius Lohse, Johannes Hinckeldeyn, Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Logistik, jana.purgander@tuhh.de, julius.lohse@tuhh.de, johannes.hinckeldeyn@tuhh.de

Abstract: Individualization and an increasing number of variants confront manufacturing systems with new challenges. Due to their flexibility, matrix assembly systems have shown great potential to solve many resulting difficulties. However, the control of such production systems is very complex due to a large number of possible scheduling plans for the products to be manufactured. Decentralized agent controllers can route orders through the production system while also observing target values such as utilization maximization. However, a full utilization is unlikely, because there is no consideration of the whole system. In this article, a Genetic Algorithm is used to create a machine scheduling plan for a matrix assembly system. This can be used to implement a centralized control system that optimizes the production system as a whole in terms of utilization. Relationships between parameters of the algorithm and achievable workloads are to be established. The results for a practical use case are evaluated and recommendations for further experiments are derived.

1 Einleitung

Das Phänomen der Mass Customization führte zu einer Nachfrage nach neuen Fertigungssystemen, die eine Vielfalt an unterschiedlichen Produkten effizient herstellen können (Koren 2010). Dafür eignet sich die Auftragsfertigung, bei der modulare Komponenten entsprechend den Kundenanforderungen verbaut werden und so eine hohe Bandbreite an Kundenwünschen abgedeckt werden. Die dafür notwendigen Montagelinien mit Taktzeiten bewähren sich, wenn Arbeit in einzelne Arbeitsgänge mit gleichen Durchlaufzeiten aufgeteilt werden. Jedoch erhöht sich durch individuelle Kundenbestellungen die Variantenvielfalt drastisch. Dies führt auch zu einer zunehmenden Variation des Arbeitsinhalts für jeden Auftrag. In der

starrten Struktur eines klassischen Fließbandes wird mit Taktzeiten gearbeitet und die Aufträge warten so lange, bis die Bearbeitung an allen anderen Stationen abgeschlossen ist, bevor sie die nächste Station ansteuern können. Bei uneinheitlichen Bearbeitungszeiten führt dies zu Leerlaufzeiten und damit zu einer geringeren Auslastung und Effizienz der einzelnen Stationen und folglich der gesamten Montagelinie. Die daraus resultierende geringere Auslastung führt zu unnötigen Kosten und Effizienzverlusten.

Die veränderten Marktbedingungen motivieren die Untersuchung des Konzepts der Matrix-Montagesysteme (MMS). Dieses Konzept verspricht, die Produktivitätsstärke klassischer Montagelinien mit der Flexibilität der Werkstattfertigung zu kombinieren (Schönemann et al. 2015). Dies wird durch einen flexiblen Materialfluss zwischen den Stationen erreicht. Die Fähigkeiten der Stationen werden durch Redundanz und Mehrfachbelegung so konfiguriert, dass Arbeitsinhalt und Kapazität für eine Reihe von Produkten ausgeglichen werden können (Greschke 2015). So sind MMS eine konzeptionelle Antwort auf die tatsächlichen Herausforderungen der Mass Customization. Gleichzeitig steigt die Komplexität der Steuerung im Vergleich zu anderen Fertigungstypen (Greschke und Herrmann 2014).

Für die Planung der Maschinenbelegung von MMS kommen heute vorwiegend simple Heuristiken zum Einsatz (siehe Stand der Technik). In der Produktionsplanung und -steuerung finden fortgeschrittene Algorithmen Anwendung, wie beispielsweise Genetische Algorithmen (GA). Diese konnten bei anderen Produktionssystemen Vorteile gegenüber Heuristiken vorweisen (Aytug et al, 2003). Es stellt sich die Frage, ob Metaheuristiken wie GA auch für MMS Vorteile mit sich bringen verglichen mit simplen Heuristiken. Dies zu untersuchen ist Ziel dieser Arbeit. Um diese Frage zu untersuchen, wird in diesem Artikel zunächst der Stand der Technik vorgestellt. Anschließend werden die Vorgehensweise und das Konzept des GA erläutert, die Ergebnisse der Implementierung beschrieben und ausgewertet und letztlich diskutiert.

