

# Optimierung des Designs modularer Montagesysteme

Sören Bergmann<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Fachgebiet Informationstechnik in Produktion und Logistik, TU Ilmenau, Max-Planck-Ring 12, 98693 Ilmenau, Deutschland; \*soeren.bergmann@tu-ilmenau.de

**Abstract.** Der Wunsch nach mehr Flexibilität in Fertigungssystemen, insbesondere, wenn verschiedene Produkte bzw. viele Produktvarianten in einem Produktionssystem gefertigt werden, führt, besonders in der Automobilindustrie, zur Abkehr vom Fertigungsprinzip der klassischen Linienfertigungen hin zu eher flexiblen und werkstatorientierten Produktionssystemen. Eine der Herausforderungen in diesen so genannten modularen Montage- bzw. Produktionssystemen ist das Systemdesign, insbesondere die Zuordnung der Tätigkeiten auf die einzelnen Fertigungsinseln. Einen Ansatz, diese Zuordnung zu verbessern, bietet die simulationsbasierte Optimierung. In diesem Beitrag wird ein Konzept zur simulationsbasierten Optimierung der Tätigkeitszuordnung zu einzelnen Fertigungsinseln in modularen Montagesystemen vorgestellt und anhand einer Fallstudie demonstriert. Zum Einsatz kommen hierbei genetische Algorithmen, speziell der NSGA-II-Algorithmus, welcher auch mehrkriterielle Optimierung ermöglicht.

## Einleitung

Der in den letzten Jahren zunehmende Wunsch des Kunden zu mehr Individualität stellt Unternehmen vor neue Herausforderungen, welche sich durch kürzere Innovationszyklen und damit einhergehend oft auch kürzere Produktzyklen sowie durch äußere Einflüsse durch den Markt, Staat etc. noch verstärkt werden [12].

Dem folgend besteht eine wesentliche Anforderung an moderne Produktionssysteme, insbesondere in der Endmontage, darin, flexibel auf sich ändernde Bedingungen reagieren zu können, hierbei aber die Wirtschaftlichkeit der Produktion für die zum Teil große Zahl der durch ein Produktionssystem zu fertigenden Produkte bzw. Produktvarianten zu wahren [5, 16, 18].

Eine besonders in der Automobilindustrie, aber nicht beschränkt auf diese, gewonnene Erkenntnis ist, dass klassische Linienfertigungen an ihre Grenzen zu stoßen

drohen, wodurch eine Abkehr von diesem Fertigungsprinzip hin zu flexibleren Systemen zu untersuchen ist. Erste Pilotprojekte sind hierbei bereits gestartet [9]. In der Praxis sind verschiedene Bezeichnungen und Spielarten, wie beispielsweise „modulare Montage“ [2], „Flexi-Line“ [14] oder „Full-Flex-Werk“ [4] zu finden. Im Folgenden werden solche Konzepte unter dem Sammelbegriff der modularen Produktions- bzw. Montagesysteme subsumiert.

Ein solches modulares Produktions- bzw. Montagesystem besteht aus anpassungsfähigen Arbeitsstationen (Fertigungsinseln) mit spezifischen Werkzeugen, an denen ein oder oft mehrere unterschiedliche Produktions- bzw. Montageschritte durchgeführt werden können und welche durch fahrerlose Transportsysteme (FTS) verbunden sind. Hierbei entscheidet das System ad hoc, unter Berücksichtigung der vorhandenen technischen Restriktionen und der individuellen Aufgabenpakete der zu fertigenden Produkte bzw. Produktvarianten, welchen Weg das Produkt durch das Produktionssystem nimmt [5].

Neben der großen Herausforderung der Steuerung solcher Systeme ist das Systemdesign entscheidend für die Performance des Produktionssystems in Gänze. Wesentliche Punkte innerhalb des Systemdesigns sind in der Festlegung der Zahl der Fertigungsinseln sowie der Aufgabenverteilung auf diese zu sehen [11]. Ein möglicher Ansatz zur Lösung solcher komplexen dynamischen Problemstellungen stellt die simulationsbasierte Optimierung, z. B. unter Nutzung genetischer Algorithmen, dar [17]. Die Konzeption und Implementierung eines solchen Ansatzes sowie eine kleine Fallstudie stehen im Fokus dieses Beitrags.

Der Beitrags ist hierbei wie folgt aufgebaut: nach der Einleitung folgt eine Definition sowie ein Überblick zur modularen Produktion/Montage auf der einen Seite und zur simulationsbasierten Optimierung auf der anderen Seite. Danach wird das Konzept zur simulationsbasierten Optimierung der Zahl der Fertigungsinseln sowie der

Aufgabenverteilung auf diese, als wesentliche Komponente des Systemdesigns eines modularen Montagesystems, vorgestellt. Das Konzept wird im nächsten Abschnitt anhand einer akademischen Fallstudie demonstriert. Ein Kapitel mit Fazit und Ausblick schließt den Beitrag ab.

