

## Automatisierung in der Fabrik- und Fertigungsplanung

# Digitale und optimierte Produktionslinienplanung

M. Öfele, C. Hartmann, L. Willburger, K. Spindler, B. Häckel, S. Braunreuther

Bei der Fabrikplanung ist die Produktionslinienplanung von hoher Komplexität geprägt und mit herkömmlichen Methoden nicht zufriedenstellend lösbar. Das Problem lebt im hochdimensionalen Raum und muss dort gelöst werden. Dieser repräsentiert die Eigenschaften der Produkte, zugehörige Produktionsprozesse und betriebswirtschaftliche Aspekte. Es wird ein Konzept zur automatisierten Linienplanung inklusive der Montagereihenfolgeplanung, Werksauswahl, Liniengestaltung und Werkerzuordnung vorgestellt.

### STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Fertigungsplanung, Automatisierung

## 1 Einleitung

Heutige produzierende Unternehmen müssen sich schnell an sich verändernde Nachfragemengen und wechselnde Anforderungen von Kunden anpassen [1]. Die effiziente sowie schnelle Planung von Produktionslinien ist für sie folglich von zentraler Bedeutung [1, 2].

Die Auslegung von Produktionslinien ist jedoch von hoher Komplexität geprägt [3]: Es müssen Produkteigenschaften, Fähigkeiten von Produktionsprozessen und betriebswirtschaftliche Aspekte und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Dieser hochkomplexe Vorgang wird aktuell hauptsächlich manuell erledigt, wobei dessen Ergebnisqualität stark vom Erfahrungsschatz und dem Know-how der verantwortlichen Personen abhängt. Begleitend werden dazu singuläre, nicht vernetzte Simulationen und Optimierungen durchgeführt.

Eine Optimierung des mehrdimensionalen Gesamtsystems bietet daher großes Potenzial, das durch eine gekoppelte und zeitgleiche Betrachtung aller relevanten Randbedingungen und Ziele gehoben werden kann. Trotz dieses Potenzials fokussieren sich aktuelle Forschungsansätze auf die Optimierung der Teilprobleme. So existieren eine Vielzahl an Optimierungsansätzen für die Montagereihenfolgeplanung [4, 5], die Betriebsmittelplanung [6, 7] und die Layoutplanung [1, 8]. Eine kombinierte Betrachtung der Problemstellungen findet nur sehr begrenzt statt.

Um die ökonomischen Potenziale einer Gesamtoptimierung auszuschöpfen, wird im Förderprojekt „KI-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem zur intelligenten Produktionslinienplanung (intelliPro)“ ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) zur gesamtheitlichen Planung einer Produktionslinie ent-

## Automation in factory and production planning – Digital and optimized production line planning

In factory planning, production line planning is characterized by a high complexity and cannot be solved satisfactorily with conventional methods. The problem lives in a high-dimensional space and must be solved there. This space represents the characteristics of the products, associated production processes and business aspects. A concept for automated line planning including assembly sequence planning, plant selection, line layout and worker assignment is presented.

wickelt, welches die Themen der Werksauswahl, der Montagereihenfolgeplanung und des Linienlayouts inklusive der Betrachtung der Werker beinhaltet. Das Konzept wird dabei am Beispiel einer Produktion für Pkw-Abgasanlagen beschrieben.

## 2 Konzept eines Entscheidungsunterstützungssystems zur automatisierten Produktionslinienplanung

Ziel des EUS ist die gesamtheitliche Optimierung und Auslegung einer für ein gegebenes Produkt dedizierten Produktionslinie. Dabei sollen Linienlayoutalternativen erzeugt werden, die jeweils unterschiedliche Trade-Offs des multikriteriellen Planungsproblems darstellen. Als Ausgangsinformationen stehen hierfür das CAD-Modell des Produkts, das jährliche Produktionsvolumen sowie der Standort des Kunden zur Verfügung. Das EUS soll dabei so gestaltet werden, dass mit entsprechenden Anpassungen die Übertragbarkeit vom konkreten Anwendungsfall auf andere Produkte möglich ist.

