Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2023–04–40

Produktionsplanung für den automobilen Karosseriebau – Modell und Optimierung

Grobplanung roboterbasierter Fließmontagesysteme

G. Wrobel, R.-E. Ebert, R. Scheffler

Zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung besteht seit vielen Jahren eine Digitalisierungslücke. Geeignete Softwarewerkzeuge zur Kosten- und Raumabschätzung in der Phase der Grobplanung roboterbasierter Fließmontagesysteme existieren nicht. Abhilfe schaffen Verfahren zum modellbasierten Engineering, die eine durchgängige und flexible Anlagenplanung ermöglichen. Ein dafür erforderliches Optimierungsverfahren und das ihm zu Grunde liegende Modell werden in diesem Beitrag vorgestellt.

STICHWÖRTER

Fabrikplanung, PPS (Produktionsplanung/-steuerung), Fahrzeugbau

Production planning for automotive body shop – model and optimization – Rough Planning of Robotic Assembly Line Systems

A digitization gap has existed between product development and production planning for many years. There is a lack of suitable software tools to estimate the costs and space of robotic assembly line systems. This is remedied by methods of model-based engineering, which allow for consistent and flexible plant planning. The solution involves an optimization procedure developed for this purpose and its underlying model, which enable fast and reliable rough planning.

1 Ausgangssituation

Für die Planung von Fließmontagesystemen kommen oft große monolithische IT-Systeme der Digitalen Fabrik zum Einsatz. Gleiches gilt für die Produktentwicklung, in der sich die Verwendung von CAD-Systemen etabliert hat. Aber welche Verfahren und Tools kommen zwischen Produktentwicklung und Feinplanung von Anlagen, die überwiegend Roboter enthalten, zum Einsatz?

In der industriellen Praxis werden in der Phase der Grob- bzw. Konzeptplanung je nach Akteur unterschiedliche Aufgaben gelöst. Für Automobil-OEM ist es bereits in der Produktentwicklung wichtig, erste grobe, aber verlässliche Informationen zur benötigten Produktionsanlage zu erhalten. Zulieferer und Anlagenbauer müssen in frühen Angebotsphasen ebenfalls eine grobe Anlagenplanung durchführen. Die zentrale Fragestellung aller Akteure ist: Mit welchen Kosten und mit welchem Platzbedarf muss für eine Produktionsanlage gerechnet werden?

Diese Fragestellung enthält ein Optimierungsproblem. Gesucht wird im Allgemeinen die kostengünstigste Anlage, die ein Bauteil unter Vorgabe einer Ausbringungsrate fertigt. Erschwerend kommt hinzu, dass klassische Optimierungsverfahren für roboterbasierte Karosseriebauanlagen nicht geeignet sind. Die Verteilung von Aufgaben auf eine minimale Anzahl Stationen mit einer variablen Anzahl Roboter beinhaltet Problemstellungen der Fließbandabstimmung, Ressourcenoptimierung und Zeitplanung.

Existierende Systeme der Digitalen Fabrik fallen zur Beantwortung dieser Fragestellungen aus. Die gepaart mit Erfahrungswissen zum Einsatz kommenden Bürokommunikationswerkzeuge (hauptsächlich Systeme zur Tabellenkalkulation, Textverarbeitung und Präsentation) sind keine geeigneten Tools, um ein Optimierungsproblem zu lösen.

Um diese Digitalisierungslücke zu schließen, wurden in einem Forschungsprojekt Verfahren und Algorithmen zur modellbasierten Grobplanung von Karosseriebauanlagen entwickelt. In diesem Beitrag werden die entwickelte Optimierungsstrategie und die zu Grunde liegenden Modelle vorgestellt.

2 Stand der Technik

Die in diesem Beitrag vorgestellte Lösung zur Grobplanung von roboterbasierten Fließmontagesystemen lässt sich in der Produktionsplanung den Teilgebieten der Fließbandabstimmung und der Maschinenbelegungsplanung zuordnen [1]. Karosseriebauanlagen haben die Besonderheit, dass hochautomatisierte, roboterbasierte Fertigungsanlagen zum Einsatz kommen.

Die Fragestellungen dieses Beitrags hinsichtlich der Aufteilung der Fertigungsprozesse auf einzelne Stationen unter Berücksichtigung der Taktzeit sind dem Forschungsgebiet der Fließbandabstimmung (ALBP – assembly line balancing problem) zuzuordnen. Seit Mitte der achtziger Jahre [2, 3] bis in die heutige Zeit [4, 5] sind in zahlreichen Publikationen verschiedene Untersuchungen auf diesem Gebiet veröffentlicht worden, die umfangreiche Literaturreviews enthalten [6–8]. Entsprechend der in [1, 2] erfolgten Klassifikation von ALBP kann die Fragestellung dieses Beitrages als ALBP-1 eingeordnet werden, das heißt: Gegeben ist die Taktzeit, gesucht ist das Fließproduktionssystem mit der geringsten Anzahl von Stationen. Ein Spezialgebiet der Fließ-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