## 1 Grundlagen und Stand der Forschung

### 1.1 Modulare Montage

Beim Einsatz des Konzepts der modularen Montage, welches hier synonym für eine Reihe ähnlicher Begriffe genutzt wird, wird das klassische Prinzip der Fließfertigung zugunsten einer eher werkstatorientierten Montage aufgelöst. Die Fertigung, oft wird die Endmontage von z. B. Automobilen betrachtet, erfolgt in der modularen Montage auf Fertigungsinseln bzw. Stationen. Diese können jeweils sehr flexibel und abhängig des jeweilig zu fertigenden Produktes bzw. der Produktvariante verschiedene Aufgaben verrichten. Der Transport der Werkstücke zwischen den Fertigungsinseln sowie auch der Transport von Material wird von FTS übernommen.

Zusammenfassend ist eine modulare Montage durch folgende Charakteristiken gekennzeichnet:

- Entkoppelte Arbeitsstationen mit individuellen Taktzeiten
- Mehrere Tätigkeiten / Fähigkeiten je Fertigungsinsel
- Flexible Materialflüsse mittels FTS

Zu beachten ist, dass keine fixen Arbeitsschrittfolgen definiert werden, sondern die Wahl des nächsten Arbeitsschrittes basierend auf den für das konkrete Produkt technisch möglichen nächsten Schritten, dem Systemdesign, sowie dem aktuellen Zustand des Produktionssystems erfolgen. Die Definition der technisch möglichen nächsten Schritte erfolgt in der Regel mittels Vorranggraphen. Im Rahmen der Zustandsanalyse des Produktionssystems können verschiedenste Kennwerte herangezogen werden. Diese reichen von eher einfachen Erhebungen, z. B. bzgl. den Warteschlangenlängen vor möglichen nächsten Stationen zum Entscheidungszeitpunkt, über Daten bzgl. des eigenen Produktionsfortschrittes bis hin zu komplexen Betrachtungen im Zusammenspiel mit den konkurrierenden Aufträgen im System.

Das Systemdesign selbst hat verschiedene Gestaltungsdimensionen vom grundlegenden Layout d. h. der

grundlegenden räumlichen Struktur möglicher Fertigungsinseln über die Aufgaben und Tätigkeitsverteilung bis hin zur Bestimmung der Größe der FTS-Flotte, der Wahl der Steuerungsalgorithmen, insbesondere für das Routing der FTS, und dem Materialversorgungskonzept. Einzelne Teilaspekte des Systemdesigns werden in der Praxis durch eine Vielzahl technischer und organisatorischer Restriktionen eingeschränkt, z. B. können technische Parameter verbieten, dass bestimmte Tätigkeitskombinationen an einer Fertigungsinsel durchgeführt werden können [5, 15].

Das Konzept der modularen Montage führt zu einer inhärenten Flexibilität der Fertigung, sowohl in Form von Ressourcenflexibilität, d. h. eine Station kann verschiedene Aufgaben wahrnehmen, als auch in Form von Routenflexibilität, da Produkte in verschiedenen Arbeitsschrittreihenfolgen bzw. selbst bei gleichen Reihenfolgen ggf. auf verschiedenen Fertigungsinseln produziert werden können.

Die beiden Flexibilitätsdimensionen werden maßgeblich durch das Systemdesign, insbesondere die Tätigkeitsverteilung, bestimmt. Sowohl Ressourcen- als auch Routenflexibilität sollen im Folgenden neben eher klassischen Kennzahlen zur Bewertung des Designs dienen. Folgende Kennzahlen sind unter anderem zur Bewertung des Systemdesigns denkbar [6, 9]:

- Durchsatz
- Lieferzuverlässigkeit je Produkt/ Produktvariante
- Durchlaufzeiten je Produkt/ Produktvariante
- Flächenproduktivität (Durchsatz bzgl. Fläche)
- Mittlere Auslastung der Fertigungsinseln
- Zurückgelegte Distanz aller FTS
- Zahl der möglichen Routen im System für alle Produkte/Produktvarianten (globale Routenflexibilität)
- Mittlere Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten für den nächsten Arbeitsschritt – EMNS (lokale Routenflexibilität)
- Diverse Kosten etc.

### 1.2 Simulationsbasierte Optimierung

Simulation ist ein etabliertes Werkzeug zur Modellierung, Planung und Steuerung von Produktionssystemen. Die Kopplung von Simulation und Optimierungsalgorithmen ist eine durchaus verbreitete und vielfach untersuchte Methode. Ziel ist es, für ein zu betrachtendes System, bzw. dessen Nachbildung in Form eines Simulationsmodells, die beste (oder zumindest eine gute) Kombination von Systemeinstellungen (Faktoren) zu finden.