Das entwickelte Konzept teilt das Problem, basierend auf einer Analyse der Interaktionen zwischen den Teilproblemen, in Module auf, ohne dabei die Möglichkeit einer ganzheitlichen Problembetrachtung zu verlieren (**Bild 1**). Auf Basis der Ausgangsinformationen findet zunächst im Modul Werksauswahl eine Selektion von potenziellen Standorten für die Linie statt. Parallel erfolgt die Identifikation und Bewertung möglicher Montagereihenfolgen des Produkts in der Montagereihenfolgeplanung. Anschließend wird im Modul Linienuptimierung eine integrierte Optimierung der vier Teilprobleme Montagereihenfolgeauswahl, Maschinenauswahl, Linienlayout und Werkerzuordnung durch-

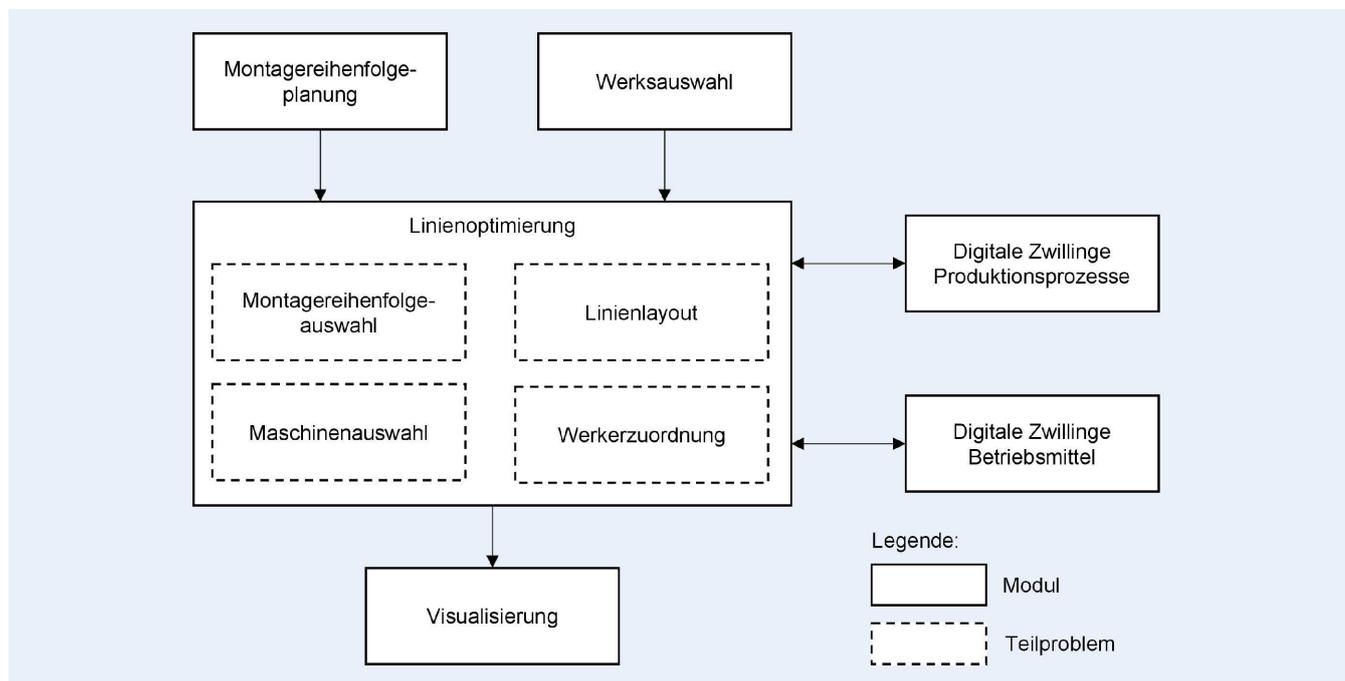


Bild 1. Modularer Aufbau des Entscheidungsunterstützungssystems. Grafik: M. Öfele

