

## Planung von Matrixproduktionssystemen bei hohen Freiheitsgraden und unter Restriktionen

# Lean-Line- und Flex-Abschnitte

S. Kärcher, D. Ranke, M. Trierweiler, P. Berkhan, T. Bauernhansl

Matrixproduktionssysteme haben eine hohe Flexibilität bei gleichzeitig hoher Produktivität. Sie bestehen aus frei anfahrbaren Prozessmodulen. Bei großen Produkten, vielen Montageschritten und einer begrenzten Fläche ist die Planung dieser Prozessmodule aufgrund der vielen Freiheitsgrade und Restriktionen noch sehr aufwendig. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die den Planungsaufwand durch eine Zuordnung der Prozesse zu Lean-Line- und Flex-Abschnitten reduziert.

### STICHWÖRTER

Montage, Flexible Fertigungssysteme, Fertigungsplanung

### Lean-line and flex sections – Method for supporting the planning of matrix production systems

Matrix production systems combine high flexibility with high productivity. They consist of freely accessible process modules. With large products, many assembly steps, and a limited area, the planning of these process modules becomes a very complex undertaking due to the many degrees of freedom and restrictions. This paper presents a method to reduce the planning effort by assigning the processes to lean-line and flex sections.

## 1 Einleitung und Motivation

Matrixproduktionssysteme beschreiben eine alternative Produktionsstruktur im volatilen Umfeld. Immer mehr Unternehmen setzen auf diese Produktionsstruktur, da sie eine hohe Flexibilität bei gleichzeitig hoher Produktivität ermöglicht. Matrixproduktionssysteme bestehen aus frei anfahrbaren Prozessmodulen. Ein Prozessmodul kann eine Station oder Zelle sein oder aus mehreren verketteten Stationen beziehungsweise Zellen bestehen. [1]

Existierende Methoden zur Planung von Matrixproduktionssystemen beschreiben, wie diese Prozessmodule zu definieren sind: produkt-, kapazitäts- und/oder prozessorientiert (siehe Kapitel 2). Mit diesen Methoden erfolgt eine Gestaltung der Prozessmodule und ein Design des Produktionssystems. Vor allem bei komplexen Montagesystemen mit vielen Prozessschritten hat sich in der Praxis gezeigt, dass der manuelle Entscheidungsaufwand zur Gestaltung dieser Prozessmodule und des Gesamtsystems aufgrund der vielen Freiheitsgrade noch sehr hoch ist. Ebenso zeigt sich bei engen Restriktionen für die verfügbare Fläche, vor allem bei Brownfield-Planungen, oder einer großen Produktgröße, dass der Flexibilität Grenzen gesetzt werden. Aufgrund des Platzbedarfs ist beispielsweise nicht immer eine freie Verkettung aller Prozessmodule möglich. Dennoch sollen auch in diesen Systemen die Vorteile eines Matrixproduktionssystems bestmöglich genutzt werden.

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die als Entscheidungsunterstützung den manuellen Aufwand bei der Gestaltung von Matrixproduktionssystemen von Brownfield-Planungen großer Systeme – bestehend aus einer hohen Anzahl an Prozessen und großen Produkten – reduziert. Die Methode stellt sicher, dass die Prozesse, die einen hohen Flexibilitätsbedarf haben, in eine flexible Struktur gebracht werden. Prozesse mit

geringerem oder keinem Flexibilitätsbedarf werden im Kompromiss zur begrenzten Fläche und für eine hohe Produktivität in ein Prozessmodul in klassischer Linienstruktur geplant.

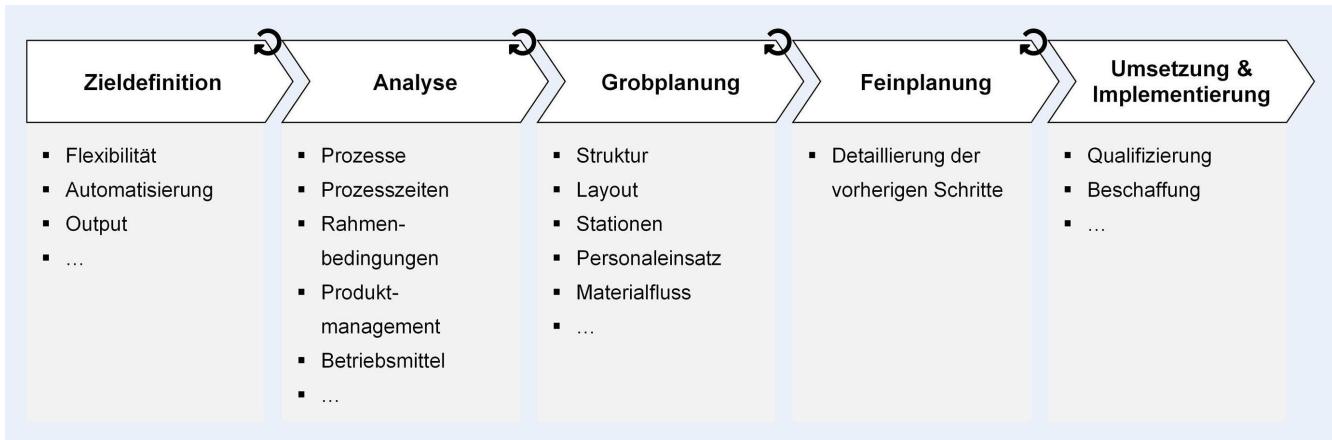
In Kapitel 2 werden Matrixproduktionssysteme eingeführt und bestehende Planungsvorgehen vorgestellt sowie ein allgemeines Planungsvorgehen im Kontext der Fabrikplanung abgeleitet. Kapitel 3 beschreibt die Methode. Kapitel 4 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2 Planung von Matrixproduktionssystemen

### 2.1 Matrixproduktionssysteme

Ein Matrixproduktionssystem ist ein modular aufgebautes Produktionssystem. Die Produktionsressourcen sind in Prozessmodule gegliedert. Diese sind frei anfahrbare und aus logistischer Sicht individuell beplanbar [1–3]. Die Prozessmodule selbst bestehen aus Ressourcenmodulen, welche einzelne Prozessschritte durchführen. Dies können beispielsweise Roboter, Schraubeinrichtungen oder Montagemitarbeitende sein. Die Gliederung zu einem Prozessmodul wird anwendungsfallspezifisch festgelegt. So kann ein Prozessmodul eine einzelne Roboterzelle oder ein mehrere Stationen umfassender Linienabschnitt sein.

Die Gliederung des Produktionssystems über Prozessmodule sorgt für einen flexiblen, produktspezifischen Materialfluss. Dies ermöglicht Variantenmix- und Stückzahlflexibilität im operativen Betrieb [1]. Die modulare Grundcharakteristik erlaubt darüber hinaus für taktische Zeiträume Rekonfigurationen durchzuführen. Unter Rekonfiguration versteht man das Hinzufügen oder Wegnehmen von Prozessmodulen oder einzelner Funktionalitäten, um das Produktionssystem zu skalieren oder die Zusammensetzung an Technologien anzupassen. [1, 4]



**Bild 1.** Fabrikplanerisches Vorgehen. *Grafik: in Anlehnung an [7-9]*

## 2.2 Planungsvorgehen

Für die Planung von Matrixproduktionssystemen gibt es verschiedene Ansätze, die sich darin gleichen, dass sie ein System aus flexibel verketteten Prozessmodulen gestalten. In der Ausgestaltung des Verfahrensablaufs, der Herleitung von Prozessmodulen, dem Einsatz von Methoden und dem detaillierten Systemzielbild unterscheiden sich diese Ansätze jedoch. Im Folgenden werden drei Ansätze kurz vorgestellt und beschrieben:

### 2.2.1 Matrixproduktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung nach Greschke

Greschke lehnt sich in seinem Ansatz [2] an das Planungsvorgehen nach REFA an. Dieses setzt sich aus einer Analyse und Zielgrößenbestimmung, einer Grobplanung, einer Feinplanung und einer Umsetzung zusammen. Das Zielbild von Greschke ist ein Produktionssystem, in welchem die Stationen taktunabhängig arbeiten und über Puffer entkoppelt sind. Die Stationen werden im Fluss zueinander angeordnet, was aber keine Linie darstellen muss.

Zur Herleitung einer solchen Struktur unterteilt Greschke die Grobplanung in mehrere Schritte. Zunächst wird, beispielsweise in Abhängigkeit des Kundentaktes, der Logistikflächen und der Qualifikation der Mitarbeitenden, eine Menge an Arbeitszellen bestimmt. Darauf aufbauend erfolgt eine Arbeitspaketgestaltung und eine Betriebsmittelkombination. Zunächst werden demnach Prozesse in sinnvolle Arbeitspakete zusammengefasst. In der Betriebsmittelkombination wird betrachtet, welche Ressourcen in einer Station zusammen operieren können. Abschließend findet die Arbeitspaketzuordnung zu spezifischen Stationen statt sowie eine abschließende Überprüfung der Zuordnung. Das Vorgehen erfolgt iterativ und wird immer weiter detailliert.

### 2.2.2 Modulare Produktion nach Kern

Der Ansatz zur Planung einer modularen Produktion nach Kern [3] ist der Gestaltung einer Matrixproduktion zuzuordnen. Kern fokussiert sich ebenfalls auf flexibel verkettete und unabhängige Stationen, allerdings plant er keine redundanten Stationen. Jede Station ist mit ihrem Prozessumfang einzigartig im System [3]. Das Vorgehen zur Gestaltung des Systems umfasst die folgenden Schritte: Datenbasis generieren, Struktur- und Kapazi-

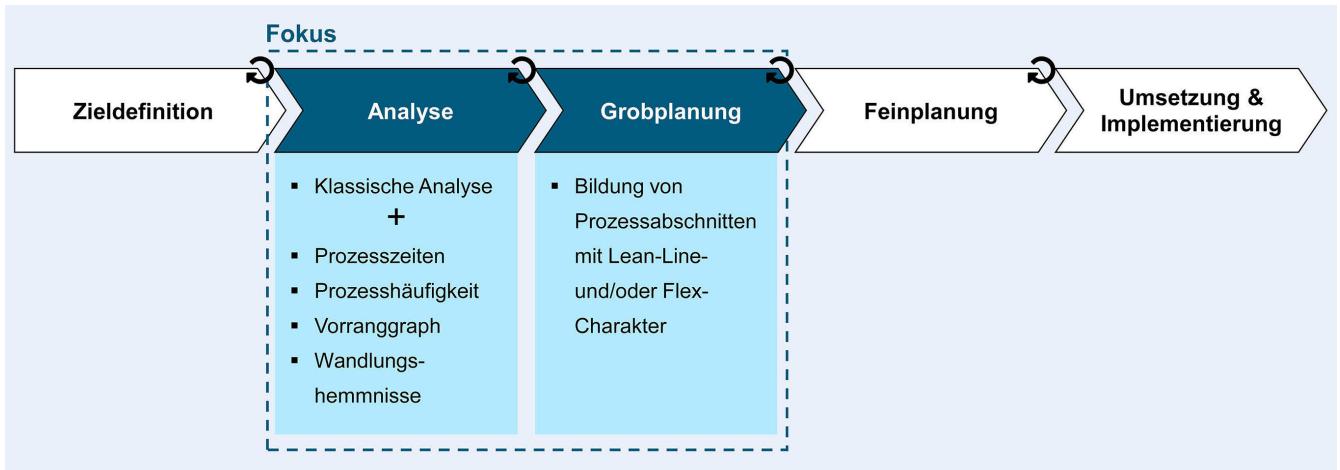
tätsplanung, Zuordnung der Arbeitsinhalte zu Stationen, Layoutplanung und Detailplanung.

Der Schritt der Zuordnung der Arbeitsinhalte zu Stationen teilt sich wiederum in mehrere Unterschritte auf. Charakteristisch bei diesem Vorgehen ist, dass es sich an dem Objektprinzip orientiert. Dieses sieht vor, dass komplette Verbauumfänge eines Produktes oder einer Baugruppe einer Station zugeordnet werden [3]. Eine feste Prozessfolge soll möglichst nicht unterbrochen werden. Das Hauptkriterium der Zuordnung von Prozessen zu Stationen ist eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Stationen, sodass eine insgesamt geringe Stationsanzahl generiert wird. Daneben gibt es weitere Zuordnungsregeln, welche als Leitfaden dienen, aber keine Zwangsvorgabe darstellen. Diese Regeln sind beispielsweise, dass Standardprozesse mit einer hohen Verbaurate nicht mit Variantenprozessen geringer Verbaurate an eine Station geplant werden sollen, oder dass Prozesse mit einer direkten und einfachen Verbindung im Vorranggraph zusammen an einer Station eingeplant werden sollten.

### 2.2.3 Matrixproduktion unter Berücksichtigung von Wandlungshemmnissen nach Foith-Förster

Foith-Förster [5, 6] konzentriert sich in ihrer Planungsmethodik auf eine generische Zuweisungsmethodik von Prozessen zu Prozessmodulen. Sie unterscheidet damit die Ebenen Station und Prozessmodul. Zur Durchführung der Zuweisung werden zuerst die Prozesse und deren Anforderungen aufgenommen. Zusätzlich werden technologische und organisatorische Wandlungshemmnisse identifiziert, die die Zuordnung von Prozessen an denselben Modultypen verhindern. Entlang der Wandlungshemmnisse werden die Prozesse geclustert und strukturiert. Kombinierbare Prozesse werden einem Prozessmodultyp zugeordnet unter der Prämisse, die Anzahl unterschiedlicher Modultypen minimal zu gestalten. Im letzten Schritt folgt eine Kapazitätsharmonisierung, indem bei Bedarf Prozessmodule vielfach eingeplant werden, wenn der Kapazitätsbedarf das Kapazitätsangebot oder eine Grenze übersteigt. Dadurch kann es auch zu redundanten Prozessmodulen kommen.

Das Vorgehen ist flexibel in der Auswahl und Betrachtung von Wandlungshemmnissen. Die Hemmnisse sind gemäß Problemstellung und Systemcharakteristika zu wählen. Ein Hemmnis kann dabei die Produktgröße, das Automatisierungspotenzial oder eine ergonomische Anforderung sein.



**Bild 2.** Einordnung und Fokussierung der Methode in das fabrikplanerische Vorgehen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

### 2.3 Abgeleitetes allgemeines Planungsvorgehen aus den vorgestellten Ansätzen

Die untersuchten Ansätze zur Gestaltung einer Matrixproduktion zeigen, dass sich diese weiterhin am fabrikplanerischen Vorgehen (beispielsweise nach [7–9]) orientieren (**Bild 1**).

Lediglich das spezifische Zuweisen von Arbeitsinhalten zu Stationen oder Prozessmodulen ist unterschiedlich gestaltet. Es gilt aber weiterhin ein iteratives Vorgehen von Zieldefinition und Analyse, über Grob- und Feinplanung, zur Umsetzung und Implementierung. Dabei wird sowohl die Struktur der Stationen zueinander als auch die Zuordnung und Häufigkeit von Prozessen zu Stationen in alternativen Lösungen betrachtet und detailliert. Maßgeblich bei der Auswahl einer Vorzugslösung ist die Einhaltung der gesetzten Zielstellung zu Beginn.

## 3 Bildung von Prozessabschnitten mit Lean-Line- oder Flex-Charakter

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, die die Freiheitsgrade und den hohen manuellen Aufwand, die bei der Planung von großen Matrixproduktionssystemen entstehen, reduziert. Diese Methode wurde zusätzlich in die bestehenden Verfahren zur Planung von Matrixproduktionssystemen eingefügt. Sie ist als iteratives Verfahren zu verstehen und lässt sich in die Gesamtplanung einordnen (**Bild 2**).

Das zugrundliegende Ziel ist, ein flexibles Produktionssystem zu gestalten, dabei aber gegebene Flächenrestriktionen zu berücksichtigen. Erhöhte Flexibilität und ein geringer Flächenbedarf sind somit das planerische Ziel, das verfolgt wird.

In der Analyse müssen zunächst Daten zum betrachteten Produktionssystem, inklusive der Prozesszeiten und -häufigkeiten, aufgenommen und analysiert werden. Zusätzlich zur klassischen Analyse müssen insbesondere der Vorranggraph beziehungsweise die Vorranggraphen der Produkte entwickelt werden. Sie zeigen alle bestehenden Vorrangbeziehungen der zur Erzeugung eines Produktes notwendigen Prozesse auf [10]. Weiterhin müssen Wandlungshemmisse identifiziert werden. Wandlungshemmisse beschreiben Faktoren, die einer Wandlungsfähigkeit entgegenstehen. Nach dem PPR (Produkt-Prozess-Ressource)-Modell [11] können diese in produktseitige Wandlungshemmisse (wie die Größe des Produkts), prozesseitige Wandlungshemmisse

(etwa Anforderungen an die Sauberkeit) oder ressourcenseitige Wandlungshemmisse (beispielsweise, dass Montagemitarbeiter mit unterschiedlichen Fähigkeiten benötigt werden) gegliedert werden. Sie stellen die Einschränkungen für die Planung des Montagesystems dar.

In der Grobplanung soll nun, vor Gestaltung der Prozessmodule, noch eine Zuordnung von Prozessen zu Lean-Line- und Flex-Abschnitten erfolgen. Die Einteilung der Prozesse in diese zwei Kategorien berücksichtigt, dass Linienabschnitte einen geringen Flächenbedarf haben, aber auch eine geringere Flexibilität. Beide Abschnittskategorien haben entsprechende Vor- und Nachteile und berücksichtigen die Zielsetzung unterschiedlich. Die Zuordnung erfolgt in drei Schritten:

1. Einordnung der Prozessschritte in Zeit-Häufigkeit-Quadranten (Kapitel 3.2)
2. Übertragung der Erkenntnisse der Zeit-Häufigkeit-Quadranten in den Vorranggraphen (Kapitel 3.3)
3. Bildung von Lean-Line- und Flex-Abschnitten (Kapitel 3.4)

### 3.1 Lean-Line- und Flex-Abschnitte

Ein Lean-Line-Abschnitt beschreibt mehrere Stationen, die starr bis elastisch miteinander verbunden sind und keine bis kaum Zwischenpuffer haben. Die Stationen sind zueinander ausgetaktet.

In Lean-Line-Abschnitten werden die Vorteile der hohen Produktivität und des geringen Platzbedarfs einer Linie genutzt. Prozesse mit einer hohen Häufigkeit werden zu Lean-Line-Abschnitten zusammengefasst. Diese Prozesse eignen sich besonders gut, um in einer Linie ausgeführt zu werden.

Ein Flex-Abschnitt beschreibt eine flexible Prozessmodulgestaltung, entkoppelt vom weiteren System und mit frei anfahrbaren Modulen. Für Produktionsprozesse mit geringerer Häufigkeit wird eine besonders hohe Flexibilität benötigt. Für diese Prozesse werden daher Flex-Abschnitte definiert.

### 3.2 Einordnung der Prozessschritte in Zeit-Häufigkeit-Quadranten

Für ein erstes Vor-Screening der Prozesse, ob diese eher einem Lean-Line-Abschnitt oder einem Flex-Abschnitt zugeordnet werden sollen, werden die Zeit-Häufigkeit-Quadranten entwickelt (**Bild 3**).

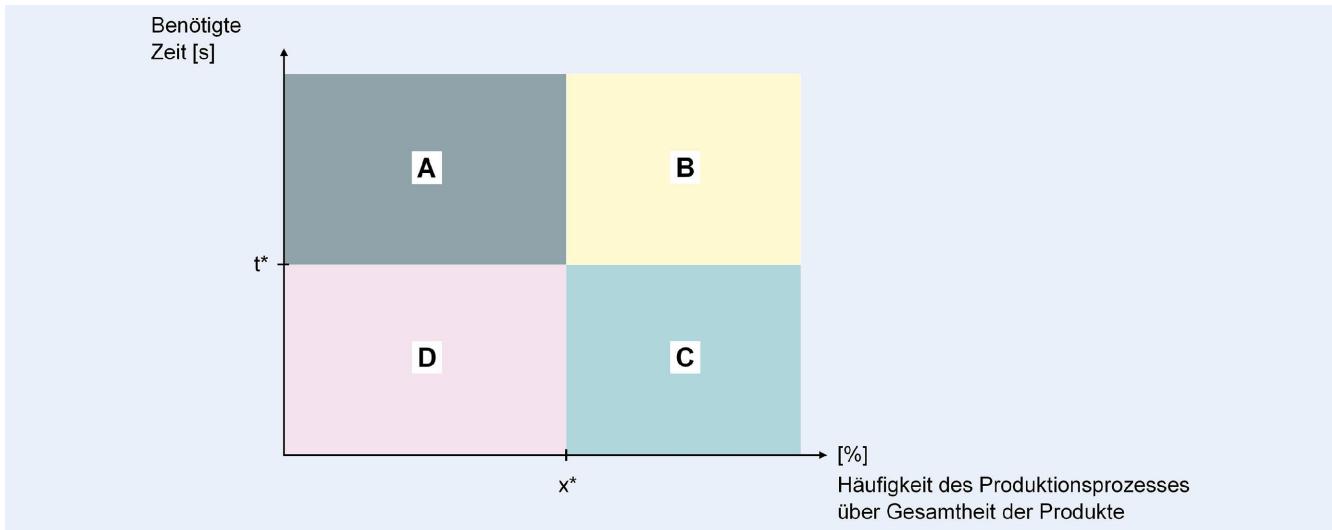


Bild 3. Zeit-Häufigkeit-Quadranten. Grafik: Fraunhofer IPA

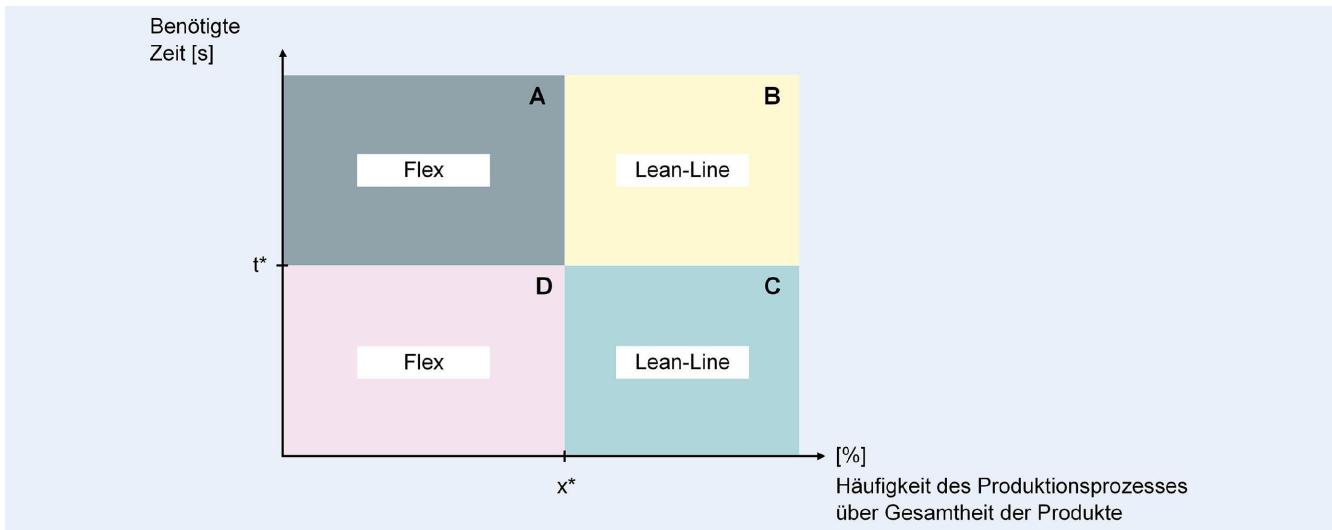


Bild 4. Interpretation der Zeit-Häufigkeit-Quadranten in Lean-Line- und Flex-Abschnitte. Grafik: Fraunhofer IPA

Auf der x-Achse wird die Häufigkeit der Produktionsprozesse in Prozent aufgetragen, auf der y-Achse die zugehörigen Zeiten. Die Grenzwerte  $t^*$  und  $x^*$  trennen die vier Quadranten und müssen manuell und nach Ermessen festgelegt werden. Eine Sensibilitätsanalyse kann zur Unterstützung genutzt werden. Die Quadranten beschreiben dabei:

- A: Die Prozesse im Quadrant A kommen selten vor, benötigen aber eine lange Prozesszeit. Diese sind besonders für Flex-Abschnitte geeignet.
- B: Die Prozesse im Quadrant B kommen häufig vor und benötigen eine lange Prozesszeit. Diese sind besonders für Lean-Line-Abschnitte geeignet.
- C: Die Prozesse im Quadrant C kommen häufig vor und benötigen lange Prozesszeit. Diese sind für Lean-Line-Abschnitte geeignet.
- D: Die Prozesse im Quadrant D kommen selten vor, haben aber auch nur eine kurze Prozesszeit. Diese sind eher für Flex-Abschnitte geeignet. Aufgrund der kurzen Dauer sind sie aber keine Komplexitätstreiber.

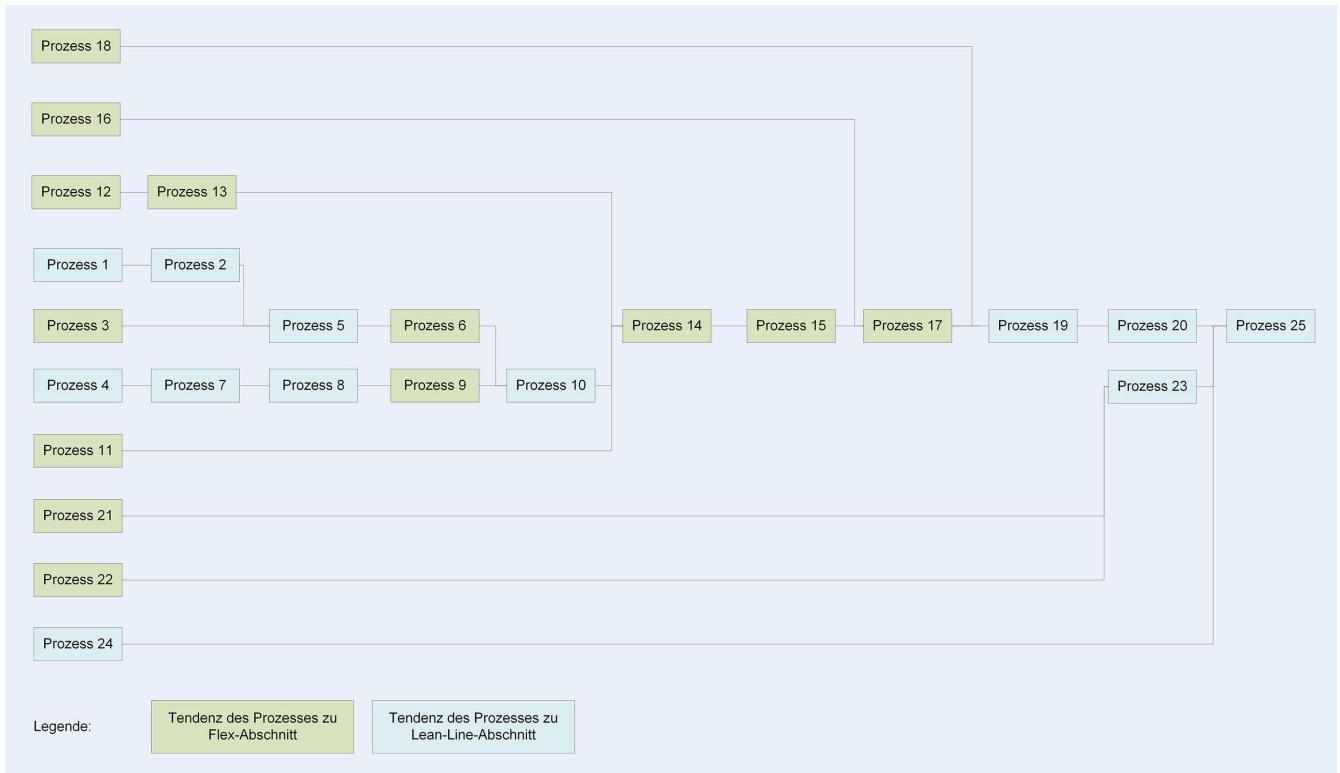
In diese Zeit-Häufigkeit-Quadranten werden alle Prozesse eingeordnet. Die Einordnung der Produktionsprozesse erfolgt über eine automatisierte Datenanalyse. Die Quadranten zeigen eine Tendenz zur Einordnung in Lean-Lean-Abschnitte und Flex-Abschnitte an (Bild 4).

A und B geben eine weitgehend finale Vorgabe vor, während C und D in Abhängigkeit der Anzahl der Cluster nochmals die Zuordnung wechseln können.

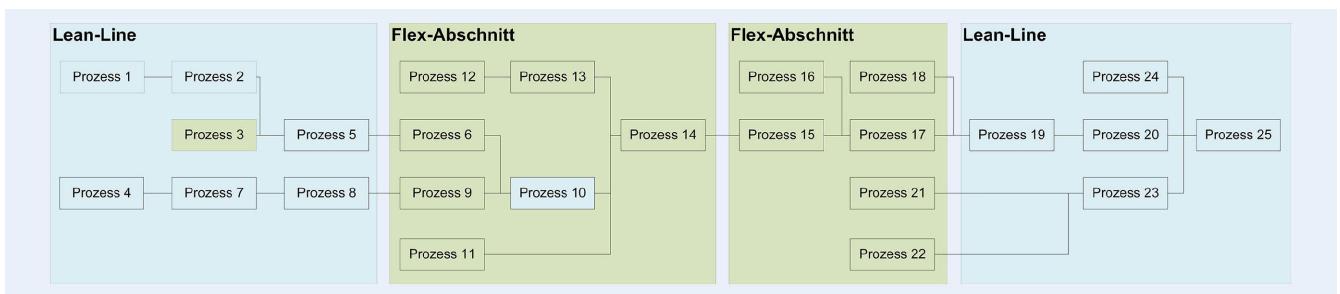
### 3.3 Übertragung der Erkenntnisse der Zeit-Häufigkeit-Quadranten in den Vorranggraphen

Nach Einordnung der Prozesse in die Zeit-Häufigkeit-Quadranten wird die Tendenz eines jeden Prozesses, ob eher einem Lean-Line-Abschnitt oder einem Flex-Abschnitt zuzuordnen, in den Vorranggraphen übertragen (Bild 5). Eine farbliche Markierung verdeutlicht die Zuordnung.

Da Flex-Abschnitte mehr Fläche benötigen als Linienabschnitte, bestimmt die zur Verfügung stehende Fläche die Anzahl an Prozessclustern und Flex-Abschnitten. In einem iterativen Vor-



**Bild 5.** Erkenntnisse aus Zeit-Häufigkeit-Quadranten in Vorranggraphen übertragen. *Grafik: Fraunhofer IPA*



**Bild 6.** Vorranggraph mit farblich markierten Lean-Line- und Flex-Abschnitten. *Grafik: Fraunhofer IPA*

gehen wird die finale Zuordnung von Prozessen zu Abschnitten bestimmt, wobei Prozesse aus den Quadranten C und D als erstes den präferierten Abschnitt ändern. Kapitel 3.4 zeigt die anzuwendenden Regeln auf.

#### 3.4 Bildung von Lean-Line- und Flex-Abschnitten

Im letzten Schritt müssen nun Lean-Line- und Flex-Abschnitte definiert werden. Grundlage hierfür ist der Vorranggraph mit den farblich markierten Prozessen. Diese werden so verschoben, dass Abschnitte mit Lean-Line- oder Flex-Charakter entstehen. Die Zuordnung einzelner Prozesse kann in diesem Schritt auch geändert werden. Folgende Regeln können dabei unterstützen:

- Die Anzahl der Abschnitte sollte minimiert werden (alles mit Flex zu Flex, alles mit Lean-Line zu Lean-Line).
- Sprünge zwischen den Abschnitten sollten möglichst reduziert werden.
- Ähnliche Prozesse bilden ein thematisches Cluster (etwa Prozesse einer Baugruppe möglichst zusammenlassen)

- Wandlungshemmisse können Treiber für den Wechsel eines Abschnitts sein
- Prozesse aus C und D, ohne Einbindung in ein größeres Cluster ihrer Art, können die Kategorie problemlos wechseln. Das Ergebnis nach Zuordnung der Prozesse zu Abschnitten sind definierte Lean-Line- und Flex-Abschnitte, die in der weiteren Planung detailliert werden müssen (Bild 6). Für Lean-Line-Abschnitte bedeutet dies im Wesentlichen eine Liniенplanung inklusive Stationsgestaltung und Abtaktung. Für die Flex-Abschnitte müssen flexible Stationen geplant werden.

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Methode vorgestellt, welche den manuellen Aufwand bei der Gestaltung von Matrixproduktionssystemen bei Brownfield-Planungen reduziert. Über Zeit-Häufigkeit-Quadranten wird für die Prozessschritte zunächst eine Tendenz zu Lean-Line- oder Flex-Abschnitten ermittelt. Nach Übertragung der Erkenntnisse in den Vorranggraphen werden dann Lean-Line- oder Flex-Abschnitte gebildet.

Insbesondere bei einer hohen Anzahl an Prozessen, großen Produkten und begrenzter Fläche stellt die Methode sicher, dass die Prozesse, die einen hohen Flexibilitätsbedarf haben, in eine flexible Struktur gebracht werden. Prozesse mit geringerem oder keinem Flexibilitätsbedarf werden in ein Prozessmodul in klassischer Linienstruktur geplant. Weiter wird der manuelle Aufwand bei der Planung reduziert.

Die Methode wurde bereits in Projekten in der Industrie validiert. Sie soll in weiteren Anwendungsfällen eingesetzt und gegebenenfalls weiterentwickelt oder erweitert werden. Auch kann in folgenden Arbeiten eine komplette Automatisierung der Methode erfolgen, beispielsweise über ein IT-Tool, das automatisiert Varianten generiert.

#### L iteratur

- [1] Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen. Stand: 2022. Internet: [www.acatech.de/publikation/umsetzung-von-cyber-physischen-matrixproduktionssystemen/download-pdf?lang=de](http://www.acatech.de/publikation/umsetzung-von-cyber-physischen-matrixproduktionssystemen/download-pdf?lang=de). Zugriff am 13.01.2023
- [2] Greschke, P.: Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung. Essen: Vulkan Verlag 2016
- [3] Kern, D.-I. W.: Modularer Produktion – Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau. Wiesbaden: Springer Vieweg 2021
- [4] Trierweiler, M.; Bauernhansl, T.: Reconfiguration Process for Matrix Manufacturing Systems. Procedia CIRP 107 (2022), pp. 699–704
- [5] Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T.: Changeable Assembly Systems Through Flexibly Linked Process Modules. Procedia CIRP 41 (2016), pp. 230–235
- [6] Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T.: Axiomatic design of matrix production systems. The 14th International Conference on Axiomatic Design, ICAD 2021, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1174 (2021), pp. 1–14
- [7] Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Krüger, A.: Stückzahlflexible Montage- und Logistiksysteme. Integrierte Planung kapazitätsflexibler Systeme. *wt Werkstattstechnik online* 89 (1999) 9, S. 413–418. Internet: [www.werkstatttechnik.de](http://www.werkstatttechnik.de). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [8] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer Science+Business Media 2006
- [9] Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen – Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Heidelberg: Springer-Verlag 2009
- [10] Prenting, T. O.; Battaglin, R. M.: The Precedence Diagram: A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing. *The Journal of Industrial Engineering* 15 (1964) 4, pp. 209–213
- [11] Winkler, D.; Kathrein, L.; Meixner, K. et al.: Towards a Hybrid Process Model Approach in Production Systems Engineering. In: Walker, A.; O'Connor, R.; Messnarz, R. (Edit.): *Systems, Software and Services Process Improvement*. EuroSPI 2019. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer-Verlag 2019, pp. 339–354



**S u s a n n K ä r c h e r** , M.Sc.  
Foto: Fraunhofer IPA

**D a n i e l R a n k e** , M.Sc

**M i c h a e l T r i e r w e i l e r** , M.Sc.

**P a t r i c i a B e r k h a n** , M.Sc.

**Prof. Dr.-Ing. T h o m a s B a u e r n h a n s l**  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
susann.kaercher@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

#### L I Z E N Z



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