2 Stand der Technik

Das Konzept der Matrix-Montage-Systeme zeichnet sich durch ein schachbrettähnliches Layout aus, bei welchem die einzelnen Arbeitszellen (AZ) untereinander flexibel durch Fahrwege vernetzt sind. Häufig kommen Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) zum Einsatz, sodass für jeden Auftrag ein individueller Produktionspfad durch das System entsteht (Popp, 2018, S.72). So kann jeder Auftrag entsprechend seiner Variante und der benötigten Arbeitspakete (AP) eine flexible Sequenz von Arbeitszellen anfahren. Diese Vielzahl möglicher Produktionspfade bedeutet einen erhöhten Steuerungsaufwand für die Auftrags- und Belegungsplanung.

Bisher kamen dafür hauptsächlich Heuristiken zum Einsatz (Greschke 2015, Popp 2018). Diese können zwar keine optimalen Lösungen garantieren, erreichen jedoch in kurzer Zeit bereits zulässige Lösungen. Optima werden dabei nicht gezielt angestrebt. Es bleibt also fraglich ob diese Heuristiken Optimierungspotenziale bei MMS ungenutzt lassen. Für die Maschinenbelegungsplanung in komplexen Produktionssystemen, wie z.B. Werkstattfertigungen, kommen auch Metaheuristiken wie Ameisenalgorithmen und Schwarmalgorithmen zum Einsatz (Echler Minguillon, 2020). Auch bei der Maschinenbelegungsplanung eines MMS handelt es sich um ein komplexes kombinatorisches Optimierungsproblem. Bei vergleichbaren Problemstellungen konnten Genetische Algorithmen (GA) bereits

erfolgsversprechende Erfolge vorweisen (Aytug et al, 2003). Es stellt sich daher die Frage, ob durch den Einsatz eines GA eine Verbesserung der erreichbaren Auslastung eines MMS im Vergleich zu den bekannten Heuristiken erzielt werden kann, indem eine effektivere Belegungsplanung realisiert wird.

3 Vorgehensweise und Konzept des Genetischen Algorithmus

In der durchgeführten Simulationsfallstudie wurde der Umbau eines existierenden Produktionssystems von einer taktgesteuerten Linienfertigung hin zu einem MMS betrachtet. Für den geplanten Umbau wurde ein Konzept eines Matrix-Montage-Systems erstellt, anhand dessen der Vergleich zwischen zwei Heuristiken (Push/Pull) und eines GA stattfand. Anschließend wurden Simulationen sowohl für die Heuristiken als auch für den GA durchgeführt und diese miteinander verglichen. Der nachfolgende Abschnitt stellt die Fallstudie und die verwendeten Algorithmen und Heuristiken vor.

Die bisherige Produktion beruht auf dem Konzept der getakteten Linienfertigung (siehe Abbildung 1) mit 25 Stationen und einer Auslastung von 83 Prozent. Es handelt sich hier um ein aus einer realen Fertigung abgeleitetes, idealisiertes Modell eines taktgesteuerten Linien-Montage-Systems. Dieses wurde als Vergleichsmaßstab für die Bewertung des konzeptionellen Matrix-Montage-Systems verwendet.

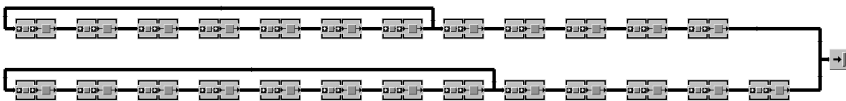


Abbildung 1: Layout der Fließfertigung

Das betrachtete Layout des MMS enthält aus Platzgründen nur 22 Arbeitszellen, an welchen jeweils ein Werker arbeitet (siehe Abbildung 2). Links und rechts vom Arbeitsplatz eines Werkers befinden sich jeweils ein Puffer, auf welchem ankommende Aufträge bearbeitet werden können oder auf ihre Bearbeitung warten. In einem Arbeitsschritt an einer AZ wird genau ein Arbeitspaket am Auftrag durchgeführt. Unterschiedliche AZ können unterschiedliche AP durchführen. Dabei kann jede AZ stets mehrere Arbeitspakete ausführen. Dies hat den Hintergrund, dass Redundanzen und Mehrfachbelegungen im System für eine größere Robustheit gegenüber Störungen sorgen.

