

*Simulation in Produktion und Logistik 2023*  
*Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)*  
*Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023*  
*DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476*

# **Grundlayouts für modulare Montagesysteme – ein simulationsbasierter Vergleich**

## ***Basic Layouts for Modular Assembly Systems – a Simulation-based Comparison***

Sören Bergmann, Steven Ehrle, TU Ilmenau, Ilmenau (Germany),  
soeren.bergmann@tu-ilmenau.de, steven.ehrle@tu-ilmenau.de

**Abstract:** The article discusses the challenges posed by increased individualization of products, shorter product life cycles, and external factors on the flexibility of modern production systems. In particular, flexible workshop-oriented manufacturing principles are being implemented to replace or supplement traditional assembly lines, with various terms such as "modular assembly" and "matrix production" etc. used to describe similar concepts. The article presents these concepts under the umbrella term of modular production or assembly systems, which utilize adaptable workstations and autonomous vehicles to transport production orders between stations. The design of such systems is crucial to their performance, with considerations such as task allocation, material supply, and fleet sizing requiring complex interplay. The article compares traditional matrix layouts with alternative options, such as single-lane pathways and non-matrix layouts like honeycomb or star shapes, using simulation-based analysis to evaluate their potential impact on system performance.

## **1 Einleitung**

Neue Herausforderungen, basierend auf verstärkter Individualisierung von Produkten, kürzeren Produktlebenszyklen, externen Einflüssen etc. (Koren, 2010) führen zu erhöhten Anforderungen bezüglich der Flexibilität moderner Produktionssysteme. Insbesondere die Endmontage muss flexibel auf sich ändernde Bedingungen und Anforderungen reagieren können, ohne dabei die Wirtschaftlichkeit der Montage der Produkte bzw. der diversen Produktvarianten zu vernachlässigen (Feldkamp et al., 2019; Spath, D. 2013; El Maraghy et al., 2013).

Hierbei kommt die klassische Linienfertigung mitunter an ihre Grenzen und wird durch flexiblere, eher werkstatorientierte Fertigungsprinzipien abgelöst oder ergänzt. Einige Piloten sind insbesondere in der Automobilindustrie zu verzeichnen (Göppert et al., 2018), wobei verschiedene Akteure ähnliche Konzepte, in mitunter nur im Detail abweichenden Spielarten, unterschiedlich bezeichnen. So sind in der Literatur Begriffe wie „modulare Montage“ (Audi AG, 2019), „Flexi-Line“ (Mayer, 2018) oder

„Full-Flex-Werk“ (Daimler AG, 2018) bzw. auch „Matrix Production“ (Greschke et al., 2014) zu finden. Das gemeinsame Ziel all dieser Ansätze ist es, mehrere Produkttypen bzw. deren Varianten im selben Produktionssystem effizient zu fertigen und bei Einführung neuer Produkte bestenfalls keinen langwierigen Um- oder Neubau erforderlich zu machen. Bestenfalls können neue Produkte sogar ohne Unterbrechung des laufenden Betriebs eingeführt werden (Feldkamp et al., 2022). Im Rahmen dieses Beitrags werden diese Konzepte unter dem Sammelbegriff modulare Produktions- bzw. Montagesysteme subsumiert.

Solche modularen Produktions- bzw. Montagesysteme setzen sich aus anpassungsfähigen Arbeitsstationen (Fertigungsinseln) mit ihren spezifischen Werkzeugen und geschultem Personal zusammen, an denen ein oder meist mehrere unterschiedliche Produktions- bzw. Montagetätigkeiten durchgeführt werden können. Die Produktionsaufträge, in der Automobilendmontage die Karossen, werden dabei mittels fahrerloser Transportsysteme (FTS) transportiert. Hierbei wird das konkrete Routing durch das System der Fertigungsinseln ad hoc, unter Berücksichtigung der vorhandenen technischen Restriktionen und der individuellen Aufgabenpakete der zu fertigenden Produkte bzw. Produktvarianten sowie dem aktuellen Status des Gesamtsystems bestimmt (Feldkamp et al., 2019; Hüttemann et al., 2016).

Neben der offensichtlichen großen Herausforderung der Steuerung solcher Systeme ist das Systemdesign entscheidend für die Performance des gesamten Produktionssystems. Beim Design eines modularen Produktionssystems sind verschiedene, in sich bereits komplexe Gestaltungsdimensionen in ihren Wechselwirkungen zu betrachten. So ist u.a. die Zuteilung der Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln, d.h. welche Produktionsschritte sind auf welchen Fertigungsinseln möglich, ein entscheidender Punkt (Bergmann, 2022). Weiterhin muss die Materialversorgung der Fertigungsinseln und die Dimensionierung der Flotte von fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) betrachtet werden.

In den allermeisten Fällen werden die Fertigungsinseln bisher in einer Schachbrett-/Matrixanordnung mit oft vollständigen zweispurigen Wegesystemen im Hallenlayout positioniert (Greschke et al., 2014). Im Rahmen dieses Beitrags soll mit Hilfe eines simulationsbasierten Vergleichs untersucht werden, ob es hier generell Verbesserungspotential gibt bzw. ob weitere gleichwertige oder sogar bessere Alternativen denkbar sind. Hierbei sollen zum einen abweichende Wegetopologien für Matrixlayouts, z.B. einspurige Wege oder unvollständige Wegenetze untersucht werden. Zum anderen werden abweichende Grundlayouts, z. B. eine Anordnung der Fertigungsinseln in Form von Bienenwaben oder in einem Sternlayout, geprüft. Zu untersuchen ist hierbei insbesondere die erreichbare Systemperformance (Ausbringungsmengen, Auslastungen etc.) aber auch die Auslastung der Wege, das Stauverhalten der FTF oder der Platzbedarf des Wegenetzes etc.

Der Aufbau des Beitrags gliedert sich wie folgt: Die Einleitung führt in das Thema des Beitrags ein und verdeutlicht die Motivation. Anschließend wird kurz der Stand der Forschung sowie die notwendigen theoretischen Grundlagen zum Themenkomplex modularer Produktionssysteme, insbesondere dem Layout dieser, dargestellt. Aufbauend wird im Hauptteil des Beitrags zunächst ein grundlegendes Vergleichsszenario einer realitätsnahen modularen Produktion sowie verschiedene Layoutvarianten vorgestellt. Dabei wird, wenn nötig, auf Annahmen und

Restriktionen eingegangen. Im Weiteren werden die Ergebnisse erster Simulationsexperimente an den einzelnen Layoutvarianten kurz vorgestellt. Ebenso erfolgten eine kritische Betrachtung sowie der Versuch einer ersten Verallgemeinerung der Erkenntnisse. Der Beitrag wird abgeschlossen mit einem Fazit sowie einem Ausblick auf weitere interessante Forschungsmöglichkeiten im Kontext der modularen Produktion.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In modularen Montagesystemen, die im Rahmen dieses Beitrags weitestgehend synonym für eine Reihe ähnlicher Begriffe verwendet werden, wird das bisher oft in der Endmontage vorherrschende Prinzip der Fließfertigung durch eine eher werkstatorientierte Montage abgelöst. Solche Systeme können dabei oft auch als cyber-physische Systeme aufgefasst werden, wobei die Nutzung von Daten z. B. Sensordaten und automatisierten Transportsystemen eine gewisse dezentrale autonome Steuerung erst ermöglicht, die jederzeit auf die individuelle Situation des Montagesystems reagieren kann (Kern und Bauernhansl, 2020; Burggräf et al., 2020).

Charakteristisch für solche Systeme sind insbesondere:

- entkoppelte Arbeitsstationen (Fertigungsinseln) mit individuellen Taktzeiten,
- mehrere Tätigkeiten / Fähigkeiten je Fertigungsinsel,
- Redundanzen von Fähigkeiten auf verschiedenen Fertigungsinseln und
- flexible Materialflüsse mittels FTS (Fahrerlose Transportsysteme).

Beim Design von modularen Montagesystemen sind verschiedene Gestaltungsdimensionen zu berücksichtigen, welche oft miteinander in Wechselwirkung stehen. Hierzu gehören:

- die Zuordnung von Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln (Bergmann, 2022),
- die Gestaltung der Steuerung der Fertigungsaufträge inkl. der FTS (Feldkamp et al., 2022),
- die Planung der Materialversorgung (Fries et al., 2020) sowie
- die Verteilung und Anordnung der Fertigungsinseln (Layout).

In diesem Beitrag liegt der Fokus auf dem Einfluss des Layouts auf die Performance modularer Montagesysteme, gleichwohl es erhebliche Wechselwirkungen mit anderen Gestaltungsdimensionen gibt, z.B. bei der Zuordnung von Tätigkeiten/Fähigkeiten zu Fertigungsinseln.

Unter Layout wird im Folgendem das Ergebnis der Layoutplanung verstanden, also die (oft grafische) räumliche Anordnung der fertigungsrelevanten Struktur- und Funktionselementen (Schenk et al., 2014). Eine Teilaufgabe besteht in der Planung der Transportrouten und Materialflüsse, die die Systemperformance wesentlich beeinflusst (Schenk et al., 2014). Da in modularen Montagesystemen insbesondere ortsflexible Transportsysteme wie FTS zum Einsatz kommen, sind das Wegenetz und auch Puffer, sowohl an Fertigungsinseln als auch im Lager etc., besonders relevant.

Aktuell sind in dem zumeist rechteckigen Hallen matrix- bzw. schachbrettartige Anordnungen üblich, bei denen meist vollständige zweispurige in beide Richtungen befahrbare Wegenetze vorherrschen (Feldkamp et al., 2022; Schönemann et al., 2015).

Zur Bewertung der Performance von modularen Montagesystemen kann auf das breite Portfolio der Kennziffern aus dem Kontext der Fabrikplanung (Schenk et al., 2014) zurückgegriffen werden. Im Folgenden werden statische Kennziffern, wie u.a. der benötigte Flächenbedarf, die Gesamtlänge des Wegenetzes und der Anteil der Wege an der Gesamtfläche berechnet sowie mittels Simulationsexperimenten Kennziffern wie der Durchsatz, die durchschnittliche Durchlaufzeit je Produkttyp, die durchschnittliche Fahrtstrecke/Fahrtzeit je Produkt und die Auslastungen der Wege ermittelt.

### 3 Simulationsbasierter Vergleich von Grundlayouts anhand einer Fallstudie

Bevor verschiedene alternative Layouts mit den entsprechenden Wegenetzen betrachtet werden, soll zunächst ein Szenario für ein modulares Montagesystem eingeführt werden. Das Szenario ist so gestaltet, dass es hinreichend komplex ist und viele aus der Praxis bekannte Faktoren berücksichtigt. Gleichzeitig ist es erklärbar und kann im Rahmen eines Beitrags beschrieben werden.

So werden folgende Annahmen bzw. Eigenschaften zugrunde gelegt: die Fläche, welche für die modulare Montage verfügbar ist, beträgt max. 80x70m, es werden 16 mögliche Fertigungsinseln (mit jeweils einem eigenen Pufferbereich für 3 FTF) vorgesehen. Fertigungsinseln nehmen ca.11x11m Hallenfläche ein. Wege benötigen je Spur eine minimale Breite von 2m.

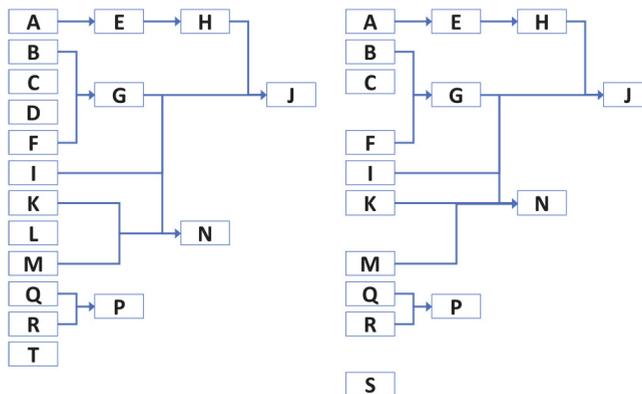


Abbildung 1: Illustration der Vorranggraphen für Produkt 1 (links) und Produkt 2 (rechts)

Die Zuordnung von Tätigkeiten zu Fertigungsinseln wurde im Voraus festgelegt und ist für alle Szenarien vergleichbar. Jeder Fertigungsinsel sind zwischen 2 und 3 verschiedene Tätigkeiten/Montageschritte zugeordnet. Darüber hinaus wurden zwei Produkttypen definiert, die gleichhäufig auftreten. Jeder Produkttyp besitzt bis zu 18 Produktionsschritte und hat einen eigenen Vorranggraphen (siehe Abbildung 1) sowie individuelle Bearbeitungszeiten.

Die FTF-Steuerung erfolgt dezentral und regelbasiert. Konkret wählen die FTF aus den möglichen Fertigungsinseln, die von den aktuell möglichen Montageschritten

abhängig sind, diejenige mit der kürzesten Warteschlange oder diejenige, die noch nicht besetzt ist. Im Falle eines Gleichstands zwischen mehreren Inseln wird die räumlich nächstgelegene Insel angefahren. Falls auch das nicht eindeutig ist, wird zufällig gewählt.

Des Weiteren wurde die Zahl von FTF und damit die Zahl der gleichzeitig im System aktiven Aufträge auf 22 gesetzt. Für die Materialversorgung wird von Warenkörben ausgegangen, welche sich von Anfang an mit auf den jeweiligen FTF befinden. Somit kann von einer expliziten Abbildung der Materialversorgung zunächst abstrahiert werden. Die Simulationszeit im Simulator Siemens Plant Simulation betrug je Experimentlauf 144h (6 Tage).

Neben der bereits erwähnten klassischen Matrixanordnung (Abbildung 2, oben links) mit vollständigen zweisepurigen Wegesystem wurden 6 weitere Layouts bzw. Wegenetzvarianten verglichen (siehe Abbildung 2). Zu bemerken ist, dass die Idee einer freien Anordnung der Stationen ohne feste Wege aufgrund der nicht gegebenen Vergleichbarkeit zunächst für diesen Vergleich verworfen wurde.

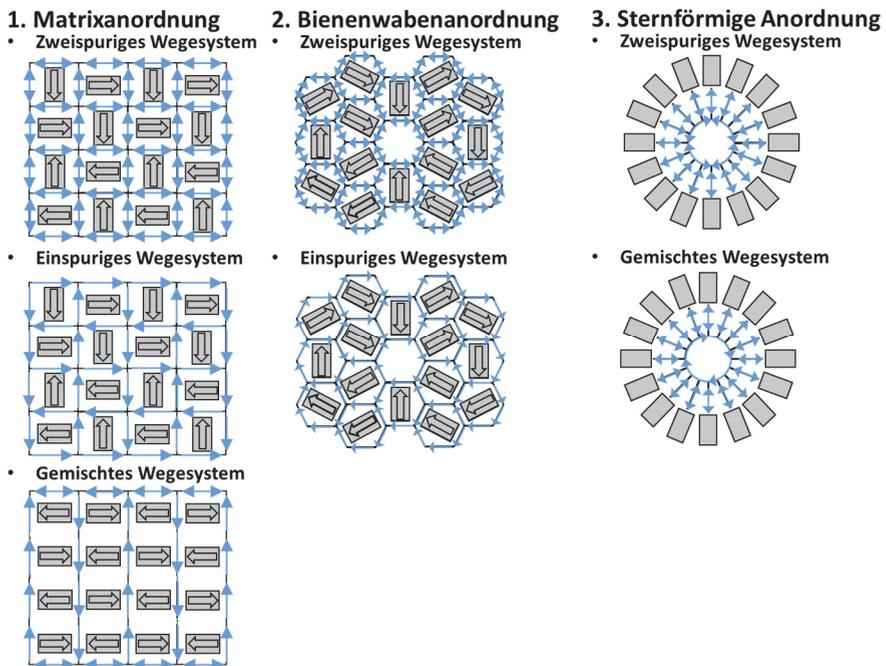


Abbildung 2: Layout- bzw. Wegenetzvarianten

Neben den offensichtlichen visuellen Unterschieden der Grundvarianten (Matrix-, Waben- und Sternanordnung) in Abbildung 2 ist insbesondere die detaillierte Ausgestaltung der Wegenetze von großem Interesse. Bei allen zweisepurigen Wegesystemen wird angenommen, dass alle Wege zwei Spuren haben und somit 4 Meter breit sind. Dies ermöglicht nicht nur Überholmanöver, sondern erlaubt auch das Begegnen von FTF auf einem Wegabschnitt. Bei allen einspurigen Wegesystemen wird dagegen angenommen, dass es sich um Einbahnstraßen handelt, um Deadlocks

zu vermeiden. Unbedingt zu beachten ist hierbei, dass es hier nicht zu Sackgassen kommen darf. Die beiden Varianten, die als "gemischte Wegesysteme" bezeichnet werden, sind spezielle Fälle, bei denen sowohl zweispurige als auch einspurige Wege im Wegenetz vorhanden sind. Bei der gemischten Matrixanordnung sind die Wege oben und unten zweispurig, während alle senkrechten Wege in der Abbildung einspurig sind. Die Richtung der einspurigen Wege ist alternierend. Bei der sternförmigen Anordnung werden im gemischten Wegesystem ebenfalls ein- und zweispurige Wege genutzt. Konkret ist hier der innere Ring einspurig befahrbar und somit eine Einbahnstraße.

Wie bereits erwähnt, können erste Kennzahlen zu den einzelnen Layouts bereits ohne Simulationsexperimente berechnet werden. Die benötigte Fläche sowie der Anteil der Wege an der Gesamtfläche unterscheiden sich teilweise erheblich (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Flächenvergleich der implementierten Layout- bzw. Wegenetzvarianten*

Implementiertes Layout	Gesamt Länge / Breite	Grundfläche	Wegefläche
Matrix 2-spurig	64m / 64m	4.096 m <sup>2</sup>	2.146 m <sup>2</sup>
Matrix 1-spurig	54m / 54m	2.916 m <sup>2</sup>	977 m <sup>2</sup>
Matrix gemischt	58m / 55m	3.190 m <sup>2</sup>	902 m <sup>2</sup>
Waben 2-spurig	80m / 68,5m	4.385 m <sup>2</sup>	2.221 m <sup>2</sup>
Waben 1-spurig	68m / 58,5m	3.318 m <sup>2</sup>	1.017 m <sup>2</sup>
Stern 2-spurig	62m / 62m	2.907 m <sup>2</sup>	647 m <sup>2</sup>
Stern gemischt	62m / 62m	2.907 m <sup>2</sup>	499 m <sup>2</sup>

Deutlich zu sehen ist das, dass auf den ersten Blick recht ungewöhnliche Sternlayout in diesem Szenario den geringsten Flächenbedarf hat, wobei hier die im inneren entstehende Freifläche abgezogen wurde. Die praktische Skalierbarkeit dieses Layouts auf mehr Stationen ist aber zu bezweifeln. Weiterhin ist zu sehen, dass einspurige Wege in der Regel weniger Platz benötigen und dass die Wabenlayouts insgesamt eine etwas größere Fläche benötigen als die klassische Matrixanordnung. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass bei den Wabenanordnungen Randflächen (halbe Waben) negativ auffallen und dass hier eine Wabe komplett frei bleibt. Diese freien Flächen könnten in der Praxis möglicherweise anderweitig genutzt werden. Zudem kann vermutet werden, dass bei nicht rechteckigen Fertigungsinseln, idealerweise ebenfalls hexagonal gestaltet, weitere Potenziale zur Flächeneinsparung bestehen.

Mittels Simulation wurden für alle 7 Varianten weitere Kennwerte ermittelt, der Durchsatz, der durchschnittliche Fahrtweg pro Produkt sowie die durchschnittliche Fahrzeit pro Produkt kann Tabelle 2 entnommen werden. Auch bei diesen Vergleichswerten fallen deutliche Unterschiede auf.

Bei beiden sternförmigen Layouts ist ein deutlich geringerer Durchsatz zu beobachten, da es in den Simulationen zu Blockaden kam, die bis zum vollständigen Stillstand der Produktion führten. Auch das einspurige Matrixlayout erzielt etwas niedrigere Durchsatzwerte, da es gelegentlich zu Wartezeiten der FTF vor vollen Puffern kommt, die dann schwer zu umgehen sind. Eine verbesserte Steuerung der FTF bzw. Mechanismen zur Vermeidung und Behebung von Blockaden könnten diesem Problem möglicherweise entgegenwirken.

*Tabelle 2: Vergleich des Durchsatzes sowie der durchschnittlichen Fahrtwege und -zeiten der implementierten Layout- bzw. Wegenetzvarianten*

Implementiertes Layout	Durchsatz	Durchschnittlicher Fahrtweg	Durchschnittliche Fahrzeit
Matrix 2-spurig	170 Stk.	699,85 m	11,5 min
Matrix 1-spurig	161 Stk.	1.592,11 m	26,5 min
Matrix gemischt	171 Stk.	1.482,82 m	24,5 min
Waben 2-spurig	171 Stk.	771,12 m	13 min
Waben 1-spurig	170 Stk.	1.381,15 m	23 min
Stern 2-spurig	112 Stk.	605,04 m	10 min
Stern gemischt	116 Stk.	970,47 m	16 min

Bei zweispurigen Matrix- bzw. Wabenlayouts treten solche Effekte nicht auf, da die Wege nicht vollständig blockiert werden und Überholmanöver möglich sind. Beim gemischten Matrixlayout reicht die Möglichkeit zum Überholen auf den zweispurigen Wegen offensichtlich aus, um negative Effekte zu vermeiden.

Ein überraschendes Verhalten zeigt das einspurige Wabenlayout, bei dem trotz fehlender Überholmöglichkeiten kaum Blockaden auftreten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es oft sehr gute alternative Routen zwischen zwei Punkten gibt. Zudem wirkt sich positiv aus, dass es keine Kreuzungen mit vier Ein- bzw. Ausgängen gibt, was die Komplexität im Konfliktfall signifikant reduziert.

Allgemein ist aber zu sehen, dass die Transportzeiten sich nicht sofort auf den Durchsatz durchschlagen und daher bei der Planung nicht als Hauptkriterium dienen sollten. Im Gegensatz dazu ist das Auftreten von Blockaden ein wichtiger Faktor, welcher bei der Planung unbedingt beachtet werden muss.

*Tabelle 3: Auslastung des Wegesystems der implementierten Layout- bzw. Wegenetzvarianten*

Implementiertes Layout	Anzahl der Wegsegmente je Klasse				Weg-segmente
	Grün (0-449)	Gelb (450-899)	Orange (900-1349)	Rot (1350-1800)	
Matrix 2-spurig	85	13	0	0	98
Matrix 1-spurig	58	28	16	17	119
Matrix gemischt	25	25	26	10	86
Waben 2-spurig	94	20	0	0	114
Waben 1-spurig	56	28	30	0	114
Stern 2-spurig	16	16	0	0	32
Stern gemischt	13	3	0	16	32

Um hier weitere Einblicke zu ermöglichen, soll als letzte hier präsentierte Kenngröße die Auslastung der Wege betrachtet werden. Die Analyse der Auslastung der Wege, basierend auf der Anzahl der Fahrten pro Wegabschnitt, liefert weitere Einblicke in das System. Um die Auslastung der Wege besser vergleichbar zu machen, wurden alle

Wegsegmente bzw. Teilabschnitte in eine von vier Klassen eingeteilt. Die Einteilung basiert auf der Anzahl der Fahrten, die auf den jeweiligen Wegsegmenten durchgeführt wurden. Diese Klassen dienen der besseren Unterscheidung der Auslastung und ermöglichen einen Vergleich der Wege, somit können Engpässe und Überlastungen identifiziert werden. Es handelt sich um folgende Klassen: Grün 0-499 Fahraufträge, Gelb 450-899 Fahraufträge, Orange 900-1349 Fahraufträge und Rot 1350-1800 Fahraufträge. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse dieser Analyse dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bei den zweispurigen Matrix- und Wabenlayouts die Auslastung der Wege insgesamt geringer ist, da die Fahrzeuge die Möglichkeit haben, zu überholen und/oder Alternativrouten zu nutzen. Bei den einspurigen Wegen sind die Auslastungswerte tendenziell höher, da Überholmöglichkeiten fehlen und die Fahrzeuge gegebenenfalls warten müssen. Interessanterweise weisen die sternförmigen Layouts, trotz der Blockaden und des geringeren Durchsatzes, niedrigere Auslastungswerte auf. Dies liegt daran, dass die Wege im Inneren des Sterns, wo die Blockaden auftreten, aufgrund des Stillstands der Produktion weniger Fahrten aufweisen. Die Wege außerhalb des Sterns hingegen sind relativ frei und haben somit niedrigere Auslastungswerte.