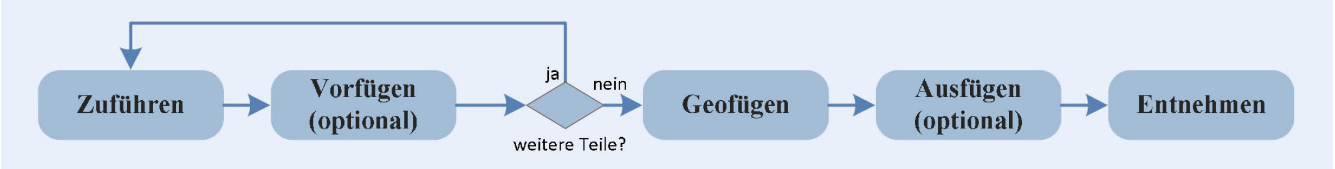

Bild 1. Modell des Prozessablaufs einer Bauteilfertigung. *Grafik: GFal e. V.*

bandabstimmung, dem die Forschungsfragen dieses Beitrags zuzuordnen sind, ist das robotic assembly line balancing (RALB) [10, 11]. Mehrere Veröffentlichungen im akademischen Umfeld zum RALB haben Restriktionen, die dem industriellen Einsatz im Weg stehen, wie die Beschränkung auf einen Roboter pro Station [12, 13] und der Verzicht auf Werkzeugwechsel [14, 15]. In den Arbeiten von Hagemann [16, 17] werden diese Randbedingungen durch den Einsatz von Doppelequipments berücksichtigt.

Die Zuordnung von Robotern zu den Stationen einer Karosseriebauanlage ist ein Problem der Maschinenbelegungsplanung. Dieser Aspekt wird teilweise auch in der Fließbandabstimmung [18] für Karosseriebauanlagen [14] berücksichtigt. Das Design von vollautomatischen Roboterfertigungsanlagen im Karosseriebau ist Gegenstand der Untersuchungen in [9]. Hier wird die Verteilung der Roboter im Hinblick auf einen minimalen Verschleiß der Werkzeuge optimiert. Neuere Arbeiten beschäftigen sich mit Problemen der Fließbandabstimmung und der Belegungsplanung von Anlagen, in denen Roboter und Menschen zusammenarbeiten [19].

Im Unterschied zu den Arbeiten in [9, 14–17, 19] wird in diesem Beitrag eine Optimierung hinsichtlich der Fließbandabstimmung und Maschinenbelegungsplanung vorgestellt, welche die industrierelevanten Randbedingungen, wie Wechselwerkzeuge für alle Roboter, eine beliebige Anzahl Eingangsteile sowie die Zeiten für den Werkzeugwechsel, berücksichtigt.

Die Lösung in diesem Beitrag hat einen Bezug zur Montagefertigung, Robotik und Fertigungsplanung als Bestandteile der Digitalen Fabrik. Die VDI 4499 [20] benennt keine konkreten Werkzeuge zur Grobplanung von Produktionsanlagen. Die existierenden Systeme der Digitalen Fabrik sind sehr stark auf die 3D-Geometrieplanung fokussiert, wie Delmia [21] und Tecnomatix [22], sind sehr komplexe Werkzeuge der Fabrikplanung, wie Fastdesign [23] und unterstützen keine Optimierung, oder sie sind sehr aufwendig, zeitintensiv und kostspielig in ihrer Verwendung und für die Grobplanung wenig geeignet.

3 Modell

Das folgende Kapitel beschreibt das der Optimierung zu Grunde liegende Modell. Das Prozessmodell ist ein Modell der Vorgänge der Fertigung eines Bauteils und ihrer Abfolge. Das Anlagenmodell ist ein Modell einer Karosseriebauanlage.

3.1 Prozessmodell

Die Fertigungsstruktur eines Bauteils wird im Automobilbau in der Regel in Form einer Fügefolge dokumentiert [24]. Die Fügefolge ist eine Beschreibung der Bestandteile und Montagereihenfolge eines Produkts und setzt sich aus mehreren Fügeschritten zusammen [25].

Ein Produkt besteht aus einer Menge von Einzelteilen. In Fügeschritten werden Einzelteile zu sogenannten Zusammenbauten montiert, oder es werden an bereits erstellte Zusammenbauten weitere Einzelteile angefügt. Im Folgenden werden die Montageverfahren in einem Fügeschritt als Prozesse und die Einzelteile beziehungsweise die Zusammenbauten als Bauteile bezeichnet. Ein Prozess enthält alle Montageschritte einer bestimmten Art. In einem Fügeschritt können beliebig viele Prozesse ausgeführt werden. Das daraus resultierende Modell, dessen Prozessablauf in **Bild 1** dargestellt ist, enthält die in den folgenden Absätzen beschriebenen Prozessarten.