geführt. Hierbei ist eine Interaktion der Linienoptimierung mit den digitalen Zwillingen der Produktionsprozesse und der Betriebsmittel zur Einhaltung der technischen Randbedingungen vorgesehen. Die Informationen der generierten Lösungsalternativen werden abschließend im Visualisierungsmodul verständlich aufbereitet, um eine möglichst fundierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte im Detail erläutert.

## 2.1 Werksauswahl

Ein wesentlicher erster Schritt der Linienplanung besteht in der Identifikation einer Kandidatenmenge von sinnvollen Produktionswerken aus der Menge an bereits existierenden Werkstandorten des Unternehmens. Dieser Schritt erfolgt durch eine automatische und optimierte Vorauswahl der in Frage kommenden Standorte hinsichtlich Logistikanforderungen in der gesamten Lieferkette, der jeweiligen technologischen Fähigkeiten und Ausrichtungen und der Verfügbarkeit ausreichender Produktionsfläche. Die finale Festlegung der Kandidaten wird vom Nutzen manuell vorgenommen. Damit kann dem Bedürfnis nach der Berücksichtigung strategischer Überlegungen und spezieller Kundenanforderungen Rechnung getragen werden.

## 2.2 Montagereihenfolgeplanung

Die Montagereihenfolgeplanung, die neben der Werksauswahl Startpunkt der Linienauslegung ist, stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar, da der Lösungsraum mit der Anzahl der Komponenten annähernd exponentiell wächst. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein graphentheoretischer Ansatz umgesetzt. Graphentheoretische Ansätze zeichnen sich dadurch aus, dass sie es ermöglichen, den vollständigen Lösungsraum geeignet abzubilden und handhabbar zu machen, ohne durch vereinfachende Annahmen Lösungen a priori zu verwerfen. Ausgehend vom CAD-Modell wird ein

Graph zur Beschreibung der Baugruppe abgeleitet, welcher Bauteile durch Knoten und Verbindungen durch Kanten modelliert. Dieser erste Schritt kann beispielsweise unter Nutzung von Konstruktionsrichtlinien sowie der Stückliste an Bauteilen in der Baugruppe automatisiert werden. Darüber hinaus können Attribute an die Knoten oder Kanten angeheftet werden, wie beispielsweise das Bauteilgewicht oder die eingesetzte Fügetechnologie, die entweder als Eingabe oder automatisiert aus einer Datenbank abgefragt werden können. Der Graph der Baugruppe bildet die Grundlage für die vollständig automatisierte Generierung von Montagereihenfolgen. Hierbei wird invers vorgegangen, das heißt es werden ausgehend von der vollständig gefügten Baugruppe die Menge an Subgraphen abgeleitet, die jeweils eine Komponente weniger enthalten. Dieses Vorgehen wird für alle Subgraphen fortgesetzt, bis schließlich alle Komponenten einzeln vorliegen. Das Ergebnis dieser Analyse kann wiederum als Graph (gerichteter azyklischer Graph) repräsentiert werden, der invertiert alle zulässigen Montagereihenfolgen enthält, wobei in der Routine zur Berechnung der Subgraphen bereits Redundanzen ausgeschlossen und beispielsweise Kollisionen aussortiert werden (**Bild 2**). Der Anfangsknoten dieses Montagereihenfolgegraphen repräsentiert den Zustand, in welchem alle Bauteile einzeln vorliegen. Jeder Pfad vom Anfangsknoten zum Endknoten gibt somit eine zulässige Montagereihenfolge an.