Bei einspurigen bzw. gemischten Matrixlayouts hingegen wird ein kleiner Teil der Wege sehr viel öfter (Orange und Rot) befahren. Es besteht die Vermutung, dass durch Anpassungen der Tätigkeitsverteilung auf den Fertigungsinseln oder Optimierung der FTF-Steuerung dieser Effekt möglicherweise gedämpft, aber wahrscheinlich nicht vollständig beseitigt werden kann. Wiederum erstaunlich robust erweist sich im Versuch das einspurige Wabenlayout, in dem zwar einige Wege eine höhere Auslastung als im zweispurigen Fall aufweisen, aber keine sehr hoch ausgelasteten Wege (Rot) auftreten. Die Visualisierung der Wegeauslastung, wie in Abbildung 3 für das einspurige Wabenlayout dargestellt, kann zusätzliche Einblicke in problematische Bereiche des modularen Montagesystems liefern.

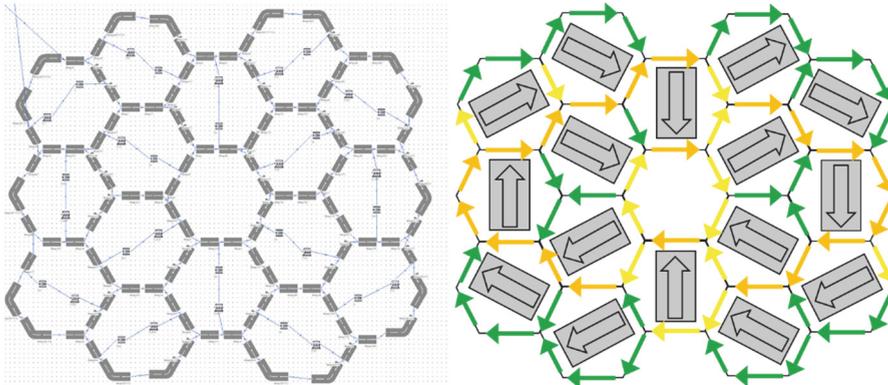


Abbildung 3: Bienenwabenanordnung mit einspurigem Wegesystem: Screenshot des Simulationsmodells (links) und Darstellung der Auslastung der Wege (rechts)

Die durchgeführten Experimente liefern keine endgültigen und allgemeingültigen Ergebnisse bezüglich der Vorteilhaftigkeit eines bestimmten Layouts für beliebige modulare Montagesysteme. Dennoch lässt sich zusammenfassend sagen, dass das

Layout neben der klassischen Matrixanordnung einen bisher unterschätzten Gestaltungsfaktor darstellt. Insbesondere das einspurige Wabenlayout zeigt in den vorgestellten Ergebnissen Potenzial. Es bietet einen guten Kompromiss zwischen Systemleistung und Platzbedarf. Wenn Randbereiche (halbe Waben) sinnvoll genutzt werden können und die Fertigungsinseln nicht auf rechteckige Grundrisse beschränkt sind, sondern idealerweise in Form von 6-Ecken gestaltet werden können, könnte das Wabenlayout eine ernsthafte Alternative zu klassischen Matrixlayouts darstellen. Auf der anderen Seite sind Layouts, die zu Blockaden neigen, wie die Sternlayouts, nicht geeignet. Falls solche Layouts gewählt werden, müssen unbedingt Mechanismen zur Vermeidung und Behebung von Blockaden implementiert werden.

## 4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein simulationsbasierter Vergleich verschiedener Layouts bzw. Wegenetztopologien für die modulare Montage durchgeführt. Es wurde ein fiktives Szenario verwendet, und obwohl die Ergebnisse sicher nicht allgemeingültig sind, konnte zumindest das Potenzial von nicht klassischen Matrixanordnungen und dem Einfluss der Gestaltung der Wegenetze gezeigt werden.

Weitere Betrachtungen zu Layouts und Wegenetztopologien für modulare Montagesysteme sind sicher angebracht. So sind zum einen sicher nicht alle möglichen Varianten betrachtet worden, z. B. wurden die frei positionierten Fertigungsinseln ohne explizites Wegenetz mangels der direkten Vergleichbarkeit ausgeschlossen, zum anderen sind um allgemeingültigere Aussagen treffen zu können weitere Untersuchungen möglichst an Realweltszenarien nötig.