Das Zuführen eines Bauteils gliedert sich in die Entnahme eines Bauteils aus einer Box, die Ablage und das Einlegen des Bauteils in eine Fügevorrichtung oder Ablage (oft als Eingangshandling bezeichnet).

Mit Vorfügen wird der Prozess des Fügens von Montageverbindungen bezeichnet, der vor dem Geofügen erfolgt, zum Beispiel das Kleben.

Geofügen ist ein Prozess, bei dem zwei oder mehrere Bauteile durch Verbindungselemente derart miteinander verbunden werden, dass sie danach eine geometrisch stabile Verbindung eingehen. Geofügeprozesse müssen immer in genau einer Vorrichtung in genau einer Station (der Geostation) durchgeführt werden.

Beim Ausfügen werden alle Verbindungselemente gefügt, die für die endgültige Stabilität eines Bauteils erforderlich sind. Ausfügen erfolgt immer nach allen Geofügeprozessen.

Im letzten Prozess Entnehmen wird ein fertig gefügtes Bauteil aus der Vorrichtung entnommen und an die folgende Verarbeitungseinheit weitergegeben (oft als Ausgangshandling bezeichnet).

3.2 Anlagenmodell

Das Anlagenmodell, das dem Lösungsansatz zu Grunde liegt, beschreibt den strukturellen Aufbau eines roboterbasierten Fließmontagesystems und das Verhalten der darin enthaltenen Bestandteile. Das gesamte Fließmontagesystem setzt sich aus mehreren Teilen zusammen. Jeder Fügeschritt wird durch genau ein solches Teilfließmontagesystem realisiert. Es wird vorausgesetzt, dass alle Prozesse eines Fügeschrittes in einem Teilfließmontagesystem abgearbeitet werden. Unter dieser Annahme kann jedes Teilfließmontagesystem für sich als Fließmontagesystem betrachtet und optimiert werden. Im Folgenden wird das Modell genau eines Teilfließmontagesystems betrachtet und als Fließmontagesystem bezeichnet.

Zur Veranschaulichung des Aufbaus eines Fließmontagesystems zeigt **Bild 2** die in der Optimierung wesentlichen Bestandteile: Stationen, Roboter, Vorrichtungen, stationäre Fügeeinrichtungen und Wechselbahnhöfe.

Das äußere zusammenfassende Modellelement ist eine Station. Alle anderen Modellelemente sind immer Bestandteil einer Station. Wichtigste Eigenschaften einer Station sind die Taktzeit, die Gesamtkosten aller enthaltenen Bestandteile sowie deren Platzbedarf.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

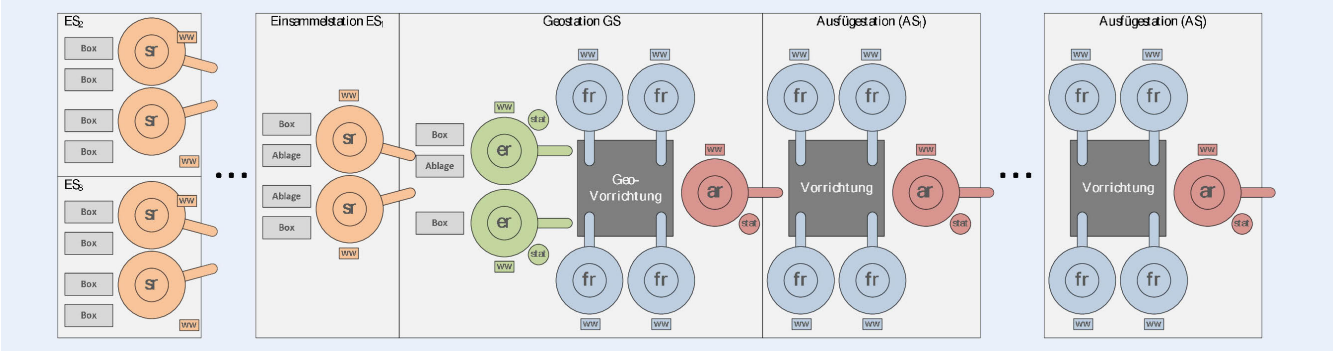

Bild 2. Modell der Struktur eines roboterbasierten Fließmontagesystems. *Grafik: GFal e. V.*

In der Mitte von Bild 2 ist eine Geostation dargestellt. Jedes Fließmontagesystem besteht aus genau einer Geostation. Die Geostation besteht aus einer Menge von Eingangshandhabungs- und Fügerobotern und genau einem Ausgangshandhabungsroboter.

Der Geostation können sogenannte Einsammelstationen vorgeschaltet sein. In diesen Stationen werden Bauteile zusammengelegt, sodass sie von einem Roboter gleichzeitig in die nächste Station eingelegt werden können.

Für Ausfügeprozesse, die nicht in der Geostation abgearbeitet werden können, sind Ausfügestationen nachgeschaltet.