Hierbei werden im Prozess der simulationsbasierten Optimierung durch den Optimierungsalgorithmus Faktorwerte (und somit Systemkonfigurationen) zielgerichtet gesetzt, die Simulation wird anschließend zur Bestimmung der Fitness bzw. des Zielwertes/ der Zielwerte unter Einstellung der Faktorwerte genutzt [1, 3, 7, 13].

Im Rahmen der simulationsbasierten Optimierung kommen in der Literatur sehr verschiedene Algorithmen zum Einsatz. Die Wahl des geeigneten Algorithmus hängt hierbei stark von dem zu untersuchenden Anwendungsfall ab [1, 13]. In entsprechenden Veröffentlichungen häufig genutzte Algorithmen sind beispielsweise: genetische Algorithmen (GA), Simulated Annealing, Tabu-Suche, Scatter Search, Ameisenalgorithmen oder auch die Partikelschwarmoptimierung [1, 3]. Zur Optimierung des Designs modularer Montagesysteme wurden vom Autor verschiedene Algorithmen untersucht, im Rahmen dieses Beitrags soll sich auf einen Algorithmus beschränkt werden. Diese Entscheidung basiert auf den in der Literatur beschriebenen allgemein guten Eigenschaften, der Verbreitung der GA sowie der Fähigkeit, je nach genutzter Variante des Optimierungsalgorithmus sogar mehrkriterielle Optimierung zu betreiben. Des Weiteren waren die Ergebnisse der hier aus Platzgründen nicht im Detail beschreibbaren Vorversuchen, bei der Nutzung von genetischen Algorithmen, hier im speziell den für mehrkriterielle Optimierung geeignete non dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II), am vielversprechendsten.

Genetische Algorithmen im Allgemeinen sind Algorithmen aus der Klasse der evolutionären Algorithmen. Hierbei werden einzelne Lösungen (Individuen) durch ihre Faktorwerte (Gene) beschrieben und können z. B. mittels der Simulation bzgl. einer Zielgröße (Fitness) bewertet werden. Zum Start der Optimierung wird eine definierte Menge zufälliger Lösungskandidaten erzeugt (1. Generation der Population) und deren Fitnesswerte ermittelt. Anschließend werden folgende Schritte für die aktuelle Population (Generation) bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums (z. B. bestimmte verstrichene Zeit, bestimmte Anzahl an Generationen erreicht, keine Verbesserung in den letzten Schritten erzielt) durchlaufen:

1. Rekombination/Mutation: Hinzufügen neuer Lösungskandidaten durch Kombination zweier Individuen der aktuellen Generation bzw. zufällige Veränderung eines solchen Kandidaten
2. Bewertung: Ermittlung der Fitnesswerte für alle neuen Lösungskandidaten
3. Selektion: Bestimmung der nächsten Generation der

Population durch Auswahl der besten Lösungskandidaten.

Im Kontext der Optimierung des Designs modularer Montagesysteme soll meist ein Problem mit mehreren ggf. konkurrierenden oder gar gegensätzlichen Zielgrößen, z. B. Auslastung der Fertigungsinseln vs. mittlere Durchlaufzeit der Produkte, gelöst werden. Einer der hierbei meist genutzten (genetischen) Algorithmen ist der NSGA-II, welcher Kompromisslösungen (so genannte Pareto-optimale Lösungen) ermittelt, aus welchen der Nutzer, basierend auf eigenen Präferenzen, die geeignetste auswählen kann. Pareto-optimale Lösungen sind hierbei Lösungen, bei denen sich eine Zielgröße nicht weiter verbessern lässt ohne eine andere zu verschlechtern (nicht dominierte Eigenschaft). Der NSGA-II Algorithmus bewertet nun im Rahmen der Selektion der fittesten Faktorkombinationen (Individuen) aktuell nicht dominierte Lösungen besonders gut [19].

Bezüglich weiteren Details zu genetischer Algorithmen, insbesondere den grundlegenden Operatoren, wird an dieser Stelle auf entsprechende Literatur, z. B. [8], verwiesen. Details des NSGA-II Algorithmus sind unter anderem in [19] zu finden.

## 2 Konzept zur simulationsbasierten Optimierung der Tätigkeitszuordnung in modularen Montagesystemen

Das Konzept zur simulationsbasierten Optimierung des Systemdesigns modularer Montage- bzw. Produktionssysteme (vgl. Abbildung 1) ist möglichst generisch gestaltet worden, um in vielen Anwendungsfällen nutzbar zu sein. So muss als Basis nur ein geeignetes Simulationsmodell mit dem entsprechenden Grundlayout der Produktion vorhanden sein und geeignete Schnittstellen zu diesem ausimplementiert werden, alle sonstigen Rahmenbedingungen sowie die Parameter der Optimierung werden über hinterlegte jederzeit anpassbare Datenstrukturen beschrieben.

Ziel des Konzeptes ist es, dem Planer von modularen Produktions- bzw. Montagesystemen bei der Zuweisung von Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln zu unterstützen und somit die Erzeugung eines möglichst guten Systemdesigns zu unterstützen. Mittelbar kann auch die Zahl der benötigten Fertigungsinseln bestimmt wer-

den, wobei eine Maximalzahl durch das Layout vorgegeben wird und sich der tatsächliche Bedarf durch Maximalzahl minus ggf. nicht mit Tätigkeiten beauftragten Stationen ergibt.

Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, basiert das Konzept auf vier Hauptbestandteilen: Eingangsdaten, Datenbanken, Simulationsmodell, Optimierungsbaustein, welche im folgendem kurz diskutiert werden.

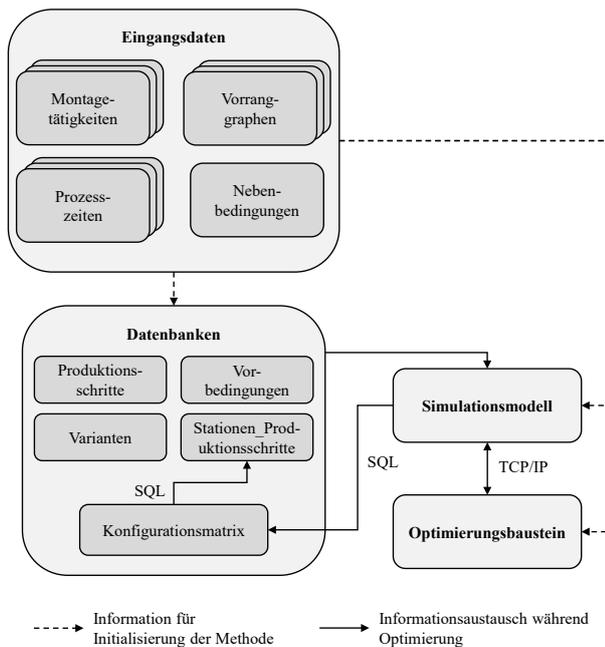


Abbildung 1: Grobkonzept zur simulationsbasierten Optimierung des Systemdesigns modularer Produktionssysteme.

Die wichtigsten Eingangsdaten sind, wie bereits in Abschnitt 1.1 angerissen, die benötigten Prozessschritte der einzelnen Produkte bzw. Produktvarianten, deren Abhängigkeiten zueinander in Form von Vorranggraphen, die Prozesszeiten, sowie Nebenbedingungen wie der Ausschluss bestimmter Tätigkeiten an einer Station (Inkompatibilität) mittels Kompatibilitätsmatrizen, die Zahl der max. verfügbaren FTS sowie die max. erlaubte Zahl von Tätigkeiten je Fertigungsinsel. Neben diesen jeweils zu definierenden Nebenbedingungen sind aktuell einige Bedingungen im Prototypen fest definiert. So ist festgeschrieben, dass jede benötigte Tätigkeit mindestens einer Fertigungsinsel zugewiesen sein muss, um eine gültige Lösung darzustellen. Jede Fertigungsinsel kann zudem nur ein Produkt zur gleichen Zeit bearbeiten (keine Parallelstationen). Des Weiteren wird hier davon ausgegangen, dass jedes FTS nur ein Produkt transportiert und

die Bearbeitung inline erfolgt, d. h. die Bearbeitung erfolgt auf dem FTS, somit wird ein FTS (wenn vorhanden) beim Eintreffen des Produktes im System allokiert und erst nach dessen vollständiger Bearbeitung wieder freigegeben. Die Steuerung der FTS erfolgt aktuell nach einer einfachen Heuristik, bei welcher immer die kürzest mögliche Warteschlange angesteuert wird. Andere Steuerungsalgorithmen sind aber implementierbar wobei dann der Steuerungsalgorithmus auch als weiterer Faktor im Optimierungsprozess genutzt werden könnte.

Die Eingangsdaten aus verschiedenen Quellen werden zunächst während der Initialisierungsphase, zur leichteren Weiterverarbeitbarkeit, in der Datenbankkomponente in einzelne Datentabellen überführt, zusätzlich werden in entsprechenden Tabellen (Konfigurationsmatrizen) die jeweils aktuell betrachteten Systemdesigns gespeichert. Eine Konfigurationsmatrix beinhaltet hierbei für jede Station die zugeordneten Tätigkeiten. Ein Beispiel für eine solche Matrix ist in Abbildung 2 zu sehen.

konfigurations_matrix					
	produktionsschritte	station1	station2	station3	station4
1	A	1	0	1	0
2	B	1	1	0	1
3	C	0	1	1	0
4	D	0	0	1	1

Abbildung 2: Beispiel einer Konfigurationsmatrix.

Die in der Datenbankkomponente gespeicherten Informationen bilden zudem u.a. die Basis zur Initialisierung des Simulationsmodells und des Optimierungsbausteins.

Zur Simulation wird hier auf einen agentenbasierten Ansatz, implementiert in AnyLogic, zurückgegriffen, welcher bereits in [5] als Vergleichsimplementierung herangezogen wurde (siehe Abbildung 3).

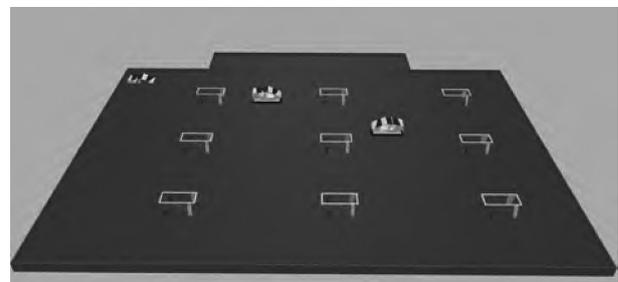


Abbildung 3: Screenshot des AnyLogic Simulationsmodells der modularen Montage.

Auch für die Optimierungskomponente wird auf eine bestehende Software zurückgegriffen, die Wahl fiel auf HeuristicLab [10], da diese zum einen viele Optimierungsalgorithmen unterstützt, das Optimierungsproblem leicht zu parametrieren ist und zudem mittels C# Programmierung leicht Erweiterungen implementiert werden können. Erweiterungen wurden hier konkret sowohl für die Kommunikation des Optimierers mit dem Simulationsmodell per TCP/IP, als auch für die Überprüfung der Nebenbedingungen und ggf. nötigen Korrekturmechanismen entwickelt. Im Prototyp sind sechs verschiedene Zielfunktionen hinterlegt, welche aber jederzeit durch weitere ergänzt werden können.

Aktuell sind folgende Zielfunktionen verfügbar:

- Max. des Durchsatzes
- Max. der Auslastung der Montagestationen
- Min. der zurückgelegten Gesamtdistanz der FTS
- Max. der Auslastung der FTS
- Max der Flexibilität (EMNS)
- Max der Routenflexibilität

Der schematische Ablauf der Optimierung ist Abbildung 4 zu entnehmen.

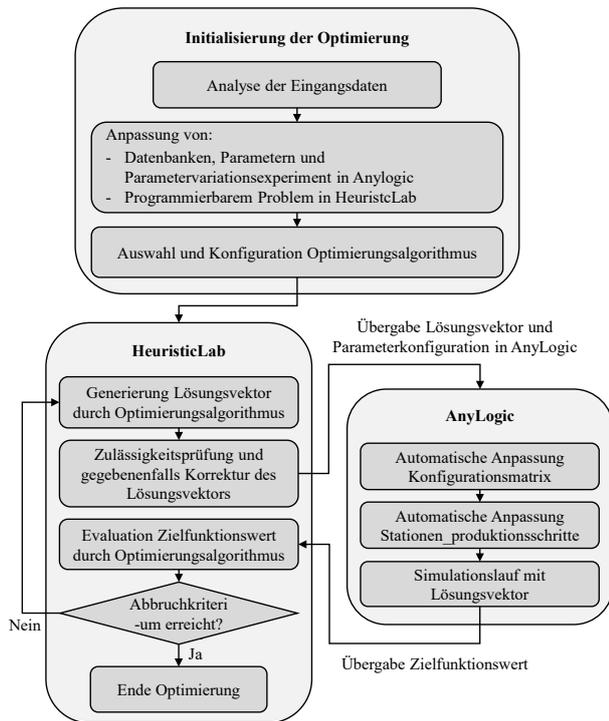


Abbildung 4: Schematischer Ablauf der Optimierung.

### 3 Fallstudie

Zur Evaluierung des Konzeptes wurden verschiedene Szenarien definiert und mittels verschiedener Optimierungsmethoden, Zielfunktionen etc. untersucht.

In diesem Beitrag wird zur Illustration ein fiktives Produktionssystem herangezogen, welches in allen Aspekten an die in der Literatur beschriebenen Realweltssystemen angelehnt ist, aber eine geringere Anzahl von verschiedenen Produktvariationen, Tätigkeiten und Fertigungsinseln aufweist. Ein skalieren auf Systemgrößen, welche in der Praxis auftreten, wird unterstellt, wurde aber bisher nicht untersucht.

In der Fallstudie werden zwei Produkte (P1 und P2) in verschiedenen Varianten gefertigt. Insgesamt sind 7 verschiedene Tätigkeiten (A bis G) auf bis zu 9 Fertigungsinseln (Station 1 – 9) zu verteilen. Die entsprechenden Vorranggraphen der Produkte sind Abbildung 5 zu entnehmen. Produktvarianten ergeben sich aus den optionalen Tätigkeiten. Die dreiecksverteilten Prozesszeiten der einzelnen Tätigkeiten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Ein Produktionsauftrag für eine der Produktvarianten trifft alle 120 Sekunden im System ein. Die Häufigkeit der Produkte bzw. Produktvarianten ist hierbei für alle gleich.

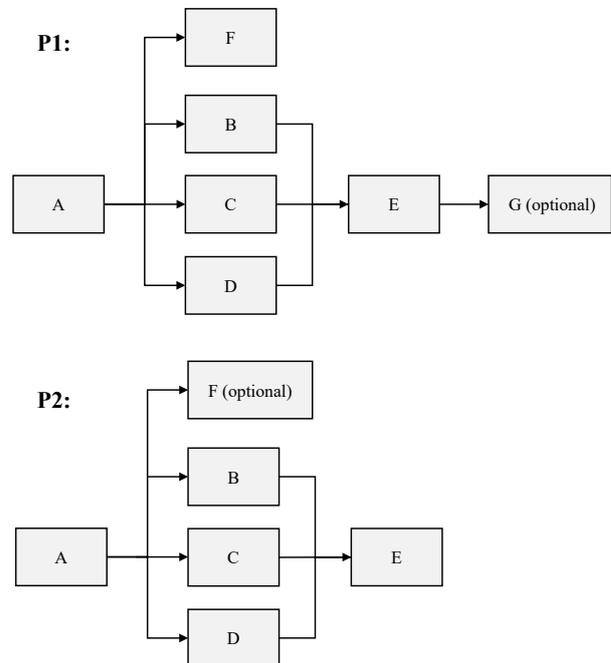


Abbildung 5: Vorranggraphen der Produkte P1 und P2.

Als Fertigungslayout wird eine Matrixstruktur angenommen, welche ein vollständig 2-spuriges Wegenetz aufweist. Die Materialversorgung erfolgt per Warenkörben, welche analog dem Produkt fest mit dem FTS verbunden sind.

Montagetätigkeit	Prozesszeit in Sekunden (min Wert, wahrscheinlichster Wert, max Wert)
A	90, 100, 110
B	180, 200, 220
C	50, 70, 90
D	60, 80, 100
E	200, 220, 240
F	80, 100, 120
G	90, 100, 110

Tabelle 1: Prozesszeiten (dreiecksverteilt).

Als Nebenbedingungen wurden unter anderem einige Inkompatibilitäten zwischen einzelnen Tätigkeiten definiert, diese sind in Tabelle 2 zu sehen. Die Prozesskompatibilitätsmatrix ist dabei so zu lesen, dass sich Tätigkeitskombinationen mit dem Wert 0 an einer Fertigungsinsel ausschließen, hier z. B. die Tätigkeiten A und F. Die maximal zulässige Zahl von Tätigkeiten auf einer Fertigungsinsel wurde zentral auf 4 festgelegt.

	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	1	1	0	0
B	1	0	1	1	1	0	0
C	1	1	0	1	1	0	0
D	1	1	1	0	1	0	0
E	1	1	1	1	0	1	1
F	0	0	0	0	1	0	1
G	0	0	0	0	1	1	0

Tabelle 2: Prozesskompatibilitätsmatrix.

Das skizzierte System wurde mit dem NSGA-II-Algorithmus optimiert. Folgende Werte für die Hyperparameter wurden genutzt:

- Populationsgröße: 100
- Anzahl von Generationen: 6
- Simulationsdauer: 2 Stunden

- Selektionsverfahren: Crowded Tournament Selector
- Rekombinationsverfahren: Rounded Average Crossover
- Rekombinationswahrscheinlichkeit: 90 %
- Mutationsverfahren: Uniform Some Positions Manipulator
- Mutationswahrscheinlichkeit: 5 %

Zunächst wurden der Gesamtdurchsatz und die Gesamtauslastung der Fertigungsinseln als Zielfunktionen untersucht. Die Idee hinter der Wahl der Zielfunktionen war es Lösungen zu finden, die zwar einen möglichst hohen Durchsatz erreichen, aber nicht einfach alle Tätigkeiten maximal oft zuweisen. Idealerweise sind ggf. sogar Lösungen zu finden, in denen weniger als die 9 maximal verfügbaren Fertigungsinseln benötigt werden.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt. Zu erkennen ist, dass Durchsatz im Pareto-Optimum 2 am höchsten ist, wobei allen Fertigungsinseln min. eine Tätigkeit zugewiesen wurde. Pareto-Optimum 3 erscheint hingegen als guter Kompromiss zwischen der Zahl der benötigten Fertigungsinseln (6 der max. 9) und im Vergleich zu den anderen Lösungen auch der Auslastung der Fertigungsinseln sowie dem Durchsatz, der moderat niedriger ist als in Pareto-Optimum 2.

	Pareto-Optimum 1	Pareto-Optimum 2	Pareto-Optimum 3
Durchsatz	15	18	17
Auslastung	32,14 %	28,81 %	31,85 %
Anzahl FTFs	5	5	5
Station 1	F	A	F
Station 2	G	C	G
Station 3	-	E	-
Station 4	-	G	-
Station 5	-	D	E
Station 6	-	F	-
Station 7	E	B	E
Station 8	A, B	A, B	A, B
Station 9	C, D	C, D	C, D

Tabelle 3: Lösungen des NSGA-II-Algorithmus für die Zielgrößen Durchsatz und Auslastung.

	Pareto-Optimum 1	Pareto-Optimum 2	Pareto-Optimum 3	Pareto-Optimum 4
Durchsatz	13	19	15	17
Routenflexibilität	548	211	454	267
Anzahl FTFs	5	5	5	5
Station 1	A, C, D, E	A	B, E	A
Station 2	B	B	D, E	C
Station 3	E, F, G	F	E, F, G	F
Station 4	A, C, D, E	C	D	E
Station 5	A, D	D	A, E	E
Station 6	B, C, D	E	G	B, E
Station 7	E, G	G	D, E	B, D
Station 8	E, F, G	-	A, B, C	E
Station 9	B, C	-	C	G

Tabelle 4: Lösungen des NSGA-II-Algorithmus für die Zielgrößen Durchsatz und Routenflexibilität.

Als zweites Beispiel wurde hier, ebenfalls mit dem NSGA-II-Algorithmus, eine Optimierung bzgl. des Gesamtdurchsatzes und der Routenflexibilität vorgenommen. Hintergrund dieser Wahl der Zielfunktionen ist es, ein Systemdesign zu finden, das zum einen als notwendige Bedingung einen guten Durchsatz hat, zum anderen aber auch eine hohe Flexibilität aufweist. Eine Annahme ist hierbei, dass eine solche hohe Flexibilität ggf. eine gewisse Robustheit gegen Störungen im System, aber auch gegen schwankende Verteilungen der Häufigkeiten der beiden Produkte sichert. Des Weiteren ist ggf. auch die Erweiterung des Systems, z. B. bei der Einführung weiterer Produkte, leichter zu realisieren.

Wie Tabelle 4 zu entnehmen, wurden auch hier Lösungen gefunden, die einen hohen Durchsatz realisieren. So wurde im Pareto-Optimum 2 ein Durchsatz von 19 erreicht. Zu bemerken ist hier aber, dass dies eine Lösung ist, die im Vergleich zu den anderen Lösungen eine eher geringe Routenflexibilität aufweist. Allgemein ist zu sehen, dass Lösungen mit einer hohen Routenflexibilität offenbar eher moderate Durchsätze realisieren. Zudem

geht, wie auch zu vermuten war, eine hohe Routenflexibilität (z. B. im Pareto-Optimum 1) mit der Zuweisung von recht vielen Tätigkeiten je Station und der Nutzung möglichst vieler Stationen einher.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass je nach den Präferenzen des Entscheiders durchaus sehr verschiedene Lösungen relevant werden könnten. Nimmt man an, dass ein hoher Durchsatz wünschenswert ist und auch der Verzicht auf die Nutzung ganzer Fertigungsinseln zum einen Kosten spart aber zum anderem auch positiv im Fall möglicher Erweiterungen ist, so ist das Pareto-Optimum 2 der NSGA-II-Optimierung nach den Zielgrößen Durchsatz und Routenflexibilität zu präferieren. In dieser Lösung wird mit 19 der höchste Durchsatz aller hier ermittelten Lösungen erreicht und dies wobei zwei der möglichen Fertigungsinseln nicht benötigt werden. Allein die ermittelte Routenflexibilität ist im Vergleich zu den anderen hier aufgeführten Lösungen eher gering.

## 4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Konzept zur simulationsbasierten Optimierung der Tätigkeitszuordnung zu Fertigungsinseln als wesentlicher Aspekt des Systemdesigns von modularen Produktionssystemen unter Nutzung des NSGA-II-Algorithmus vorgestellt. Hierzu wurden zunächst die Besonderheiten von modularen Produktionssystemen diskutiert, bevor die Grundzüge der simulationsbasierten Optimierung, insbesondere mittels dem NSGA-II-Algorithmus, beschrieben wurden.

Anhand eines einfachen akademischen Fallbeispiels wurde das Konzept bzw. dessen prototypischen Implementierung demonstriert. Es konnte gezeigt werden, dass durchaus Optimierungspotentiale existieren und auch mit dem Konzept realisiert werden konnten.

In Zukunft sind diverse Richtungen für weitere Forschungen denkbar. So sind weitere Optimierungsalgorithmen sowie das Erweitern bzw. Anpassen der Nebenbedingungen, z. B. Platzbedarfe von Tätigkeiten, möglich. Des Weiteren sind auch Anpassungen an den Korrekturmechanismen bei ungültigen Lösungen ein möglicher Forschungsgegenstand. Schließlich können auch weitere Gestaltungsdimensionen der modularen Produktion einbezogen werden, so wären die Betrachtung von Materialbereitstellungskonzepten oder alternativen Grundlayouts möglich. Schließlich wäre es zudem spannend das Konzept an Echtweltszenarien zu testen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Amaran, S., Sahinidis, N. V., Sharda, B., and Bury, S. J. 2016. Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research* 240, 1, 351–380.
- [2] Audi AG. 2019. *Die Modulare Montage - Fertigungsinseln statt Fließband*. <https://www.audi-illustrated.com/de/smart-factory/Die-Modulare-Montage>. Accessed 28 January 2019.
- [3] Beham, A., Affenzeller, M., and Wagner, S. 2008. Simulation optimization with HeuristicLab. In *Proceedings of the 20th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2008*. DIPTeM, Genova, 75–80.
- [4] Daimler AG. 2018. *Factory 56 – Mercedes-Benz Cars increases flexibility and efficiency in operations*. <https://www.daimler.com/innovation/production/factory-56.html>.
- [5] Feldkamp, N., Bergmann, S., and Straßburger, S. 2019. Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen. Modelling and Simulation of Modular Production Systems. In *Tagungsband der 18. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2019*. Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 391–401. DOI=10.1515/9783110924992-003.
- [6] Foith-Förster, P., Eising, J.-H., and Bauernhansl, T. 2017. Effiziente Montagesysteme ohne Band und Takt. *wt Werkstattstechnik online* 107, 3, 169–175.
- [7] Fu, M. C. 2015. *Handbook of simulation optimization*. International Series in Operations Research & Management Science 216. Springer Science+Business Media, New York.
- [8] Gerdes, I., Klawonn, F., and Kruse, R. 2004. *Evolutive Algorithmen. Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen*. Computational intelligence. Vieweg, Wiesbaden.
- [9] Göppert, A., Hüttemann, G., Jung, S., Grunert, D., and Schmitt, R. 2018. Frei verkettete Montagesysteme. *ZWF* 113, 3, 151–155.
- [10] 2021. *HeuristicLab*. <https://dev.heuristiclab.com/trac.fcgi/>. Accessed 25 October 2021.
- [11] Kern, W., Rusitschka, F., and Bauernhansl, T. 2016. Planning of Workstations in a Modular Automotive Assembly System. In *Proceedings of the 49th CIRP 2016. Factories of the Future in the Digital Environment*. Elsevier BV, Amsterdam, 327–332. DOI=10.1016/j.procir.2016.11.057.
- [12] Koren, Y. 2010. *The Global Manufacturing Revolution. Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*. Wiley Series in Systems Engineering and Management 1. John Wiley & Sons, New York, NY.
- [13] März, L., Krug, W., Rose, O., and Weigert, G., Eds. 2011. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. VDI-Buch. Springer, Heidelberg.
- [14] Mayer, B. 2018. *Ich bin ein Fan von Effizienz*. <https://www.automobil-produktion.de/interviews-734/porsche-produktionsvorstand-reimold-wir-ziehen-alle-register-126.html?page=4>. Accessed 28 January 2019.
- [15] Poll, D. 2016. *Das Ende des Fließbands*. <https://www.produktion.de/trends-innovationen/das-ende-des-fließbands-306.html>. Accessed 23 April 2019.
- [16] Spath, D., Ed. 2013. *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0*. Fraunhofer-Verl., Stuttgart.
- [17] Völker, S. and Schmidt, P.-M. 2010. Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistiksystemen mit Tecnomatix Plant Simulation. Simulation-based Optimization of Production and Logistics Systems using Tecnomatix Plant Simulation. In *Tagungsband der 14. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik - Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. ASIM-Mitteilung 131. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; KIT Scientific Publ, Hannover, Karlsruhe, 93–100.
- [18] Wack, K.-J. 2019. *Interdisziplinäre Absicherung der Produktionsplanung in der Automobilindustrie*. Dissertation. Universitätsverlag, Ilmenau.
- [19] Yusoff, Y., Ngadiman, M. S., and Zain, A. M. 2011. Overview of NSGA-II for Optimizing Machining Process Parameters. *Procedia Engineering* 15, 3978–3983.