Weiterhin sind einige Punkte für modulare Montagesysteme offen. So wurde die Materialversorgung für modulare Montagesysteme bisher kaum untersucht. Der Beitrag ging von einer Versorgung mit einem Warenkorb aus, was in der Praxis nicht immer möglich ist. Darüber hinaus gibt es, trotz einzelner Publikationen zu diesem Thema, noch erhebliche Forschungspotenziale bei der Steuerung modularer Montagesysteme.

Schließlich wird mittelfristig ein Übergang von Teilbetrachtungen zu ganzheitlichen Ansätzen notwendig sein, da bspw. Entscheidungen wie die Aufgabenzuordnung zu Arbeitsstationen eng mit dem Layoutdesign zusammenhängen. Die Beherrschung der Komplexität solcher umfassender Ansätze stellt jedoch eine große Herausforderung dar.

## Literatur

- Audi AG, 2019: Die Modulare Montage - Fertigungsinseln statt Fließband. Online verfügbar unter <https://www.audi-illustrated.com/de/smart-factory/Die-Modulare-Montage>, zuletzt geprüft am 28.01.2019.
- Bergmann, S.: Optimization of the Design of Modular Production Systems. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference, Singapore, 11.12.2022 - 14.12.2022, 2022, S. 1783–1793.
- Burgräf, P.; Dannapfel, H.M.; Adlon, T.; Schukat, E.; Kahmann, H.; Holtwiesche, L.: Modeling and evaluating agile assembly systems using mixed-integer linear programming. In: Gao, R.X.; Ehmman, K. (Hrsg.): Proceeding of the 53rd CIRP

- Conference on Manufacturing Systems 2020, Chicago, IL, USA, 1-3 July, 2020, S. 1073–1078.
- Daimler AG, 2018: Factory 56 – Mercedes-Benz Cars Increases Flexibility and Efficiency in Operations. Hg. v. Daimler AG. Online verfügbar unter <https://www.daimler.com/innovation/production/factory-56.html>, zuletzt aktualisiert am 15.04.2020.
- El Maraghy, H.; Schuh, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A.: Product variety management. *CIRP Annals* 62 (2013) 2, S. 629–652.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Straßburger, S.: Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen. In: Putz, M.; Schlegel, A. (Hrsg.): Tagungsband der 18. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2019: Modelling and Simulation of Modular Production Systems, Chemnitz, 18.- 20.09., 2019, S. 391–401.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Straßburger, S.: Simulationsbasiertes Deep Reinforcement Learning für Modulare Produktionssysteme. In: Breitenacker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge, 25.– 27. Juli 2022, 2022, S. 65–72.
- Fries, C.; Wiendahl, H.-H.; Assadi, A.A.: Design concept for the intralogistics material supply in matrix productions. In: Mpofo, K.; Butala, P. (Hrsg.): Proceedings of the 30th CIRP Design 2020: Elsevier 2020, S. 33–38.
- Göppert, A.; Hüttemann, G.; Jung, S.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Frei verkettete Montagesysteme. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 3, S. 151–155.
- Greschke, P.; Schönemann, M.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems. *Procedia 5CIRP6* 17 (2014), S. 160–165.
- Hüttemann, G.; Gaffry, C.; Schmitt, R.H.: Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly – Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook. *Procedia 5CIRP6* 52 (2016), S. 112–117.
- Kern, W.; Bauernhansl, T.: Types and Usage of Assembly Priority Charts in a Modular Assembly System. In: 24th International Conference on Production Research (ICPR 2017). Red Hook, NY: Curran Associates, Inc., 2020 2020,
- Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. New York, NY: John Wiley & Sons 2010.
- Mayer, B., 2018: Ich bin ein Fan von Effizienz. Hg. v. Automobilproduktion.de. Online verfügbar unter <https://www.automobilproduktion.de/interviews-734/porsche-produktionsvorstand-reimold-wir-ziehen-alle-register-126.html?page=4>, zuletzt geprüft am 08.05.2023.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014.
- Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P.; Thiede, S.: Simulation of Matrix-Structured Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015) 1, S. 104–112.
- Spath, D. (Hg.): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2013.