Stationen sind keine aktiven Modellelemente eines Fließmontagesystems, sondern logische Gruppierungen von physisch existierenden Elementen. Das wichtigste physische Element ist ein Roboter. Alle Roboter haben folgende gemeinsame Eigenschaften:

Ein Roboter kann einzelne Aufgaben ausführen, die zur Durchführung von Prozessen erforderlich sind. Diese Aufgaben gehören nicht zwingend zu genau einem Prozess. Ebenso können zum Abarbeiten eines Prozesses mehrere Aufgaben eines oder mehrerer Roboter erforderlich sein. Ein Roboter führt aber immer dieselbe Aufgabensequenz aus. Zwischen einzelnen Aufgaben kann ein Roboter eine gewisse Zeit lang warten. Für das Durchlaufen einer Sequenz, das heißt das Abarbeiten aller Aufgaben plus Wartezeiten, benötigt ein Roboter die Umlaufzeit.

Ein Roboter kann mit unterschiedlichen Werkzeugen bestückt werden und damit verschiedene Aufgaben erfüllen. Werkzeuge können am Roboterarm befestigt sein und abwechselnd eingesetzt werden (Mehrfachequipment) oder durch die Ablage auf sogenannten Wechselbahnhöfen ausgetauscht werden. Es gibt vier verschiedene Arten von Robotern:

- Fügeroboter führen ausschließlich Fügeaufgaben aus.
- Einsammelroboter stehen nur in Einsammelstationen und entnehmen nur Teile aus Entnahmeboxen oder Ablagen und legen diese auf Ablagen ab.
- Eingangshandhabungsroboter entnehmen Teile aus einer Box oder Ablage und legen sie in der Vorrichtung der Geostation ab. Eingangshandhabungsroboter können zusätzlich an der Vorrichtung der Geostation und in einer stationären Fügeeinheit fügen.
- Ausgangshandhabungsroboter können Teile aus einer Vorrichtung einer Station entnehmen und auf einer Endablage oder in der Vorrichtung einer Nachfolgestation ablegen sowie Fügeaufgaben an der Vorrichtung und an einer stationären Fügeinheit ausführen. Die Zeit, in der Roboter an einer Vorrichtung Aufgaben durchführen (Einlegen und Fügen von Bauteilen), wird als „Vorrichtungszeit“ bezeichnet.

4 Optimierung

Im Folgenden wird die Optimierungsheuristik beschrieben. Die Optimierungsaufgabe besteht darin, aus einem Prozessmodell bei gegebener Taktzeit ein optimales Anlagenmodell zu erzeugen. Der Optimierungsansatz besteht darin, dass die Prozesse in Aufgaben von Robotern unterteilt werden und dabei für jeden Roboter die Umlaufzeit und für jede Vorrichtung die Vorrichtungszeit kleiner oder gleich der Taktzeit ist. Die Heuristik wird in diesem Beitrag unter der Vernachlässigung von Details vorgestellt.

Der Lösungsansatz folgt nachstehender Strategie: Zuerst werden die Prozesse auf Aufgaben von Robotern verteilt. Wird bei dieser Aufteilung die Taktzeit der Station überschritten, werden je nach Fall Einsammelstationen vorgeschaltet und/oder Prozesse Schritt für Schritt abgetrennt. Beim Abtrennen von Prozessen werden die so entstandenen Stationen jeweils für sich optimiert und gegebenenfalls erneut aufgeteilt. Die Nachbehandlung nimmt zum Schluss letzte Optimierungen durch das Verschieben von Aufgaben zwischen Robotern vor.

4.1 Roboter und Roboteraufgaben

Die Aufgaben der Roboter werden in den folgenden Schritten zugeordnet:

1. Erzeugen einer Abfolge von Aufgaben, die die lückenlose Zuführung der Bauteile zur Geostation erlauben.
2. Einbauen des stationären Fügens von Vorfügeprozessen in die bestehende Struktur für die Zuführung.
3. Registrieren der Zeit für das Entnehmen des fertig gefügten Bauteils durch den Ausgangshandhabungsroboter.
4. Zuweisen zunächst jedes Fügeprozesses zu einem Fügeroboter und Synchronisation der Prozesse, sodass alle Fügeprozesse nacheinander ausgeführt werden. Als Ergebnis sind folgende Fälle möglich:
   a. Die zulässige Vorrichtungszeit und die Maximalzahl von Fügerobotern werden eingehalten. => Nachbehandlung.
   b. Die zulässige Vorrichtungszeit wird überschritten, und es gibt freie Fügeroboter. => Es wird versucht, die vorhandenen freien Roboter parallel einzusetzen, um so die benötigte Vorrichtungszeit zu verkürzen.
   c. Die zulässige Vorrichtungszeit wird überschritten, und es gibt keine freien Roboter mehr.
5. Unter Beachtung der Umlaufzeit werden dem Ausgangshandhabungsroboter so viele Fügeprozesse wie möglich stationär zugeordnet. Wird mindestens ein Prozess stationär durchgeführt, wird anschließend Schritt 4 wiederholt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