Um nun die Güte der ermittelten zulässigen Montagereihenfolge bewerten zu können, müssen weitere Informationen herangezogen werden. Diese Informationen liegen im Montagereihenfolgegraphen durch Übertragung der Knoten- und Kantenattribute aus dem Graph der Baugruppe vor. Die in den Knoten- und Kantenattributen abgelegten zusätzlichen Kenngrößen können dann in der Linienoptimierung dazu dienen, die Auswahl der Montagereihenfolge hinsichtlich dieser Attribute zu steuern. Ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit werden aktuell folgende Größen berücksichtigt: Häufigkeit des Technologiewechsels, Möglichkeit für Toleranzausgleich, Stabilität für Handling.

### 2.3 Digitale Zwillinge der Produktionsprozesse und Betriebsmittel

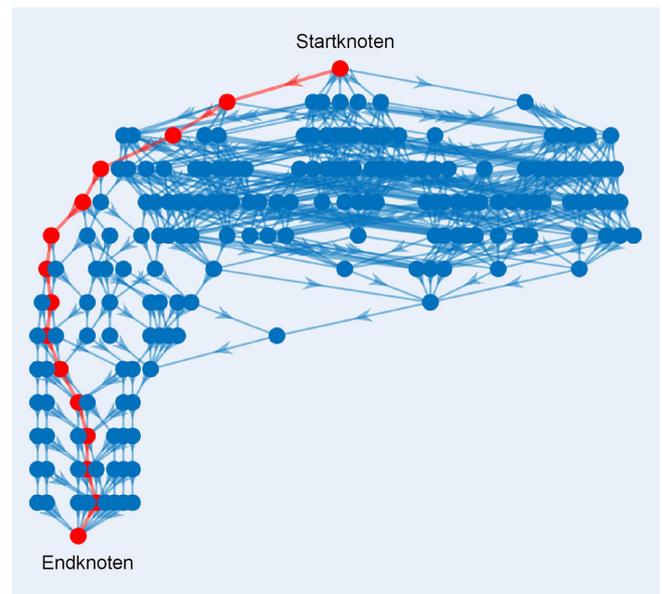
Ein wichtiges Element sämtlicher Optimierungsvorgänge ist die Bewertung und Sicherstellung der technologischen Machbarkeit der Fertigungsszenarien. Dies erfolgt durch mehrere digitale Zwillinge, die mittels digitaler (Daten-)Modelle die realen Fähigkeiten und Einschränkungen der Prozesse und Betriebsmittel widerspiegeln. Für die Abgasanlagenmontage sind vor allem Schweißvorgänge relevant. Die digitalen Schweißzwinge bilden die Eigenschaften und Begrenzungen der Schweißprozesse ab. Dazu zählen Winkellagen der Bauteile, zugehörige Brennerstellungen, Materialdickenpaarungen der beteiligten Bauteile, Schweißgeschwindigkeiten sowie notwendige Schweißspannungen und -ströme. Letztere Parameter ermöglichen eine Abschätzung der zugehörigen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der ins Bauteil eingebrachten thermischen Energie – ein bedeutender Parameter zur Abschätzung des möglichen Schweißverzugs. Um dieses Phänomen in der Produktionsplanung besser berücksichtigen zu können, wurde ein Reduced Order Model (ROM) auf Basis hunderter FEM-Berechnungen und maschinellen Lernens entwickelt. Die damit erreichte massive Reduktion der Parameterdimension und die hohe Ausführungsgeschwindigkeit sind für die Verwendung in iterativen Optimierungsläufen zwingend notwendig.

Weitere digitale Zwillinge repräsentieren die Fertigungsmaschinen, Vorrichtungen und Werkzeuge. Neben den technologischen Fähigkeiten und Randbedingungen sowie Vorgaben zur Positionierung der Bauteile und zur Ergonomie werden auch die wirtschaftlichen Kennzahlen, zum Beispiel Investitions- und Betriebskosten, abgebildet. Diese werden benötigt, um eine Maschinenauswahl und Kostenbewertung innerhalb der Linienoptimierung zu ermöglichen.

### 2.4 Linienoptimierung

Im Anschluss an die Werksauswahl und Montagereihenfolgeplanung findet die Linienauslegung statt. Die hierzu durchzuführende Optimierung enthält die Auswahl einer Montagereihenfolge, die Aufteilung dieser auf Maschinen, die Anordnung der Maschinen zu einer Linie und die Zuordnung von Werkern zum Be- und Entladen der Maschinen. Die Standortauswahl wird aus dem Optimierungsproblem ausgelagert und durch eine separate Linienoptimierung für jedes der in der Vorauswahl identifizierten Werke abgebildet. Zu berücksichtigende Randbedingungen sind die zu unterschreitende maximale Zykluszeit der Linie, die sich aus der Stückzahlanforderung ergibt, sowie die im jeweiligen Werk zur Verfügung stehende Fläche. Weiterhin muss die Kompatibilität der Maschinen und der ihnen zugeordneten Montageschritte gewährleistet werden.

Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen den genannten Teilaspekten wurde im Rahmen von intelliPro ein Optimierungsansatz entwickelt, um diese integriert zu lösen. Im Mittelpunkt dieses Ansatzes steht ein genetischer Algorithmus (GA). Die populationsbasierte Optimierung bietet den Vorteil, dass eine vorherige Priorisierung der Zielgrößen durch den Einsatz von Pareto-Fronten nicht nötig ist. Zudem werden innerhalb eines Optimierungsdurchlaufs mehrere Linienalternativen generiert. Auch die Anbindung anderer Module an die Optimierung ist mit einem GA einfach realisierbar.



**Bild 2.** Montagegraph einer Baugruppe mit 15 Komponenten. Jeder Pfad durch den Graphen repräsentiert eine Montagereihenfolge. In roter Farbe ist eine exemplarische Montagereihenfolge hervorgehoben.

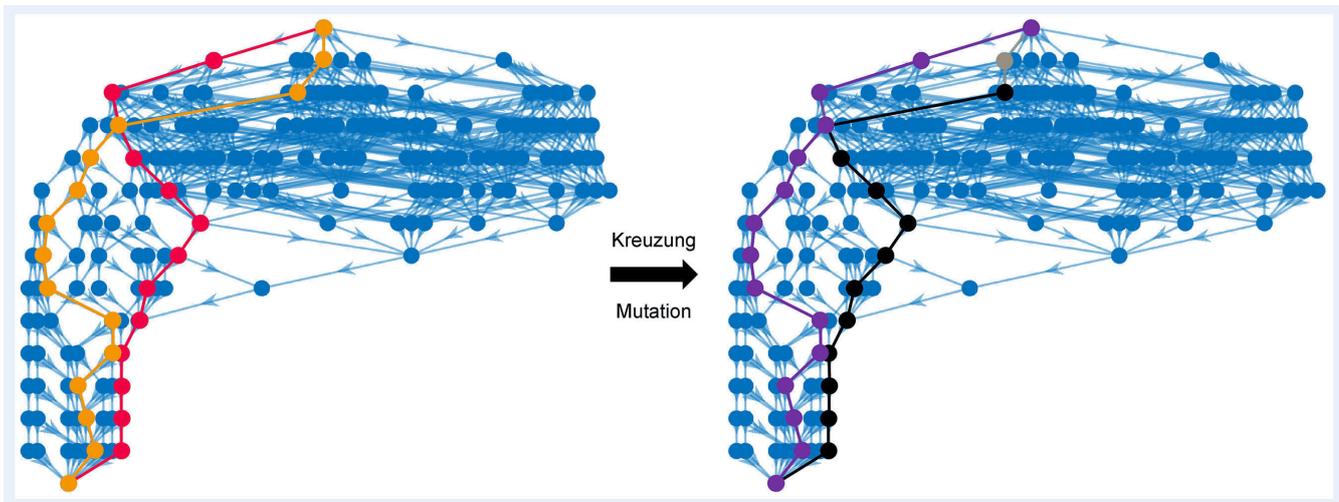
Grafik: C. Hartmann

Die Lösungen des GA enthalten alle notwendigen Informationen der vier Teilaspekte. Für die Startpopulation werden sie mittels Heuristiken erzeugt. Eine exakte Prüfung der Randbedingung findet erst im anschließenden Evaluationsschritt durch die verschiedenen digitalen Zwillinge statt. Hierbei werden zusätzlich auch der Flächenverbrauch, die Zykluszeit und die Zielgrößen – Investitionskosten, Stückkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen – berechnet. Im nächsten Schritt erfolgt die Selektion guter Lösungen aus der Population und deren Rekombination mittels Kreuzung. An den so generierten neuen Lösungen werden abschließend kleine zufällige Änderungen im Zuge der Mutation vorgenommen, um zusätzliche Diversität in der Population zu erzeugen. Dieser Prozess wird für viele Iterationen durchgeführt. Durch die wiederholte Auswahl der besten Lösung konvergiert der GA zu optimalen Linienlayouts.

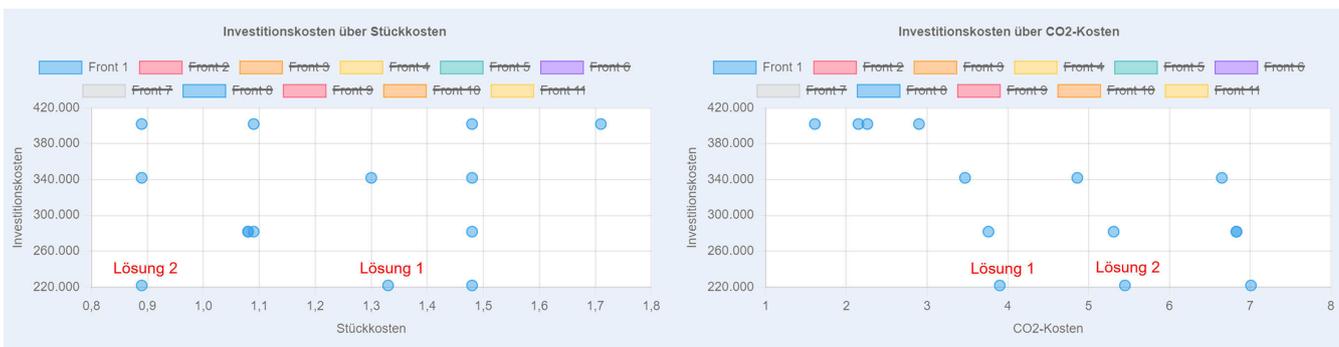
Die Ausgestaltung der Kreuzungs- und Mutationsoperationen ist dabei ausschlaggebend für die Schnelligkeit der Konvergenz des GA. **Bild 3** zeigt die Umsetzung der Kreuzung und Mutation für die Montagereihenfolge. Nach der Auswahl zweier Reihenfolgen werden diese auf gemeinsame Knoten untersucht. Ein gemeinsamer Knoten bedeutet, dass in beiden Reihenfolgen das Produkt im gleichen Montagezustand vorliegt. Somit können die nachfolgenden Teile der Pfade bis zum nächsten gemeinsamen Knoten zwischen den beiden Reihenfolgen ausgetauscht werden, ohne dadurch invalide Montagereihenfolgen zu erzeugen. Die Mutation erfolgt durch den Austausch der Reihenfolge von zwei oder mehreren aufeinanderfolgenden Montageschritten innerhalb einer Montagereihenfolge.

Die anderen Teilaspekte einer Lösung erfordern ebenfalls eine Entwicklung von angepassten Kreuzungs- und Mutationsoperationen. Dabei ist auch zu untersuchen bei welchen Aspekten nur eine gemeinsame Rekombination sinnvoll ist.

