

# Optimierungsmethoden der Reihenfolgeplanung mit Hilfe von Simulation

## *Optimization methods of sequence planning using simulation*

János Jósvai, Széchenyi István Universität, Győr (Hungary), janos.josvai@sze.hu

**Abstract:** The paper focuses on the permutation flow shop problem (PFSP) and its solving optimisation methods. The research work has investigated evolutionary, heuristic and metaheuristic methods. Two mainly different test environments were used. The first one was an often-used theoretical PFSP test problem; the second one was a real-world problem and its application. Simulation models were built using Plant Simulation to investigate the performance of the methods on these problems. Direct production data is used in the real-world model. The research work established optimisation tools within the simulation environment. Large amount of simulation runs provided results to evaluate the different simulation optimisation tools. A modified heuristic algorithm has been recommended in this paper. According to the theoretical experiments a real-world investigation was performed to determine the efficiency of simulation optimisation tools in real-world application.

## 1 Einführung

Produktionssysteme müssen heutzutage auch unter schwierigen Planungsprämissen ein positives Ertragsergebnis gewährleisten. Insbesondere erschweren kurzfristige Auslastungsschwankungen eine belastbare Planung. Komplexe Endprodukte, eine hohe Anzahl von Produktvarianten (mass customization) und unterschiedlichste Produktkonfigurationen erschweren zusätzlich die Einhaltung der Ertrags- und Qualitätsziele und schaffen neue technologische Herausforderungen.

Ein weiterer Aspekt der die Planung von Produktionssystemen maßgeblich beeinflusst sind die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen. Innovationen aus Forschung und Entwicklung sollen in möglichst kurzer Zeit auf den Markt gebracht werden. Folgende Tendenzen belegen diese Entwicklung:

- Bei gesteigertem Angebotsspektrum um 25 Prozent auf knapp acht Modelle pro Marke haben sich die Modellzyklen im Automobilbau während der letzten 20 Jahre um ca. 4 Jahre verkürzt.
- Wurden Ende der 80er Jahre im Mercedes-Produktionsverbund noch 0,9 Anläufe pro Jahr realisiert, so sind es aktuell durchschnittlich 2,5 Anläufe pro Jahr.

- Innovation und technischer Fortschritt werden als wettbewerbsdifferenzierende Merkmale erkannt und systematisch verfolgt. Der damit verbundene schnelle Wechsel in den Fahrzeuggenerationen führt zu einer Häufung von Neuanläufen in der Automobilindustrie.

Der Eigenfertigungsanteil der Original Equipment Manufacturer (OEM) wird bis 2015 weiter von 35% auf 20% abnehmen. Dies führt zu weiteren strukturellen Veränderungen in der Automobilindustrie. Steigende Variantenzahlen, kürzere Produktlebenszyklen und vieles mehr führen zu einer enormen Komplexität in Produktionssystemen, was eine große Herausforderung in den Bereichen Flexibilität und Produktivität darstellt. (Ackermann 2007; Erdélyi 2009; Hejazi und Saghafian 2005; Näser 2007)

Produktionsplanung und Produktionssteuerung wurden durch wirtschaftliche Ziele und durch Zunahme von Produktvarianten bedeutend, damit der Erfüllungsprozess der Bestellungen gesteuert werden kann. (Hopp und Spearman 2008; Kühn 2006)

Dieser Artikel bezieht sich auf die klassische Montagelinie, die durch Henry Ford eingeführt wurde. Die einzelnen Montagestationen sind durch ein getaktetes Fördersystem verkettet. Diese Art von Montagelinien wird auch Flowshop System genannt. In diesem Fall müssen  $n(1, \dots, n)$  Aufträge auf  $m(1, \dots, m)$  Maschinen erfüllt werden. Die Ausführungszeit an der jeweiligen Station für einen Auftrag soll mit  $T_{k,j}$  bezeichnet werden, wobei  $k=(1, \dots, m)$  und  $j=(1, \dots, n)$  feste Zeitwerte, im voraus bekannt und nicht negativ sind. Folgende allgemein anerkannten Voraussetzungen dieser Problemstellung, die auch Permutation Flow Shop Problem (PFSP) genannt wird, sind (Hejazi und Saghafian 2005; Ruiz und Maroto 2005; Zobolas et al. 2009):

1. Jeder einzelne Auftrag darf gleichzeitig nur auf eine Maschine ausgeführt werden.
2. Jede einzelne Maschine darf gleichzeitig nur mit einem Auftrag beschäftigt sein.
3. Das Unterbrechen der Ausführung eines Auftrages ist verboten.
4. Die Aufträge sind unabhängig voneinander und am Anfang verfügbar.
5. Die Rüstzeiten der Maschinen sind minimal, deshalb werden sie vernachlässigt.
6. Die Maschinen stehen in Vollzeit zur Verfügung.
7. Eine Zwischenlagerung zwischen den Stationen ist erlaubt.

Das Ziel dieser Problemstellung ist eine optimierte Auftragsreihenfolge unter gegebenen Kriterien zu bestimmen. In der Literatur ist das meistangewandte Kriterium die Minimierung der Durchlaufzeit ( $C_{\max}$ ).

## 2 Testumgebung für Reihenfolgeplanung

Um die Problemstellung von PFSP genauer untersuchen zu können, werden für den Problembereich entsprechenden Testaufgaben benötigt. Um die Leistungsfähigkeit der Lösungsmethoden analysieren zu können, werden mehrere Aufgabenspezifikationen mit unterschiedlicher Schwierigkeit und Größe gebraucht. Während der Untersuchung wurden die unterschiedlichen Lösungsmethoden mit Hilfe von theoretischen Testaufgaben und realen Daten aus der Industrie analysiert.

### 2.1 Theoretische Testaufgaben

Laut Literaturrecherche benutzen zahlreiche Autoren die Testaufgabenammlung von Taillard (1993). Diese sehr häufig angewendete Aufgabensammlung beinhaltet

Problemstellungen von unterschiedlicher Komplexität. Die Maschinenanzahl liegt bei 5 bis 20 Maschinen, wobei die Auftragszahl minimal 20, maximal 500 sein kann. Hier sind die Aufträge unterschiedlich voneinander. In der vorher definierten Problemstellung gehören zu jedem Maschinen-Auftrags-Paar zehn unterschiedliche Arbeitszeitmatrizen. Während der Untersuchungen wurden alle von den Arbeitszeitmatrizen definierten Probleme für jedes Maschinen-Auftrags-Paar ausgewertet. Um die Leistungsfähigkeit bestimmen zu können wurden die bisher besten Ergebnisse betrachtet, die der Aufgabenspezifikation beigefügt waren. Der sogenannte Relativ Percentage Deviation Parameter wurde mit Hilfe der Analyseergebnisse (*Ergebnis*) und den (Aufgabenspezifikation beinhaltenden) bisher besten Ergebnissen (*Best*) bestimmt. Die Formel wird von Gleichung 1 angegeben.

$$RPD = \frac{\text{Ergebnis} - \text{Best}}{\text{Best}} \cdot 100 \quad (1)$$

## 2.2 Industrielle Problemstellung

Um die Leistung der Methoden zu prüfen wurde eine Problemstellung anhand eines realen Industrieproblems definiert. Die erstellte Produktionsumgebung beinhaltet 57 Maschinen, und es werden 40, bzw. 227 Aufträge erfüllt. Der Basiswert dieser Umgebung wird von dem ursprünglichen Planungsprogramm aus der Industrie bestimmt, das Ergebnis dieser Reihenfolge ist der Grundwert für die Methodenanalysen, der RPD Wert wird in diesem Fall anhand des Planwertes (*Plan*) bestimmt. Die Rechnungsweise wird in Gleichung 2 angegeben, wobei mit *Ergebnis* die aktuelle Leistung der untersuchten Methode bezeichnet wird.

$$RPD = \frac{\text{Ergebnis} - \text{Plan}}{\text{Plan}} \cdot 100 \quad (2)$$

## 3 Lösungsmethoden

Die untersuchte PFSP-Aufgabe ist NP-vollständig, für die Lösung können evolutionäre und heuristische Methoden angewendet werden. In der Literatur wurden diejenigen Verfahren gesucht, welche die beste Leistung zeigen, rekonstruierbar und implementierbar, bzw. praxistauglich sind. Die Methoden aus dem *State of the art* wurden ausgewählt und weiterentwickelt.

- Genetische Algorithmen: Dies ist eine der bekanntesten evolutionären Verfahren, die Rekombinationsparameter ermöglichen problemorientiertes Tuning.
- NEH Heuristik: Diese Methode wurde von Nawaz et. al. entwickelt, kann als „alt“ bezeichnet werden, liefert jedoch sehr gute Ergebnisse. (Nawaz et al. 1983)
- IGA Verfahren: Ist eine konstruktive Heuristik, hat aber konstruktive und destruktive Phasen, die von lokaler Suche ergänzt wird. Dabei wird auf iterativer Weise das Ergebnis bestimmt. (Ruiz und Stützle 2007)

Um die ausgewählten Verfahren zu implementieren und auszuführen und um geeignete Produktionsprozesse dynamisch zu simulieren, wurde die Plant Simulation Umgebung benutzt. Nach der Implementierung des NEH Verfahrens wurde diese Umgebung weiterentwickelt. Die Modifikation untersucht die Durchlaufzeit der zu

produzierende Produktpaare. Die Implementation wurde ausgearbeitet. Die Methode wird als PNEH bezeichnet. Es wurden Simulationsläufe ausgeführt, um die genannten Problemstellungen zu analysieren.

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse für kleine Auftragszahlen zusammen. Die Produktionsstrukturen mit 5, 10 und 20 Maschinen mussten 20 unterschiedliche Aufträge produzieren. Alle theoretischen Testaufgaben beinhalten den Best Wert für die Durchlaufzeit. Die RPD Leistungen wurden unter Verwendung der bereits beschriebenen Formel bestimmt. Tabelle 1 fasst die Durchschnittswerte der RPD Ergebnisse der zu einem Maschine-Auftrags-Paar gehörenden zehn Problemstellungen zusammen. Es ist gut erkennbar, dass das PNEH Verfahren für die benannten Aufgaben eine bessere Leistung liefert als die NEH Heuristik.

**Tabelle 1:** Leistungen der NEH und PNEH Verfahren (RPD [%])

Anzahl der Maschinen	NEH	PNEH
5	3,25	2,96
10	4,59	4,17
20	3,7	3,56

Die Plant Simulation Simulationssoftware enthält ein hochentwickeltes eingebautes auf Basis des genetischen Algorithmus funktionierendes Optimierungsinstrument, im Weiteren TGA genannt. Zu dessen Konfiguration wurden zahlreiche Operatoreinstellungsexperimente durchgeführt. Als Referenz wurde der Parametersatz verwendet, der das bestmögliche Ergebnis lieferte. Das TGA Instrument ist zurzeit *State of the art*, die Leistungen der sonstigen Methoden wurden mit den optimierten Ergebnissen des TGA verglichen.

Das Ergebnis der Forschungsarbeit zeigt, dass sich für die Lösung der PFSP Aufgabe, neben dem genetischen Algorithmus, die NEH und IGA Heuristiken als beste Methoden erwiesen.

Mittels des definierten Indikators (s. Gl. 3) wurden die bei den theoretischen Aufgaben erreichten Werte – früher definiert als RPD – mit der Leistung des TGAs verglichen. Die prozentuellen Werte in den Tabellen 2 und 3 zeigen den Durchschnitt der Verhältniszahlen bei den Methoden. Die Tabellen bieten ein Punktesystem, um zur Lösung einer gegebenen Aufgabe den richtigen Algorithmus zu wählen.

$$Ind_{Heur(M,J)} = \frac{\overline{RPD}_{Heur(M,J)}}{\overline{RPD}_{TGA(M,J)}} \quad (3)$$

**Tabelle 2:** Indikatoren der Simulations-Optimierungswerkzeuge

Leistung (Ind <sub>Durchschn.</sub> )		Rechenzeit	
IGA	27,3 %	NEH	6,7 %
Neue PNEH	68,7 %	Neue PNEH	20,5 %
NEH	69,4 %	TGA	100 %
TGA	100 %	IGA	1197 %

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der kleinen und mittelgroßen Modelle zusammen. Eine Bewertung des Verfahrens ergibt, dass

- die IGA Methode die besten Ergebnisse liefert
- die NEH Methode die geringste Rechenzeit benötigt,
- was beide Gesichtspunkte anbelangt, das neuentwickelte PNEH Verfahren eine ausgeglichene Leistung liefert.

Die in der industriellen Praxis vorkommenden kurzen Entscheidungszeiträume bedingen schnelle Rechenmethoden. Die Methoden mit längerem Zeitbedarf bieten ein genaueres Ergebnis, ihr Einsatzgebiet liegt in der Zusammenstellung der wöchentlichen Produktionsprogramme. Die ständige Leistungszunahme der Hardware wird in geraumer Zeit die tägliche Anwendung der sehr rechenintensiven Lösungsmethoden ermöglichen.

Die Ergebnisse für die Berechnung von als klein bewertete Aufgaben sind in der Tabelle 3 zu sehen. Für die Größe der Aufgaben ist es charakteristisch, dass aus 5, 10 und 20 Maschinen bestehende Systeme etwa 20 verschiedene Produkte in dem untersuchten Zeitabstand produzieren. Die Ergebnisse der Tabelle zeigen den Durchschnittswert aller Leistungskennzahlen und der Rechenzeit. Nach der Analyse ist festzustellen, dass im Falle der beiden Aspekte die neuentwickelte PNEH Methode das beste Ergebnis bietet.

**Tabelle 3:** Reihenfolge der Optimierungswerkzeuge bei kleinen Auftragszahlen der theoretischen Testdaten

	Leistung (Ind <sub>Durchschn.</sub> ) und Rechenzeit
Neue PNEH	68 %
NEH	71 %
TGA	100 %
IGA	167 %

Während der Forschungsarbeit wurde neben der Modellierungssoftware eine Optimierungslösung ausgearbeitet, die im Falle einer gut definierten Aufgabe eine Reaktion vor Produktionsbeginn und bei Störung eine sofortige Reaktion in der Planung ermöglicht. Auf Grund der Experimente wurde bestätigt, dass mit der Hilfe der Methode die Zeit der Optimierung reduziert werden kann. Diese Entwicklung

kann die Einsetzung der implementierten Methoden in die industrielle Umgebung beschleunigen und sie kann die Optimierung und die erreichten Werte verbessern. Die in der Struktur des Produktionssystems und in der Produktzusammensetzung zu erfolgenden Methodenänderungen fordern weitere Entwicklungsarbeit.

## 4 Zusammenfassung

Die Produktions-Simulation und Analyse von Industriesystemen hat ein sehr bedeutendes Potential. Die untersuchten Optimierungswerkzeuge können in der Praxis auf Basis der theoretischen und industriellen Versuche und bezogen auf Leistung und Laufzeit angewendet werden. Anhand der Ergebnisse der Forschung und laut der Rückmeldung aus der Industrie können bei dieser Art von Optimierung 2-10% Zuwachs in der Produktionsmenge erreicht werden. Für die Forschung ergibt sich ein sehr breiter Entwicklungsbereich für die Optimierung mit Hilfe von zusammengesetzten Zielfunktionen, wobei die Einflüsse der Produktionsmengen der Produktvarianten auf die Leistungsfähigkeit der Lösungsmethoden untersucht werden können.

## Literatur

- Ackermann, J.: Modellierung, Planung und Gestaltung der Logistikstrukturen kompetenzzellenbasierter Netze. Dissertation, TU Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Heft 59, 2007.
- Erdélyi, F.: A globális válság néhány technológiai vonatkozása. In *Gépgyártás XLIX.* 3., S. 13-21, 2009.
- Hejazi, S. R.; Saghafian, S.: Flowshop-scheduling problems with makespan criterion: a review. In *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 14., S. 2895-2929, 2005.
- Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: *Factory Physics*. Third Edition, McGraw Hill 2008.
- Kühn, W.: *Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München Wien: Carl Hanser 2006.
- Näser, P.: Methode zur Entwicklung und kontinuierlichen Verbesserung des Anlaufmanagements komplexer Montagesysteme. Dissertation, TU Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Heft 56, 2007.
- Nawaz, M.; Enscore, Jr.; E.E., Ham, I.: A heuristic algorithm for the m-machine, n-job, flow-shop sequencing problem. *OMEGA, The International Journal of Management Science*, 11 (1), S. 91-95, 1983.
- Ruiz, R.; Maroto, C.: A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics. *European Journal of Operational Research*, 165, S. 479-494, 2005.
- Ruiz, R.; Stützle, T.: A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 177., S. 2033-2049, 2007.
- Taillard, E.: Benchmarks for Basic Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*, 64., S. 278-285, 1993.
- Zobolas, G.I.; Tarantilis, C.D.; Ioannou, G.: Minimizing makespan in permutation flowshop scheduling problems using a hybrid metaheuristic algorithm. *Computers & Operations Research*, 36., S. 1249-1267, 2009.