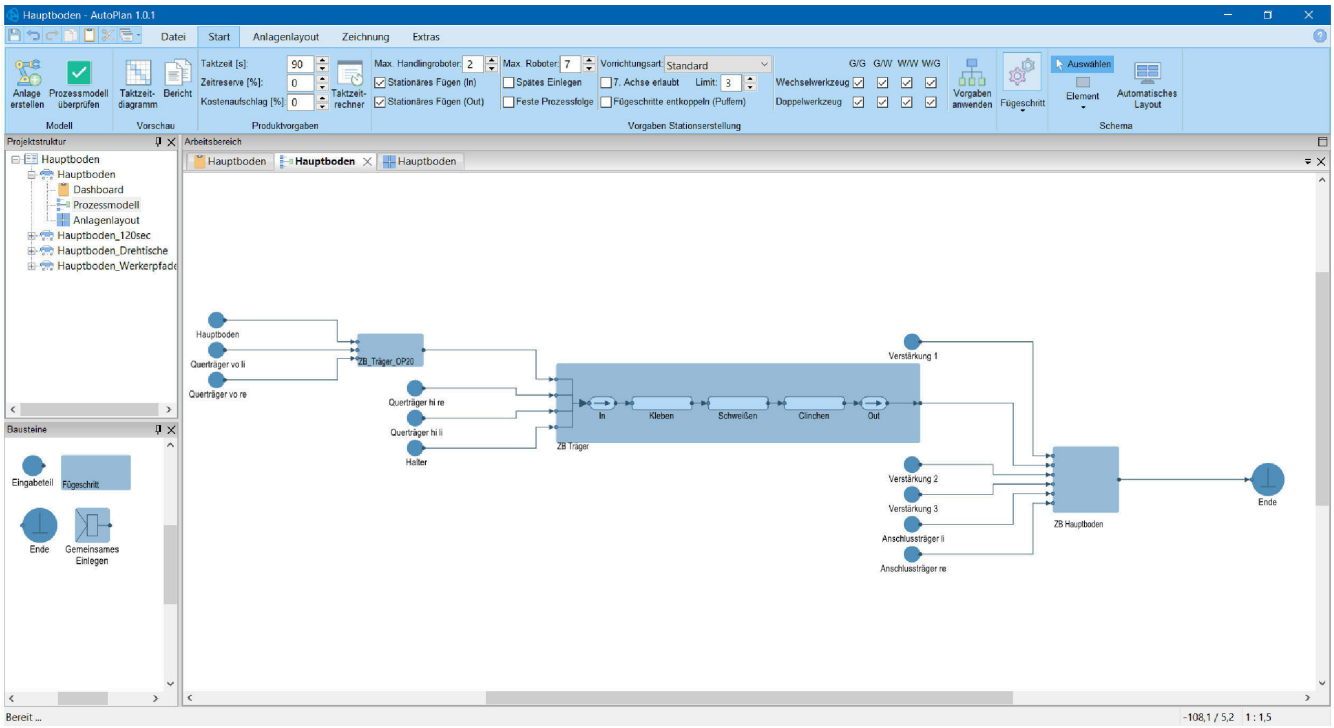

Bild 3. Modellierungssystem für Prozessmodelle in „AutoPlan". *Software-Screenshot: GFal e. V.*

6. Bewertung des Zwischenergebnisses:
   a. Die Umlaufzeit reicht nicht, um das reine Ausgangshandling durchzuführen. => Parallelisierung.
   a. Die Umlaufzeit eines Roboters reicht nicht, um das Eingangshandling vollständig durchzuführen, oder das Eingangshandling ist ungültig (zu viele benötigte Roboter). => Aufteilung in mehrere Stationen.
   b. Die Umlaufzeit mindestens eines Roboters reicht nicht für die Bearbeitung aller Aufgaben, oder die Gesamtzahl der Roboter überschreitet die Vorgabe. => Aufteilung in mehrere Stationen.
   c. Alle Randbedingungen werden eingehalten. => Nachbehandlung.

4.2 Parallelisierung

Ergibt sich aus einer Bewertung, dass eine Parallelisierung von Stationen erforderlich ist, wird das Optimierungsproblem mit der doppelten Taktzeit erneut berechnet. Die aus der Parallelisierung einer Station resultierende Verdoppelung der Produktion egalisiert die Verdoppelung der Taktzeit.

4.3 Aufteilung in mehrere Stationen

Im Fall 6b) in Abschnitt 4.1 werden vorgelagerte Einsammelstationen erzeugt und erneut berechnet.