Aufgrund der Aufteilung des Problems auf separate Optimierungsläufe ist abschließend die Vereinigung der Lösungsmengen der einzelnen Läufe und eine erneute Optimalitätsprüfung der



**Bild 3.** Kreuzung zweier Montagereihenfolgen (orange und rot) durch den Austausch von Teilsequenzen erzeugt zwei neue Montagereihenfolgen (lila und schwarz). In brauner Farbe ist eine zusätzliche Mutation hervorgehoben. *Grafik: M. Öfele, C. Hartmann*



**Bild 4.** Spannungsfelder der Zielgrößen beispielhaft in der Visualisierung demonstriert (Datenwerte verfremdet). *Grafik: L. Willburger*

Lösungen innerhalb dieser Gesamtmenge nötig, um die Lösungsmenge des Gesamtproblem zu bestimmen.

### 2.5 Visualisierung

Die verständliche Ergebnisdarstellung stellt einen maßgeblichen Faktor für die Akzeptanz eines EUS durch die Stakeholder und Endnutzer dar [9]. Im Rahmen von intelliPro ist dies eine besonders anspruchsvolle Aufgabe, da die Lösungen sich im mehrdimensionalen Raum befinden und das verwendete Konzept der Pareto-Front vielen Nutzern nicht bekannt ist. Um die Darstellung zu vereinfachen, werden jeweils in einer zweidimensionalen Grafik zwei Zielgrößen gegenübergestellt und zunächst nur die Lösungen aus der ersten Front dargestellt. Bei Bedarf können jedoch auch die nachfolgenden Fronten hinzugenommen werden.

So kann beispielhaft ein Vergleich zweier Lösungen durchgeführt werden, der das Spannungsverhältnis zwischen den Zielgrößen illustriert: Ausgehend von Grafik 1 in Bild 4 wird der Zusammenhang zwischen den Investitionskosten und den Stückkosten betrachtet. Lösung 2 hat hierbei geringere Stückkosten bei gleichem Anschaffungspreis. Sucht man die gleichen Lösungen nun in Grafik 2 (Bild 4) im Zusammenhang zwischen den Investitionskosten und den CO<sub>2</sub>-Emissionen, zeigen sich für Lösung 2 höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als für Lösung 1.

Zusätzlich bestehen auf Seite der Implementierung der Benutzungsoberfläche mehrere Maßnahmen, um diese Vergleichbarkeit

und Erklärbarkeit für die Nutzer noch niederschwelliger zu erreichen. So ist es möglich zwei Lösungen durch die Einblendung zusätzlicher Informationen detaillierter zu vergleichen. Ferner kann der Lösungsraum im Vorfeld durch festlegbare Grenzwerte manuell eingeschränkt werden.

Insgesamt bietet diese visuelle Komponente als Teil des EUS für intelliPro für mehrere Gruppen entscheidende Vorteile: Auf einer Management-Ebene lassen sich leicht mögliche Lösungsräume abbilden und gegenüber Alternativen, seien sie sinnvoll oder nicht, verständlich abgrenzen. Direkte Endanwender wie Produktionsplaner können darüber hinaus die Lösungen genauer explorieren und durch ihre Erwartungen und ihre Expertise Einschränkungen am Lösungsraum vornehmen.

### 3 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Konzept zur automatisierten Produktionslinienplanung erlaubt durch seinen modularen Aufbau eine Aufteilung des hochkomplexen Planungsproblems in weniger komplexe Teilprobleme. Dies erleichtert die Entwicklung von Lösungsmethoden und führt gleichzeitig zu einer hohen Flexibilität des Konzepts, da einzelne Module angepasst oder ausgetauscht werden können. Neben dem Potential für wirtschaftlichere Produktionslinien bietet es eine gleichbleibende Ergebnisqualität unabhängig vom Know-how der an der Planung beteiligten Personen. Zudem können der Zeitaufwand und die Kosten der Planungsphase

enorm reduziert werden. Dem gegenüber steht der hohe initiale Aufwand die zu berücksichtigenden Prozesse digital zu repräsentieren und eine geeignete Aufteilung in Module zu finden.

Im weiteren Verlauf des Projekts intelliPro wird das aufgezeigte Konzept weiter vorangetrieben. Dies umfasst die Ausarbeitung und Testung der Operationen des GA sowie der Integrationsmöglichkeiten der Kanteninformationen des Montagereihenfolgegraphen in die Linienuptimierung. Des Weiteren sind die digitalen Zwillinge für die Produktionsprozesse und -ressourcen und das Visualisierungsmodul fertigzustellen. Final soll eine Validierung des EUS durch den Vergleich der automatisch generierten Produktionslinien mit manuell geplanten Linien stattfinden.

## FÖRDERHINWEIS

Das Projekt „KI-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem zur intelligenten Produktionslinienplanung (intelliPro)“ mit der Förderprojektkennung DIK-2105-0071// DIK0280/02 wird gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Verbundförderprogramms (BayVFP) – Förderlinie Digitalisierung – Förderbereich Informations- und Kommunikationstechnik.

## Literatur

- [1] Kikolski, M.; Ko, C.-H.: Facility layout design – review of current research directions. *Engineering Management in Production and Services* 10 (2018) 3, S. 70–79
- [2] Milde, M.; Reinhart, G.: Automated Model Development and Parametrization of Material Flow Simulations. 2019 Winter Simulation Conference (WSC), National Harbor, MD, USA, 2019, S. 2166–2177
- [3] Zhang, Z.; Wang, X.; Wang, X. et al.: A simulation-based approach for plant layout design and production planning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 10 (2019) 3, S. 1217–1230
- [4] Deepak, B.; Bala Murali, G.; Bahubalendruni, M. R. et al.: Assembly sequence planning using soft computing methods: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 233 (2019) 3, S. 653–683
- [5] Ong, S. K.; Chang, M. M. L.; Nee, A. Y. C.: Product disassembly sequence planning: state-of-the-art, challenges, opportunities and future
- [6] Xie, J.; Gao, L.; Peng, K. et al.: Review on flexible job shop scheduling. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing* 1 (2019) 3, S. 67–77
- [7] Serrano-Ruiz, J. C.; Mula, J.; Poler, R.: Smart manufacturing scheduling: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems* 61 (2021), S. 265–287
- [8] Pérez-Gosende, P.; Mula, J.; Díaz-Madroñero, M.: Facility layout planning. An extended literature review. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 12, S. 3777–3816
- [9] Li, T.; Feng, S.; Xia Li, L.: Information visualization for intelligent decision support systems. *Knowledge-Based Systems* 14 (2001) 5–6, S. 259–262



**Marcel Öfele**, M. Sc.   
Foto: Autor

Prof. Dr. **Björn Häckel**

Prof. Dr.-Ing. **Stefan Braunreuther** 

Technische Hochschule Augsburg  
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg  
Tel. +49 821 5586-2944  
marcel.oefele@hs-augsburg.de  
www.hs-augsburg.de

Dr.-Ing. **Christoph Hartmann** 

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen  
Walther-Meißner-Str. 4, 85748 Garching b. München  
Tel. +49 89 289-13769  
christoph.hartmann@utg.de  
www.mec.ed.tum.de/utg

**Lukas Willburger**, M. Sc. 

Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT  
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg  
lukas.willburger@fit.fraunhofer.de  
www.wi.fit.fraunhofer.de

**Klaus Spindler**

Forvia Clean Mobility  
Faurecia Emissions Control Technologies,  
Germany GmbH  
Biberbachstr. 9, 86154 Augsburg  
Tel. +49 160 90604123  
klaus.spindler@forvia.com  
www.forvia.com

## LIZENZ



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