Die im Layout realisierten Wege sind zu keinem Zeitpunkt gegenläufig, sondern stets nur in eine Richtung befahrbar. Die zu bearbeitenden Fahrzeuge, welche die Aufträge im Anwendungsfall des Fahrzeugherstellers repräsentieren, werden dabei auf Fahrerlosen Transportsystemen bewegt. Des Weiteren ist es den FTF nicht möglich, über freie Puffer zu fahren, selbst wenn dadurch die Wegstrecke zwischen dem Start- und Zielpunkt des Auftrags minimiert werden würde. Daraus lässt sich schließen, dass Aufträge auf dem Weg von einer Arbeitszelle zur nächsten stets denselben kürzesten Weg nutzen können. Die Zeit, die für diesen kürzesten Weg benötigt wird, wird als Wegzeit zwischen den Arbeitszellen bezeichnet.

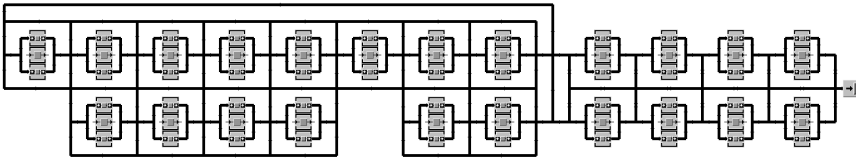


Abbildung 2: Layout der MMS

Für diese Simulationsfallstudie zur Untersuchung des MMS-Layouts (siehe Abbildung 2) wurden zwei unterschiedliche Heuristiken implementiert. Bei der **Push**-Steuerung wird für jeden Auftrag nach Beendigung des aktuellen Bearbeitungsschritts für alle möglichen nachgelagerten Stationen nun der frühestmögliche Bearbeitungszeitpunkt ermittelt und verglichen. Die Station, welche das Fahrzeug am frühesten bearbeiten kann, erhält den Zuschlag. Bei der **Pull**-Steuerung bestellt eine Arbeitsstation, die in absehbarer Zeit kein Fahrzeug mehr zur Bearbeitung hat, ein neues Fahrzeug bei ihren vorgelagerten Zellen. Diejenige vorgelagerte Station, welche am frühesten der Anfrage nachkommen kann, leitet ihren Auftrag entsprechend weiter. Die restlichen Zellen werden über die Hinfälligkeit der Anfrage informiert. Sollte keine vorgelagerte Zelle der Anfrage nachkommen können, so wartet die betrachtete Arbeitsstation so lange, bis sich dieser Zustand ändert.

Bei der Verwendung eines Genetischen Algorithmus zur zentralen Steuerung erhalten die FTF von einer zentralen Recheneinheit die Information, welche Arbeitszelle sie als nächstes anfahren, damit ihr Auftrag dort bearbeitet werden kann. Es wird ein Maschinenbelegungsplan erstellt, in welchem festgehalten wird, welchen Produktionspfad die Aufträge durch das System nutzen sollen. Es kann somit von einem Leitstand gesprochen werden. Der GA stellt eine zentrale Schnittstelle zwischen allen FTF und Arbeitsstationen dar. Im Leitstand werden alle verfügbaren Informationen gebündelt und ausgewertet, sodass eine Betrachtung des Gesamtsystems realisiert werden kann. Anders als bei den Heuristiken kann eine Vielzahl an Parametern einbezogen werden, wie etwa die Auslastung der Produktionsstationen. Der GA erstellt zunächst eine Population von 800, 1600 oder 3200 gültigen Maschinenbelegungsplänen. Für jeden Plan (Individuum) wird dann die erreichbare Auslastung ermittelt und als Fitnesswert hinterlegt. Entsprechend des Fitnesswertes werden die Pläne für den Übergang in die nächste Generation selektiert. Dabei wurden drei unterschiedliche Selektionsmechanismen betrachtet:

- **Rouletteselektion:** Selektionswahrscheinlichkeit ist proportional zum Anteil der Fitness des Individuums
- **Rangselektion:** alle Individuen werden ihrer Fitness nach sortiert; Selektionswahrscheinlichkeit ist proportional zum Rang
- **Wettkampfselektion:** es werden zufällig zwei Individuen für einen Wettkampf gegeneinander ausgewählt; das fittere Individuum gewinnt mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% und wird selektiert

Die selektierten Individuen werden dann miteinander rekombiniert, indem jeder Nachkomme von zwei der selektierten Individuen bis zu einem zufälligen Punkt die Erbinformationen des einen Elternteils und danach die Informationen des anderen

Elternteils übernimmt (1-Punkt-Crossover) (Buttelmann und Lohmann, 2004). Des Weiteren werden die fittesten 50 oder 100 Individuen einer Generation direkt in die Folgegeneration übernommen. Man spricht hierbei vom Elitismus. Es entsteht eine neue Generation mit der gleichen Individuenanzahl wie die Ausgangspopulation. Es folgt die Mutation der rekombinierten Individuen der neuen Generation, bei welcher jedes Individuum mit einer Wahrscheinlichkeit von 15 Prozent, 30 Prozent oder 60 Prozent mutiert. Dabei wird zufällig eine Maschinenzuweisung im Plan geändert. Jeder Simulationsdurchlauf bestand aus 750 Iterationen, sodass bei jedem Durchlauf 750 Generationen entstanden. Bei jeder Kombinationsmöglichkeit wurden fünf Durchläufe durchgeführt. Die Ergebnisse des GA wurden anschließend mit den Ergebnissen der Heuristiken verglichen.

4 Ergebnisse und Auswertung

Der Vergleich von GA und Heuristiken wurde anhand einer Simulation durchgeführt. Beim GA werden 50 Aufträgen betrachtet, welche in einer festen Auftragsfreigabereihenfolge aus den vorgelagerten Produktionsprozessen in das MMS eingeschleust werden. Jeder Auftrag hat eine Menge an zwölf Arbeitspaketen (AP), die bis zu seiner Fertigstellung durchgeführt werden müssen. Die Abfolge der durchnummerierten AP ist dabei fest und kann nur in aufsteigender Reihenfolge durchgeführt werden (AP1 – AP2 – AP3 – ... – AP12). Die Bearbeitung der AP findet auf 22 Arbeitszellen (AZ) mit einem Werker und zwei Puffern je AZ statt. Entsprechend wurden Redundanzen und Mehrfachbelegungen geschaffen (siehe Abbildung 3). Störungen wurden dabei außer Acht gelassen.

Für den beschriebenen Anwendungsfall wurden diese Heuristiken in Form einer Simulation erstellt, welche in Tecnomatix PlantSimulation 13.1 implementiert wurde. Dabei erreichte die **Push**-Steuerung eine Maschinenauslastung von 94,09% und die **Pull**-Steuerung 93,08%. Das GA Konzept wurde aus Gründen der Laufzeit in Java implementiert, erhält seine Inputparameter jedoch weiterhin aus dem existierenden PlantSimulation-Modell. Zu diesen Inputparametern gehören:

- Wegzeiten für die Strecken zwischen den Maschinen
- Prozesszeiten für die Bearbeitung der jeweiligen Arbeitspakete
- Auftragsinformationen (individueller Code, Materialtyp)
- Maschineninformationen (AP-Fähigkeiten)

	AP_0	AP_1	AP_2	AP_3	AP_4	AP_5	AP_6	AP_7	AP_8	AP_9	AP_10	AP_11	AP_12
AZ_1	1.00	1.00											
AZ_2		1.00	1.00										
AZ_3		1.00	1.00										
AZ_4			1.00	1.00									
AZ_5			1.00	1.00									
AZ_6				1.00	1.00								
AZ_7				1.00	1.00								
AZ_8					1.00	1.00							
AZ_9					1.00	1.00	1.00						
AZ_10						1.00	1.00						
AZ_11							1.00	1.00					
AZ_12							1.00	1.00					
AZ_13								1.00	1.00				
AZ_14								1.00	1.00				
AZ_15									1.00	1.00			
AZ_16									1.00	1.00			
AZ_17										1.00	1.00		
AZ_18										1.00	1.00		
AZ_19											1.00	1.00	1.00
AZ_20											1.00	1.00	1.00
AZ_21												1.00	1.00
AZ_22												1.00	1.00

Abbildung 3: Redundanzen und Mehrfachbelegungen im System

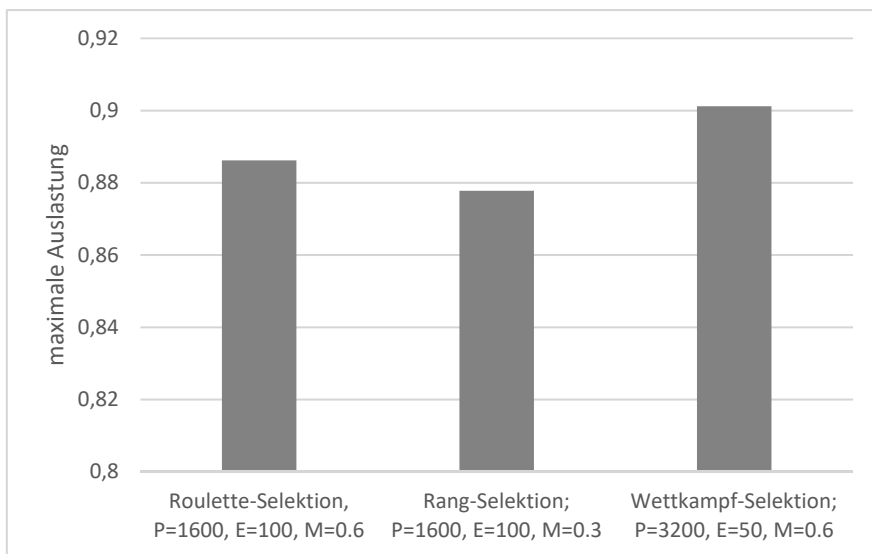
Zur Übermittlung dieser Informationen wird ein Web-Socket verwendet, bei welchem das Modell als Client und der in Java implementierte GA als Server agiert. Im PlantSimulation-Modell werden die Informationen von SimTalk in JSON geparkt, über das Socket übermittelt und anschließend von JSON wieder in Java übertragen. Die Informationen stehen dann dem GA für seinen weiteren Verlauf zur Verfügung.

Die Bearbeitung der Inputinformationen durch den Genetischen Algorithmus variiert durch die Nutzung unterschiedlicher Parameterkombinationen, welche verschiedene Ergebnisse liefern. Dabei zeigten sich für die verwendeten Selektionsmechanismen jeweils vorteilhafte Parameterzusammenstellungen. Tabelle 1 zeigt die besten Ergebnisse der jeweiligen Selektionsmechanismen und die entsprechenden Parameterkombination aus Populationsgröße (P), Elitenanzahl (E) und Mutationsrate (M). Die besten Ergebnisse pro Parameterkombination sind jeweils in fett gekennzeichnet.

Table 1: Maximale Auslastung je Selektionsansatz

Parameterkombination	Roulette-Selektion	Rang-Selektion	Wettkampf-Selektion
P = 800, E = 100, M = 0,3	0,873	0,862	0,874
P = 800, E = 100, M = 0,6	0,886	0,876	0,885
P = 1600, E = 100, M = 0,3	0,874	0,878	0,893
P = 1600, E = 100, M = 0,6	0,886	0,858	0,899
P = 3200, E = 50, M = 0,3	0,851	0,813	0,900
P = 3200, E = 100, M = 0,15	0,880	0,833	0,887
P = 3200, E = 100, M = 0,3	0,866	0,853	0,900
P = 3200, E = 100, M = 0,6	0,874	0,838	0,901

Die Wettkampf-Selektion weist bei vorteilhaften Parameterkombinationen die erfolgreichsten Ergebnisse auf und soll deshalb als Vergleichswert mit den Heuristiken dienen (siehe Abbildung 4).


Abbildung 4: Ergebnisse der Selektionsmechanismen

Nach Betrachtung der Ergebnisse des GA lässt sich festhalten, dass auch die besten erreichten Ergebnisse bei der Wettkampfselktion mit manchen Durchläufen über 90,1 Prozent Auslastung dennoch schlechter sind als die realisierten Werte durch Push- und Pull-Steuerung, siehe Abbildung 5. Dort konnten Maschinenauslastungen von 93,08 Prozent und 94,09 Prozent erreicht werden. Wird jedoch in Betracht gezogen, dass der GA lediglich mit einer begrenzten Anzahl an Parameterwerten und

-kombinationen lief, liegt die Vermutung nahe, dass die erreichbare Auslastung durch andere Parameterwerte noch weiter erhöht werden kann. Es sind weitere Experimente notwendig, um dahingehend eine genauere Aussage treffen zu können.

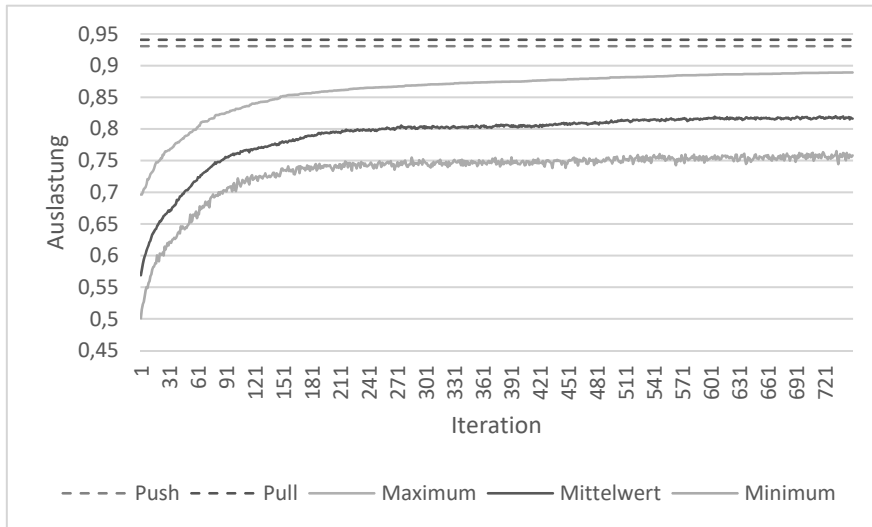


Abbildung 5: Ergebnisse der Parameterkombination Populationsgröße $P = 3200$, Elitenanzahl $E = 50$, Mutationsrate $M = 0.6$ bei der Wettkampf-Selektion

Es können jedoch Empfehlungen getätigt werden, welche Werte für die Parameter abhängig von der Selektionsmethode noch weiter betrachtet werden sollten. Bei Verwendung der Roulette-Selektion als Selektionsmethode erwies sich der höhere Wert für die Elitenanzahl als vorteilhaft. In weiteren Experimenten könnte untersucht werden, wie stark die Elitenanzahl ansteigen kann, bis der positive Effekt aufgrund zu geringer Diversität wieder schwindet. Vermutlich besteht eine Abhängigkeit dieses Maximums zur gewählten Populationsgröße. Da sich im Zusammenspiel mit vielen Eliten auch eine hohe Mutationsrate als vorteilhaft hinsichtlich der erreichbaren Fitnesswerte erwiesen, sind auch in diesem Zusammenhang weitere Experimente notwendig. Möglicherweise führt mit steigender Elitenanzahl auch eine weiter steigende Mutationsrate zu besseren Ergebnissen.

Wurde die Rang-Selektion gewählt, so erwies sich eine geringe Populationsgröße als vorteilhaft. Inwieweit sich dies mit anderen maximalen und minimalen Erwartungswerten verändert, muss untersucht werden. Durch einen anderen maximalen und minimalen Erwartungswert lässt sich regulieren, wie viel größer die Selektionswahrscheinlichkeit des fittesten Individuums im Vergleich zum am wenigsten fiten Individuum ist. Durch einen höheren maximalen Erwartungswert lässt sich der Selektionsdruck signifikant erhöhen. Vor allem im Zusammenhang mit höheren Elitenanzahlen können hier vermutlich noch bessere Auslastungen realisiert werden.

Die Wettkampf-Selektion führte bei den getesteten Werten für die unterschiedlichen Parameter zu den besten Ergebnissen. Vereinzelt wurden Maschinenauslastungen

über 90% erreicht, was den Werten der Push- und Pull-Steuerung von allen Ergebnissen am nächsten ist. Die Auswirkung anderer Siegwahrscheinlichkeiten neben 75% muss in weiteren Durchläufen erfasst werden und Populationen mit mehr als 3200 Individuen könnten zu besseren Ergebnissen führen.

5 Diskussion des Vergleichs

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen nicht, dass der Genetische Algorithmus den Heuristiken bei der Maschinenbelegungsplanung von Matrix-Montage-Systemen überlegen ist. Letztere erreichen Maschinenauslastungen von 93,08 Prozent und 94,09 Prozent. Der GA hingegen konnte bei der beschriebenen Umsetzung Auslastungen von 90,01 Prozent realisieren. Der Grund für das schlechtere Abschneiden des GA deutet darauf hin, dass nur eine kleine Anzahl an Lösungen betrachtet wird. Hinzu kommt die Tatsache, dass der GA deutlich rechenaufwändiger ist als die Heuristiken. In Anbetracht der Rechenzeit liefern Heuristiken anscheinend schon gute Ergebnisse und sind deshalb praktikabler. Dennoch ist durch weitere Optimierung und Parameterisierung nicht ausgeschlossen, dass noch eine bessere Lösung mit dem GA gefunden werden kann. Dahingehend besteht ein Bedarf weiterer Verbesserung auch hinsichtlich der Rechenzeit.

6 Fazit und Ausblick

Es konnten Zusammenhänge zwischen den Selektionsmechanismen und den Kombinationen der Modellparameter hergestellt werden. So unterscheidet sich die vorteilhaften Populationsgrößen je nach Selektionsmechanismus, während eine höhere Elitenanzahlen und Mutationsraten stets positive Auswirkungen zur Folge haben. Insgesamt wurden die besten Ergebnisse mit der Wettkampfselektion erreicht, welche bei einigen Parameterkombinationen Auslastungen von über 90% in Aussicht stellt. Die vergleichenden Heuristiken erreichten Maschinenauslastungen von 93,08 Prozent und 94,09 Prozent. Der GA schnitt folglich schlechter ab, birgt aber aufgrund seiner Vielzahl an Parameterkombinationen weiteren Forschungsbedarf. Aufgrund der erkannten Zusammenhänge zwischen Parameterwerten und den erreichbaren Auslastungen lässt sich vermuten, dass der GA weiteres Verbesserungspotential hat und auch bessere Ergebnisse bringen könnte. Neben den reinen Modellparametern sollte auch hinsichtlich der Rekombinationsmechanismen weiter experimentiert und geforscht werden. Auch die Rechenzeit ist ein weiterhin zu berücksichtigender Faktor. In der durchgeführten Simulation wurde bei einer Berechnung mit einem Kern eine Rechenzeit von circa 55 Minuten für einen Durchlauf der vorteilhaftesten Parameterkombination benötigt.

Die zentrale Steuerung von Matrix-Montage-Systemen hat das Potential, höhere Auslastungen als dezentrale Steuerungsmethoden zu erreichen, da sie in der Lage ist, das Gesamtsystem zu betrachten. Ein GA ist geeignet, um gute Maschinenbelegungspläne zu erstellen. Der in dieser Arbeit vorgestellte Entwurf konnte zwar die Ergebnisse der dezentralen Steuerungsmechanismen nicht übertreffen, doch es konnten Richtungen für weitere Experimente aufgezeigt werden. Durch weitere Forschung kann es möglich sein, dass die Auslastungen des GA die der simpleren Steuerungsalgorithmen übertreffen und darüber hinaus von positiven Eigenschaften zentraler Steuerungen profitiert werden kann.

7 Literatur

- Aytug, H.; Khouja, M.; Vergata, F. E.: Use of genetic algorithms to solve production and operations management problems: a review, in: International Journal of Production Research, 41:17 (2003) 3955–4009.
- Buttelmann, Maik; Lohmann, Boris: Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion, in: at – Automatisierungstechnik, Ausgabe 52 (2004), S. 151–163.
- Echsler Minguillon, Fabio: Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion, Stuttgart 2020.
- Greschke, Peter: Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung, Vulkan Verlag, Essen 2016.
- Greschke, Peter; Herrmann, Christoph: Das Humanpotenzial einer taktunabhängigen Montage, in: ZWF, Ausgabe 109 (2014), S. 687–690.
- Koren, Yoram: The Global Manufacturing Revolution. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc 2010.
- Popp, Julian: Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band, Dissertation Universität Stuttgart, Stuttgart 2018.
- Schönemann, Malte; Herrmann, Christoph & Greschke, Peter & Thiede, Sebastian: Simulation of matrix-structured manufacturing systems, in: Journal of Manufacturing Systems, Ausgabe 37, (2015) S. 104–112.
- VDI 6224 Blatt 1: Bionische Optimierung – Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung, in: VDI-Fachbuch Bionik 2012.