Im Fall 6c) reicht die Zeit nicht für die Durchführung aller Fügeprozesse. Deshalb wird schrittweise versucht, Stationen abzuspalten, in die jeweils so viele Fügeprozesse wie möglich verschoben werden. Zuerst erfolgt die Berechnung ohne einen Ausfügeprozess. War die Berechnung erfolgreich, werden Schritt für Schritt Ausfügeprozesse hinzugefügt, bis eine Aufteilung in mehrere Stationen (Bewertung fehlgeschlagen) erforderlich wäre. Im nächsten Schritt wird versucht, möglichst viele Fügepunkte des Ausfügeprozesses, bei dem die Bewertung fehlgeschlagen ist, durch die Fügeroboter oder stationär durch den Ausgangshandhabungsroboter fügen zu lassen. Das Ergebnis (die entstandenen Stationen und ihre Roboter etc.) wird zwischengespeichert, und die Berechnung für die verbleibenden Fügepunkte des aktuellen Ausfügeprozesses und aller weiteren Ausfügeprozesse wird durchgeführt.

Wenn alle Ausfügeprozesse abgearbeitet sind, erfolgt die Nachbehandlung.

4.4 Nachbehandlung

Die Nachbehandlung richtet sich auf die Einsparung von Robotern durch die Nutzung bisheriger Wartezeiten im Arbeitsablauf der Roboter und die Verwendung von Mehrfachwerkzeugen. Sie erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Die Aufgaben aller Fügeroboter werden möglichst auf den Ausgangshandhabungsroboter und, wenn dies nicht möglich ist, auf einen der Eingangshandhabungsroboter übertragen.
2. Die Aktionen der verbleibenden Fügeroboter werden nach Möglichkeit schrittweise zusammengefasst.
3. Verbliebene Fügeroboter ohne Aufgaben werden entfernt.
4. Wenn es keine echten Fügeroboter mehr gibt, wird im letzten Schritt versucht, die Aufgaben des Ausgangshandhabungsroboters in die eines der Eingangshandhabungsroboter zu integrieren.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

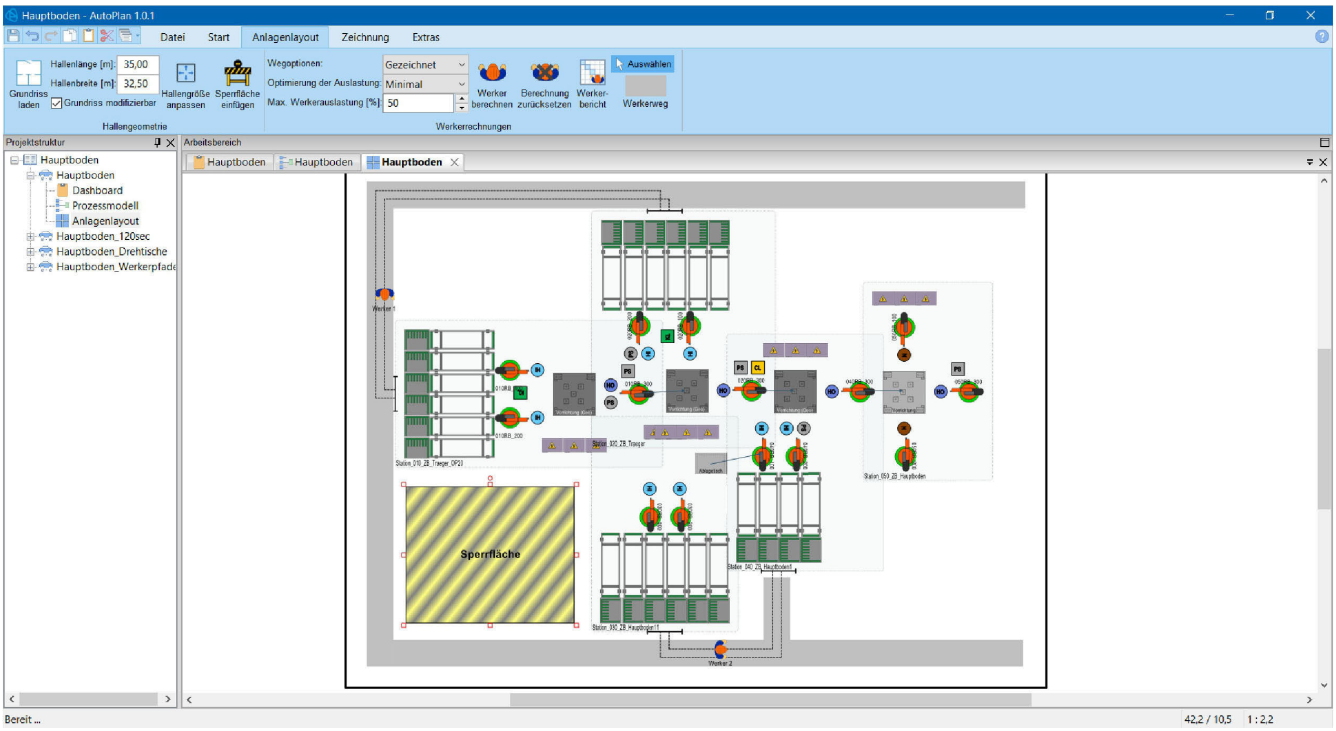

Bild 4. Erzeugtes Anlagenlayout für das Prozessmodell in Bild 3. *Software-Screenshot: GFal e. V.*

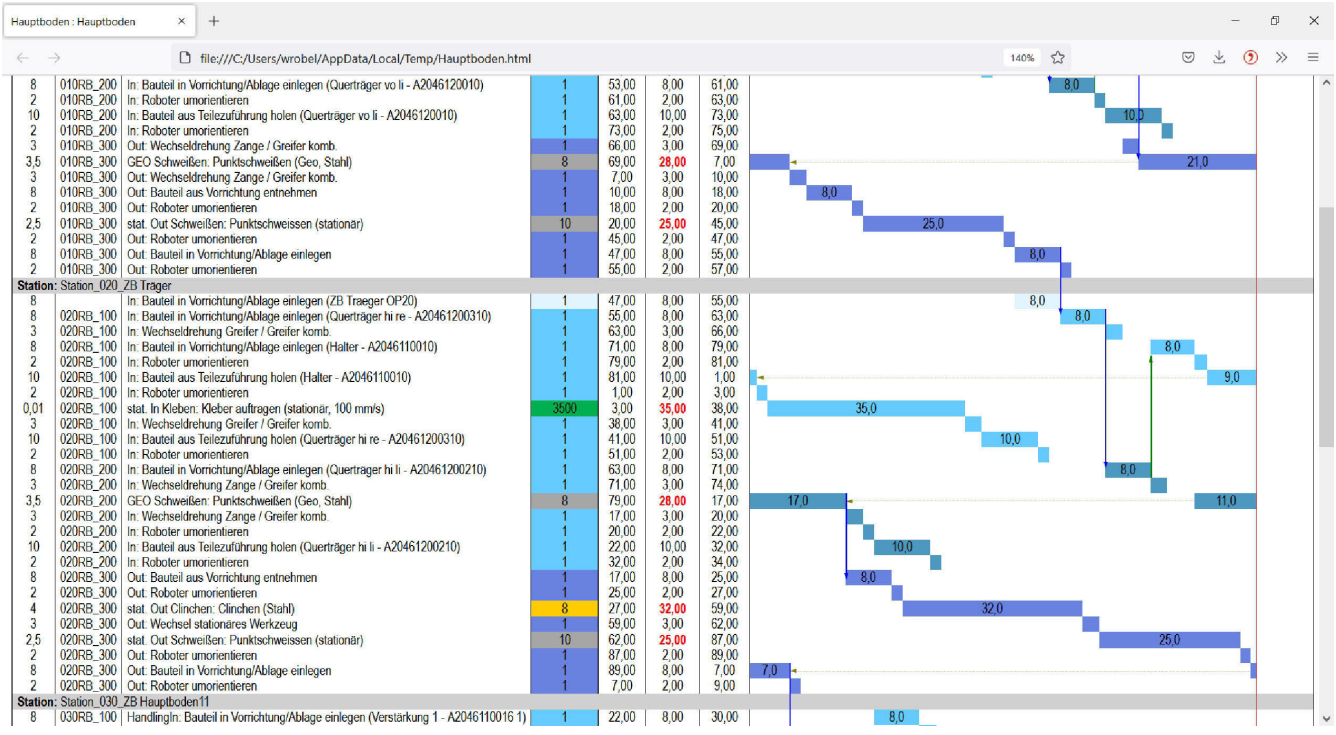

Bild 5. Ausschnitt des generierten Taktzeitdiagramms mit den Aufgaben der Roboter der Anlage in Bild 4. *Software-Screenshot: GFal e. V.*

5 Ergebnis und Validierung

Die Ergebnisse der Optimierung wurden innerhalb eines Forschungsprojekts in einen Softwareprototyp integriert [26]. In industriellen Praxisanwendungen wurde die Lösung erfolgreich evaluiert. **Bild 3** zeigt das Prozessmodell eines Hauptbodens in Anlehnung an Abbildung 7–2 in [24]. Das daraus generierte optimierte Anlagenmodell ist in **Bild 4** abgebildet, und einen Ausschnitt der Aufgaben der Roboter zeigt **Bild 5**.

Die Ergebnisse der vorgestellten Heuristik erreichen im Allgemeinen nicht das Optimum. Derzeit finden weiterführende Forschungsarbeiten statt. Die Optimierungsheuristik wird in einem

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

aktuell laufenden Forschungsprojekt in ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell überführt. Erste Resultate zeigen, dass sich die Ergebnisse der Heuristik dadurch um etwa 10 % verbessern lassen, allerdings erhöhen sich die Rechenzeiten bei diesem Ansatz von wenigen Sekunden mit der vorgestellten Heuristik auf mehrere Sekunden bis hin zu einigen Minuten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt Modelle und eine Heuristik für die Generierung optimierter Anlagenlayouts roboterbasierter Fließmontagesysteme unter Vernachlässigung einiger industrierelevanter Details vor. Die Modellierung der Fertigung eines Bauteils orientiert sich an Fügefolgen in Form eines Prozessmodells. Weitere Aspekte, wie die Verwendung von Drehtischen und Robotern auf einer siebten Achse, das manuelle Einlegen sowie der optimierte Werkereinsatz, sind in das Lösungsverfahren integriert.

In folgenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird ein Optimierungsverfahren mit mathematisch rigorosem Modell (weiter)entwickelt und bei Erfolg in das Lösungssystem integriert. Weitere Forschungsprojekte werden sich mit der optimalen Umplanung von Bestandsanlagen (Brownfield) befassen.

FÖRDERHINWEIS

Die Ergebnisse dieses Beitrages wurden im Rahmen der INNO-KOM Projekte 49MF180017 und 49MF210181 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

[1] Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Berlin: Springer 1997
[2] Baybars, I.: A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. Management Science 32 (1986) 8, S. 909–932
[3] Ghosh, S.; Gagnon, R. J.: A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. International Journal of Production Research 27 (1989) 4, pp. 637–670
[4] Dolgui, A.; Gafarov, E.: Some new ideas for assembly line balancing research. IFAC-PapersOnLine 50 (2017) 1, S. 2255–2259
[5] Boysen, N.; Schulze, P.; Scholl, A.: Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? European Journal of Operational Research 301 (2022) 3, S. 797–814
[6] Sivasankaran, P.; Shahabudeen, P.: Literature review of assembly line balancing problems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 73 (2014) 9–12, S. 1665–1694
[7] Eghtesadifard, M.; Khalifeh, M.; Khorram, M.: A systematic review of research themes and hot topics in assembly line balancing through the web of science within 1990–2017. Computers & Industrial Engineering 139 (2020), S. 106182
[8] Boysen, N.; Fliedner, M.; Klein, R. et al.: Assembly Line Balancing. Data sets & Research topics. Internet: https://assembly-line-balancing.de/. Zugriff am 29.04.2021
[9] M. Selim Akturk; Adnan Tula; Hakan Gultekin: Design of a fully automated robotic spot-welding line. ICINCO 2011 – Proceedings of the 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (2011), pp. 387–392
[10] Rubinovitz, J.; Buckchin, J.: Design and balancing of robotic assembly lines. Proceedings of the Fourth World Conference on Robotics Research, Pittsburgh, PA, 1991 (1991)
[11] Rubinovitz, J.; Bukchin, J.; Lenz, E.: RALB – A Heuristic Algorithm for Design and Balancing of Robotic Assembly Lines. CIRP Annals 42 (1993) 1, S. 497–500
[12] Janardhanan, M. N.; Huang, G. Q.; Ponnambalam, S. G.: An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic assembly line systems. Journal of Cleaner Production 90 (2015), S. 311–325
[13] Janardhanan, M. N.; Li, Z.; Bocewicz, G. et al.: Metaheuristic algorithms for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent robot setup times. Applied Mathematical Modelling 65 (2019), S. 256–270
[14] Michalos, G.; Makris, S.; Mourtzis, D.: An intelligent search algorithm-based method to derive assembly line design alternatives. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 25 (2012) 3, S. 211–229
[15] Michels, A. S.; Lopes, T. C.; Sikora, C. G. S. et al.: The Robotic Assembly Line Design (RALD) problem: Model and case studies with practical extensions. Computers & Industrial Engineering 120 (2018), S. 320–333
[16] Hagemann, S.: Algorithmische Konzeption von hochautomatisierten Fließmontagesystemen am Beispiel des automobilen Karosseriebaus. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2021
[17] Hagemann, S.; Stark, R.: An optimal algorithm for the robotic assembly system design problem: An industrial case study. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 31 (2020), S. 500–513
[18] Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: A classification of assembly line balancing problems. European Journal of Operational Research 183 (2007) 2, S. 674–693
[19] Nourmohammadi, A.; Fathi, M.; Ng, A. H.C.: Balancing and scheduling assembly lines with human-robot collaboration tasks. Computers & Operations Research 140 (2022), S. 105674
[20] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4499 Blatt 1. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2008
[21] DELMIA. Dassault Systèmes 2023
[22] Tecnomatix. Siemens AG 2023
[23] FASTDESIGN. fastplan GmbH 2023
[24] Burr, H.: Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau. Saarbrücken: LKT Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD Univ. des Saarlandes 2008
[25] Bohn, M.; Hetsch, K.: Funktionsorientiertes Toleranzdesign. Maßgeschneiderte Präzision im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau. München: Hanser 2017
[26] GFal e.V.: AutoPlan. GFal e.V. 2023

Gregor Wrobel
Ralf-Erik Ebert
Robert Scheffler
GFal Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V.
Volmerstr. 3, 12489 Berlin
Tel. +49 30 814 563 300
info@gfai.de
www.gfai.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-40 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -