

# Manufacturing Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Produktionssystemen mit hoher wertschöpfender Variabilität

Jochen Deuse<sup>1</sup>, David Lenze<sup>1</sup>, Ferdinand Klenner<sup>2</sup>, Tilman Friedrich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund

<sup>2</sup> BMW Group

*In der heutigen Großserienproduktion ist eine optimale Positionierung im Spannungsfeld zwischen Produktivität und Flexibilität ein entscheidender Erfolgsfaktor hinsichtlich der Sicherung langfristiger Wettbewerbsvorteile. Flexible Fertigungssysteme (FFS) stellen eine hoch flexible Organisations-form der Fertigung dar. Die inhärente Komplexität dieser Systeme erschwert jedoch die Lokalisierung von Fertigungsengpässen und damit die Sicherung einer ausreichenden Produktivität. Dieser Beitrag stellt eine Methodik zur Identifikation dynamischer Engpässe in FFS vor, deren Basis ein Datenanalysemodell bildet, wodurch eine verbesserte Komplexitäts-beherrschung ermöglicht wird.*

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines steigenden Wettbewerbsdrucks sind heutige Unternehmen gezwungen, Produktivitätssteigerungen bei simultaner Kostenreduktion zu realisieren. Darüber hinaus erfordert eine hohe Volatilität der Absatzmärkte in Form sich schnell ändernder Kundenanforderungen eine effiziente Produktion kundenindividueller Produkte. Zur Wahrung langfristiger Wettbewerbsvorteile müssen moderne Fertigungssysteme daher neben einer hohen Produktivität insbesondere eine hohe Flexibilität hinsichtlich Variantenvielfalt, Absatzschwankungen sowie Produktneuanläufen aufweisen.

Der Produktionstyp, bei dem höchste Anforderungen hinsichtlich des aufgezeigten Spannungsfelds zwischen Produktivität und Flexibilität bestehen, ist die variantenreiche Großserienproduktion. Diese ist häufig in der Automobil- bzw. Automobilzulieferindustrie zu finden, und zeichnet sich durch hohe Stückzahlen bei gleichzeitig hoher Variantenvielfalt aus. Ein für diese Anforderungen geeigneter Lösungsansatz sind Flexible Fertigungssysteme (FFS). Ein FFS stellt einen Verbund aus mehreren, ggf. verschiedenartigen, Arbeitsstationen (Bearbeitungs-/Mess-/Montage-/Wascheinrichtungen) dar, welcher die Komplettbearbeitung eines Werkstücks ermöglicht (s. Abb. 1). Die Verkettung der zum Verbund gehörenden Stationen sowie Puffern und Speichern erfolgt mittels eines automatisierten

Materialflusssystem und ist ungerichtet, wodurch beliebige Fertigungsreihenfolgen realisiert werden können und so die Flexibilität des Gesamtsystems gesteigert wird. (Weck/Brecher 2006) Neben der hohen Flexibilität besitzen FFS zudem den Vorteil eines hohen Automatisierungsgrads und somit geringer Personalbedarfe. Dies generiert bei weiterhin steigenden Lohnkosten – insbesondere in Hochlohnländern – weitere Wettbewerbsvorteile durch geringe Personalkosten. (Weck/Brecher 2005)

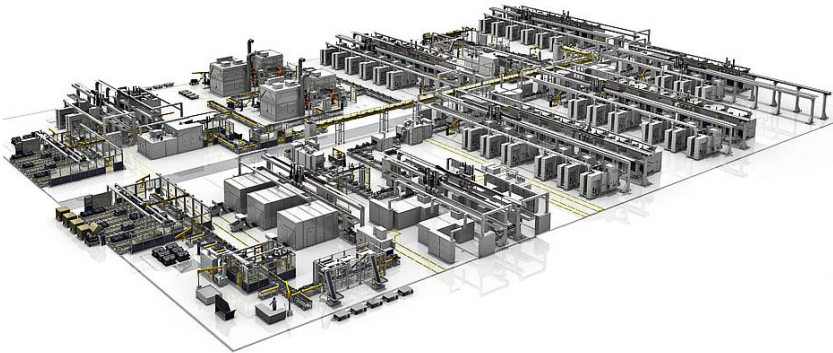


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Flexiblen Fertigungssystems (MAG IAS)

Durch die beschriebene hohe Flexibilität kann in FFS eine simultane Fertigung verschiedener Produktvarianten mit unterschiedlichen Arbeitsinhalten und verschiedenartigen Arbeitsvorgangsfolgen sowie Prozessrouten ermöglicht werden. Darüber hinaus ermöglicht ein FFS durch die Abschaltung einzelner Maschinen eine schnelle Reaktion auf Schwankungen der Kundennachfrage sowie durch die Einlastung von Eilaufträgen eine Realisierung nachfrageorientierter Ziel-Durchlaufzeiten.

Bedingt durch die charakteristische Kombination aus hoher Produktionskapazität und hoher interner Variabilität im Materialfluss sowie im Arbeitsinhalt, sind FFS in der Großserienproduktion durch eine erhöhte Komplexität geprägt. Mit dieser Komplexität geht ein hohes Maß an Intransparenz der Systeme einher. Dadurch können Aufgabengebiete wie das Fehler- und Störungsmanagement seitens des Bedien- und Servicepersonals nicht ausreichend erfüllt werden, da Fehler spät erkannt und Verbesserungsmaßnahmen aufgrund fehlender Informationen über Zusammenhänge falsch priorisiert werden. Bedingt durch diese negativen Auswirkungen der systeminhärenten Komplexität werden Zielwerte hinsichtlich Systemverfügbarkeit und Betriebsstabilität oftmals nicht erreicht, wodurch die Systemproduktivität gering ist. (Weck/Brecher 2005)

Entgegen dem traditionellen Lean-Nordstern ist eine Eingrenzung der Variabilität, um eine Reduzierung der Komplexität zu erreichen, in der variantenreichen Großserienfertigung jedoch nicht zielführend. Die beschriebene Variabilität führt in der Variantenfertigung zur Steigerung des Kundenwertes, wodurch eine Reduzierung wertvernichtend wäre. (Gruß 2010) Stattdessen geht es darum, die vorhandene Variabilität zu erfassen und zu nutzen, sowie Ansätze zu entwickeln, mit deren Hilfe die Variabilität durch das Betriebspersonal zielführend zu beherrschen ist. Gemäß der „Theory of Constraints“ wird die zu erreichende Produktionskapazität durch sogenannte Engpassressourcen beherrscht, deren Stabilisierung den größten Hebel zur Steigerung der Produktivität darstellt (Goldratt/Cox 1984). Damit eine derartige Stabilisierung erfolgen kann, sind bestehende Engpässe jedoch zunächst zu identifizieren und zu analysieren. Die beschriebene Komplexität in FFS verhindert dabei die Anwendung bestehender Methoden. Stattdessen sind datenbasierte Methoden aus dem Themengebiet Data Analytics anzuwenden, deren Basis große Datenbestände bilden, die durch moderne Fertigungssysteme kontinuierlich generiert werden (Kletti/Schumacher 2014).

In diesem Artikel wird eine datengetriebene Methodik beschrieben, die zur Identifikation dynamischer Engpässe in FFS der variantenreichen Großserienproduktion befähigt. Der Anwender dieser Methodik kann somit in einem FFS zu jedem Zeitpunkt die kapazitätsbegrenzende Ressource identifizieren.

## **2 Wertschöpfende Variabilität und dynamische Engpässe in Flexiblen Fertigungssystemen**

Die Forschungsrichtung der „Theory of Constraints“ postuliert die stetige Existenz von Engpässen in realen Produktionssystemen (Goldratt/Cox 1984). Dabei ist zwischen zeitlich unveränderlichen (statischen) und zeitlich veränderlichen (dynamischen) Engpässen zu differenzieren. Während erstere aufgrund gestalterischer Ursachen bestehen, entstehen dynamische Engpässe in direkter Abhängigkeit zur Variabilität. (Hintsches 2012)

### **2.1 Dynamische Engpässe aufgrund wertschöpfender Variabilität**

Gemäß Roser et al. (2015) ist in jedem Gesamtsystem mindestens eine Ressource zu identifizieren, welche die Leistung des Gesamtsystems direkt begrenzt und somit den Engpass darstellt. Diese Engpassdefinition beschreibt das Szenario deterministischer Ankunfts- und Bearbeitungsdaten und daraus resultierender statischer Engpässe. Im Falle eines nicht deterministischen Systems bestehen zudem dynamische Engpässe, die aufgrund systeminterner Variabilität entstehen bzw. bestehen. Die in einem Produktionssystem vorliegende Variabilität ist dabei in einen wertschöpfenden und einen nicht-wertschöpfenden Bestandteil zu untergliedern. Als nicht-wertschöpfend ist jene Variabilität zu bezeichnen, deren Existenz keinen Mehrwert für den Kunden schafft.

Ein typisches Beispiel dieser Variabilität sind zu vermeidende Prozessschwankungen aufgrund von Störungen. Dieser Form der Variabilität steht die bereits genannte wertschöpfende Variabilität gegenüber. Beispiele dieser sind kundenindividuelle Liefertermine oder variantenspezifische Arbeitsvorgangsfolgen. Nicht-wertschöpfende Variabilität innerhalb eines Produktionssystems ist Verschwendung und somit auf ein Minimum zu reduzieren. Wertschöpfende Variabilität ist hingegen zu beherrschen, sodass deren positiven Effekte nutzbar werden.

Die Operationalisierung und Quantifizierung produktionssysteminterner Variabilität ist gemäß Wiegand et al. (2014) durch fünf Variabilitätskriterien möglich:

- Variabilität des Arbeitsinhalts,
- Variabilität der Ziel-Durchlaufzeit,
- Variabilität der Nachfrage,
- Variabilität der Arbeitsvorgangsfolge und
- Variabilität der Prozessroute.

Die Variabilität im Arbeitsinhalt spiegelt ressourcenbezogen die Schwankungen der produktbezogenen Soll-Zykluszeiten wider, während die Variabilität der Ziel-Durchlaufzeit gesamtsystembezogen die Variation der angestrebten Auftragsdurchlaufzeiten beschreibt. Die Kriterien der Variabilität der Arbeitsvorgangsfolge sowie der Prozessroute definieren die Verschiedenheit der Durchführungsreihenfolge der erforderlichen Prozessschritte bzw. die Variation der Ressourcenbelegung innerhalb eines Auftrags. Das fünfte Kriterium der Variabilität der Nachfrage dient abschließend zur Quantifizierung volumenbezogener Auftragschwankungen. (ebd.)

Im Rahmen der Betrachtung von Variabilität in FFS ist zudem zu beachten, dass die beschriebene wertschöpfende Variabilität stets von einem Anteil nicht-wertschöpfender Variabilität überlagert wird. Mögliche Ausprägungen dieser Variabilitätsform sind u.a. Prozessstörungen, natürliche Prozessschwankungen sowie Umwelteinflüsse. Das sich durch diese Überlagerung ergebende hohe und vielschichtige Maß an Variabilität innerhalb von FFS ist ursächlich für eine extreme Engpassdynamik hinsichtlich Lage sowie Ursache.

### **3 Stand der Technik zur Identifikation dynamischer Engpässe**

Aus der in Kap. 2 beschriebenen hohen Engpassdynamik innerhalb von FFS resultiert ein Bedarf an Methoden zur Identifikation dynamischer Engpässe, um auf diese kurzfristig reagieren zu können und so die Effizienz von FFS in der Großserienproduktion zu gewährleisten. In der Literatur existieren verschiedene Methoden, die zur Identifikation von Engpässen in Fertigungssystemen zu nutzen sind. Diese sind in sogenannte Durchschnittswert- sowie Zeitpunktverfahren zu gliedern.

Durchschnittswert-Verfahren legen der Engpassidentifikation eine periodenbezogene Betrachtungsweise zugrunde, indem sie Durchschnittswerte nutzen. Die Methoden dieser Kategorie unterscheiden sich dabei hinsichtlich der zugrunde gelegten Kenngröße. Während Law und Kelton (1991) den Prozess mit der maximalen durchschnittlichen Prozesszeit als Engpass identifizieren, nutzen andere Methoden bspw. durchschnittliche Wartezeiten (Pollett 2000) oder mittlere Zeitanteile der Prozesszustände „Blockage“ und „Starvation“ (Li/Ni 2009). Weitere Methoden nutzen Kombinationen dieser Kennzahlen (Elmasry/McCann 2003). Hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Identifikation von dynamischen Engpässen sind Durchschnittswert-Verfahren jedoch eher als ungeeignet einzustufen. Empirische Untersuchungen zeigen, dass die Anwendung derartiger Verfahren in dynamischen Systemen, wie dem FFS, zu fehlerhaften Aussagen führt. (Roser/Nakano 2015)

Zeitpunkt-Verfahren hingegen basieren nicht auf der Betrachtung einer Zeitperiode. Stattdessen erfolgt die Engpassidentifikation auf Basis eines einzelnen Zeitpunkts (Roser et al. 2002). Durch diese Betrachtungsweise ist es stets möglich, den aktuellen und somit dynamischen Engpass zu identifizieren. Durch eine sich in definierten Zeitabständen wiederholende Anwendung von Zeitpunkt-Verfahren ist somit eine Erfassung der Engpassdynamik ohne Einschränkung möglich. Durch die Zeitabstände der Anwendung kann dabei die Auflösung der Analysen beeinflusst werden. Die folgenden drei Methoden stellen in der Literatur existierende Zeitpunkt-Verfahren dar:

- Active-Period-Method (Roser et al. 2002),
- Echtzeit-Engpassidentifikation mit Engpass-Prädiktion (Wedel et al. 2015),
- Bottleneck Walk (Roser et al. 2015).

Die Active-Period-Method identifiziert dynamische Engpässe basierend auf einer Vorgehensweise, welche die prozessbezogenen Zustandsmeldungen in aktiv und passiv unterteilt. Hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Praxis ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Active-Period-Method eine hohe Datenqualität erfordert, die in Systemen mit hoher Variabilität oftmals nicht gegeben ist. Die Anwendung der Echtzeit-Engpassidentifikation mit Engpass-Prädiktion zur Identifikation dynamischer Engpässe in FFS ist ebenfalls nicht zielführend, da die Methodik weder für stark variable Prozessabläufe noch für hohe Varianzanzahlen geeignet ist.

Als Basis für die in diesem Beitrag beschriebene Methode zur Identifikation dynamischer Engpässe in FFS soll daher die Methode des Bottleneck Walks genutzt werden. Das Verfahren des Bottleneck Walks stellt eine Methodik zur Identifikation dynamischer Engpässe in Fließlinien mit finiten Puffern dar. Gemäß dem Vorgehen einer Multimomentstudie werden zur Identifikation der dynamischen Engpässe mehrere Bottleneck Walks durchgeführt, während die Prozesszustände sowie die Füllstände sämtlicher Puffer zwischen den Prozessen zu erfassen sind.

Diese notierten Informationen sind anschließend zu nutzen, um den zum Zeitpunkt des

Rundgangs aktuellen Engpass zu identifizieren. Die Methodik unterscheidet dazu die vier Prozesszustände Produktion, Störung, Blockiert und Wartend. Bezüglich der Pufferfüllstände wird zwischen den vier Pufferzuständen voll, leer, mehr als  $\frac{2}{3}$  der Maximalkapazität gefüllt und weniger als  $\frac{1}{3}$  der Gesamtkapazität gefüllt differenziert. Gemäß dieser Definitionen ergeben sich für jeden Durchgang Informationen, auf deren Basis nach den folgenden Regeln in einer Prozessdarstellung Pfeile zu setzen sind, die entweder flussauf- oder flussabwärts gerichtet sind. Die so gesetzten Pfeile weisen den aktuellen Engpass aus:

Ein auf den Vorgängerprozess gerichteter Pfeil wird gesetzt, wenn:

- Prozess  $i$  sich im Zustand „wartend“ befindet
- Ein Puffer  $j$  weniger als  $\frac{1}{3}$  gefüllt ist

Ein auf den Nachfolgerprozess gerichteter Pfeil wird gesetzt, wenn:

- Ein Prozess  $i$  sich im Zustand „Blockiert“ befindet
- Ein Puffer  $j$  mehr als  $\frac{2}{3}$  gefüllt ist

Nach Setzen der Pfeile weisen zwei aufeinander zeigende Pfeilspitzen einen Engpass aus. (Roser et al. 2015)

Aufgrund der Einschränkung des Anwendungsbereichs auf gerichteten Fließlinien mit finiten Puffern ist die Methodik des Bottleneck Walks in ihrer ursprünglichen Form nicht zur Identifikation dynamischer Engpässe in FFS geeignet. Gegenüber den anderen beiden Methoden besitzt diese jedoch den Vorteil einer hohen Anwendungssimplizität und -präzision. Daher soll diese Methode im Folgenden die Basis einer Weiterentwicklung bilden, mittels der dynamische Engpässe in FFS zu identifizieren sind und so die Variabilität bzw. Komplexität dieser Systeme zu beherrschen ist.

## **4 Methode zur Identifikation dynamischer Engpässe in FFS mit Manufacturing Data Analytics**

In Bezug auf die Anwendung der Methodik des Bottleneck Walks ist zu berücksichtigen, dass eine manuelle Erfassung der erforderlichen Pufferfüllstände in FFS der Großserienproduktion nicht möglich ist. Ursachen dafür sind zum einen die vielzähligen Maschinen und Puffer, woraus eine erhebliche Rundgangsdauer folgt. Eine anschließende Analyse ist somit erst mit erheblicher Zeitverzögerung durchzuführen, wodurch begründet in der Systemdynamik die Analysegenauigkeit stark sinken würde. Zum anderen ermöglicht die flexible Verkettung eine Einlagerung der Werkstücke in verschiedensten Puffern, wodurch eine eindeutige Zuordnung von Pufferständen und Prozessen nicht möglich ist.

Aufgrund der beschriebenen Restriktionen für die Anwendung der in Kap.3 beschriebenen Methodik des Bottleneck Walks umfasst die in diesem Kapitel beschriebene Methodik eine datenbasierte Erfassung sogenannter virtueller Pufferstände. Darüber hinaus wurde die zur Engpassidentifikation genutzte Pfeilsystematik adaptiert, sodass eine Berücksichtigung der variablen Prozessstrukturen und des ungerichteten Materialflusses in FFS möglich ist.

#### 4.1 Definition und Analyse virtueller Pufferstände

Der Werkstücktransport innerhalb eines FFS erfolgt vollautomatisiert und wird durch autonome Applikationen gesteuert. Ein zentrales Fertigungsleitsystem übernimmt dabei die Vernetzung der einzelnen Applikationen und kontrolliert deren Funktionalität. (Weck/Brecher 2005) In modernen FFS erfolgt die Datenhaltung in Form einer an das Fertigungsleitsystem angeschlossenen zentralen Datenbank. Aus dieser können kontinuierlich und dezentral Informationen hinsichtlich Status, Position, Vorgänger- und Nachfolgeprozess jedes Werkstücks abgerufen werden. Die entwickelte Methodik importiert diese Informationen aus einer relationalen Datenbank in ein Datenmodell. Dort erfolgt deren Verarbeitung sowie Nutzung zur Ermittlung prozessbezogener virtueller Pufferstände.

Während in Fließlinien mit finiten Puffern die Kapazität und der Füllstand eines Puffers eindeutig durch die Anzahl an Pufferplätzen bzw. Teilen im Puffer definiert werden, ist diese Eindeutigkeit in einem FFS mit flexiblem Pufferkonzept nicht gegeben. In einem FFS kann ein Prozess  $P_i$  vielzählige Vorgängerprozesse und somit verschiedene vorgelagerte physische Puffer besitzen. Somit kann dem Prozess  $P_i$  weder ein Pufferfüllstand noch eine Pufferkapazität zugeordnet werden, sodass die Anwendung der Pfeilsystematik des Bottleneck Walks nicht möglich ist. Aufgrund dieser Situation ist es erforderlich, für jeden Prozess  $P_i$  einen sogenannten virtuellen Puffer mit einem Pufferfüllstand  $S_i$  zu generieren (s. Abb. 2). Dies erfolgt datenbasiert mittels eines Datenanalysemodells, welches jeweils zu Beginn eines Prozesses  $P_j$  für jeden Prozess  $P_i$  den virtuellen Pufferfüllstand  $S_i$  als Summe aller Werkstücke erfasst, deren Nachfolgeprozess der Prozess  $P_i$  ist. Diese hochfrequente Engpassidentifikation stellt sicher, dass keiner der teilweise minutenweise auftretenden Engpasswechsel unbemerkt bleibt. Die Funktionalität dieses Datenmodells ist dabei nicht von der physischen Position des Werkstücks abhängig, da eine Überschreibung der Information des Nachfolgeprozesses erst erfolgt, wenn das Werkstück den Prozess  $P_i$  verlässt.

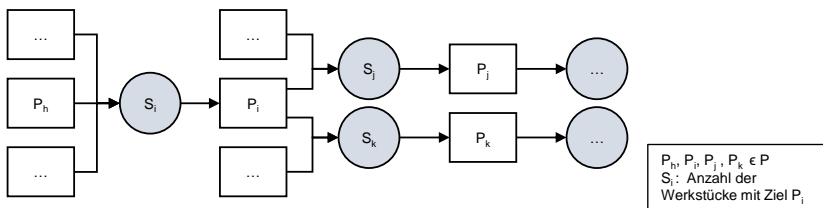


Abbildung 2: Virtuelle Puffersystematik in FFS

Neben den aktuellen Pufferfüllständen der virtuellen Puffer ist es zur Engpassidentifikation mittels der Pfeilsystematik erforderlich, sowohl die minimalen ( $S_{i,\min}$ ) als auch die maximalen Pufferfüllstände ( $S_{i,\max}$ ) der virtuellen Puffer zu bestimmen (s. Kap. 3). Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese in FFS zeitlich variabel sind. Beispielsweise kann der Prozess  $P_i$  in einen Wartezustand übergehen, obwohl im virtuellen Puffer  $S_i$  noch Werkstücke vorhanden sind. Dies ist dadurch zu begründen, dass der Speicherort der Werkstücke ggf. physisch weit entfernt vom Prozess  $P_i$  ist und die flexible Verkettung das Werkstück daher nicht verzögerungsfrei bereitstellen kann. Daher ist  $S_{i,\min}$  in Abhängigkeit von der aktuellen Auslastung des Verkettungssystems und den Speicherorten der Werkstücke variabel. Analog dazu ist die Variabilität der Kenngröße  $S_{i,\max}$  zu erläutern. In Abhängigkeit von der aktuellen Pufferbelegung und der Auslastung der flexiblen Verkettung können die Maximalkapazitäten  $S_{i,\max}$  der virtuellen Puffer zeitlich variieren.

Aufgrund der hohen Komplexität dieser uneingeschränkten Variabilität wird im Folgenden die Flexibilität der Grenzpufferfüllstände durch zwei Annahmen begrenzt:

- (1) Die Geschwindigkeit der flexiblen Verkettung wird als unendlich definiert, wodurch Verzögerungen durch einen zu langsamen Werkstücktransport vermieden werden. Daraus folgt  $S_{i,\min}=0$ .

Diese Annahme ist als realistisch zu betrachten, wenn die Förderleistung des flexiblen Verkettungssystems eines FFS die Produktionsleistung der wertschöpfenden Systemkomponenten deutlich übersteigt. Da es sich hierbei um eine gängige Prämisse im Rahmen der Planung von Fertigungssystemen handelt, ist diese Annahme zulässig.

- (2) Jedem Prozess  $P_i$  ist eine vorhandene Speicherkapazität im FFS statisch zugeordnet. Daraus folgt  $S_{i,\max}=\text{const}$ .

Entsprechend dieser Annahme sind in der relationalen Datenbank den verschiedenen virtuellen Puffern fixe Maximalkapazitäten zugeordnet. Dabei entspricht  $S_{i,\max}$  dem maximalen im Zeitverlauf aufgetretenen Pufferfüllstand  $S_i$ . Zur Identifikation dynamischer Engpässe werden diese aus der relationalen Datenbank in das Datenanalysemodell importiert. Dadurch ist auch bei Veränderungen der maximalen Pufferkapazitäten durch wechselnde Pufferplatzbelegungen o.ä. die Funktionalität der Methodik zur Identifikation dynamischer Engpässe sichergestellt.

Der oben beschriebene Datenimport aus der relationalen Datenbank in das Datenanalysemodell erfolgt in tabellarischer Form und wird bei Erfassung einer Werkstückzustandsänderung ausgelöst. Beim Datenimport werden zum einen Zustandsdaten der Werkstücke (WS-Nummer, Ist-Prozess, Prozessesstartzeitpunkt und -endzeitpunkt, Nachfolgeprozess) in das Analysemodell transferiert. Zum anderen werden die gemäß obiger Beschreibung ermittelten Kapazitätsmaxima  $S_{i,\max}$  der virtuellen Puffer an das Datenanalysemodell übergeben.



## 4.2 Systematik zur Identifikation dynamischer Engpässe auf Basis virtueller Pufferstände

In FFS besitzt jeder Prozess mindestens einen Vorgängerprozess sowie mindestens einen Nachfolgerprozess. Im Rahmen dieser Definition sind sowohl die Rohteilquelle als auch die Fertigteilensinke als Prozesse mit unerschöpflicher Kapazität zu definieren. Auf Basis dieser Prämissen stellt ein FFS ein geschlossenes System dar, in dem eine adaptierte Form der Regeln des Bottleneck Walks zur Identifikation dynamischer Engpässe (i.A.a. Roser et al. 2015) genutzt werden kann.

In einem ersten Schritt der Methodik sind mittels des beschriebenen Datenanalysemodells (s. Kap.4.1) die virtuellen Pufferstände  $S_i$  vor jedem Prozess  $P_i$  für einen definierten Zeitpunkt  $t_i$  zu bestimmen. Für die Prozesse, deren Vorgängerprozess die Rohteilquelle ist, gilt aufgrund der zuvor getroffenen Annahmen  $S_i = S_{i,max}$ . Der virtuelle Pufferstand der Fertigteilensinke ist zudem als  $S_F = S_{F,min}$  definiert. In Anlehnung an die in Kap. 3 angeführten Regeln gemäß Roser et al. (2015) ergibt sich somit als Regelwerk für die Identifikation dynamischer Engpässe:

- $S_i < 1/3 \cdot S_{i,max}$  → Pfeil auf Vorgängerprozess, Engpass flussaufwärts
- $S_i > 2/3 \cdot S_{i,max}$  → Pfeil auf Nachfolgerprozess, Engpass flussabwärts
- $1/3 \cdot S_{i,max} < S_i < 2/3 \cdot S_{i,max}$  → kein Pfeil, da keine Aussage möglich

Nach Setzen der Pfeile ist ein Prozess analog zur Vorgehensweise gemäß Roser et al. (2015) als Engpass zu identifizieren, wenn zwei Pfeilspitzen auf diesen zeigen.

Die entwickelte Methodik zur Identifikation dynamischer Engpässe soll im Folgenden anhand eines vereinfachten Beispiels illustriert werden. In einem FFS werden zwei Produktvarianten A und B gefertigt (s. Abb. 3). Die variantenabhängigen Prozessfolgen basieren dabei auf den in Arbeitsplänen hinterlegten Arbeitsvorgangsfolgen. Der Input des FFS sind zwei Rohteile  $R_A$  und  $R_B$  mit differierenden Prozessfolgen. Während  $R_A$  die Prozesse  $P_1, P_2, P_4$  und  $P_5$  durchläuft, wird das Rohteil  $R_B$  in den Prozessen  $P_1, P_3, P_4$  und  $P_5$  bearbeitet. Nach abgeschlossener Bearbeitung verlassen die Produkte als Fertigteile  $F_A$  und  $F_B$  das FFS. Die Pufferkenngrößen  $S_i, S_{i,min}$  sowie  $S_{i,max}$  zum Zeitpunkt  $t_i$  sind Abb. 3 zu entnehmen. Aus diesen Kenngrößen wird ersichtlich, dass die virtuellen Puffer  $S_1, S_2, S_3$  sowie  $S_4$  zu mehr als  $2/3$  der jeweiligen Maximalkapazität  $S_{i,max}$  gefüllt sind, sodass die zugehörigen Pfeile auf den jeweiligen Nachfolgerprozess auszurichten sind.  $S_5$  und  $S_F$  sind hingegen weniger als  $1/3$  ihrer jeweiligen Maximalkapazität gefüllt, wodurch eine Ausrichtung der

zugehörigen Pfeile auf den jeweiligen Vorgängerprozess bewirkt wird. Wie in Abb. 3 ersichtlich, zeigen somit zwei Pfeilspitzen auf  $P_4$  sodass dieser nach definiertem Regelwerk als Engpass identifiziert wird.

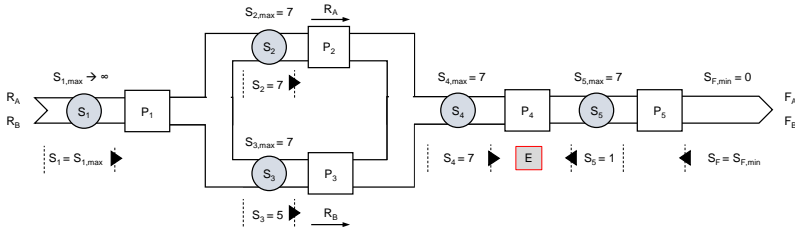


Abbildung 3: Identifikation dynamischer Engpässe auf Basis virtueller Pufferstände

### 4.3 Regelergänzungen zur Berücksichtigung variabler Prozessstrukturen in FFS

Trotz der hohen Eindeutigkeit des Regelwerks der Methodik des Bottleneck Walks in Fließlinien, kann die Anwendung der Pfeilsystematik in FFS mehrdeutige Ergebnisse liefern. Dies ist durch verschiedene produktspezifische Prozessfolgen zu begründen, die in FFS durch die flexible ungerichtete Verkettung realisiert werden können. Die dadurch entstehenden Prozessverzweigungen und -schleifen bewirken, dass ein Prozess mehr als einen Vorgängerprozess besitzen kann, wodurch Situationen entstehen, in denen die Identifikation eines dynamischen Engpasses mittels des bestehenden Regelwerks nicht möglich ist. Durch diese Schwäche in der Anwendbarkeit der Methodik des Bottleneck Walks in FFS ist eine Erweiterung des bestehenden Regelwerks erforderlich.

Gemäß des in Kap. 4.2 definierten Regelwerks ist ein Prozess als Engpass zu identifizieren, wenn ausschließlich entgegengerichtete Pfeilspitzen auf den entsprechenden Prozess zeigen. Im Falle verschiedener produktbezogener Prozessrouten entstehen jedoch ggf. Situationen, in denen neben zwei entgegengerichteten Pfeilspitzen ebenfalls mindestens ein Pfeilspitze auf den entsprechenden Prozess weist. In dieser Situation ist das Ergebnis der Methodik nicht eindeutig und kann daher nicht zur Identifikation dynamischer Engpässe angewendet werden.

Ein so identifizierter Prozess ist zum Zeitpunkt der Betrachtung  $t_i$  nicht als Engpass zu identifizieren, da dieser nicht die Ausbringung des Gesamtsystems begrenzt. Allerdings weist die beschriebene Anordnung der Pfeile daraufhin, dass im Falle ausbleibender Gegenmaßnahmen der betrachtete Prozess möglicherweise zum zukünftigen Zeitpunkt  $t_{i+x}$  zum Engpass wird. Auf Basis dieser Schlussfolgerungen lassen sich Prozesse, die wie beschrieben eine mehrdeutige Pfeilanordnung aufweisen, als potentielle bzw. Prio 2-Engpässe identifizieren. Das in Kap. 4.2 definierte Regelwerk ist somit durch folgende Regeln zu erweitern:

- Ein Prozess, auf den ausschließlich entgegengerichtete Pfeilspitzen weisen, ist ein Prio 1-Engpass
- Ein Prozess, auf den mindestens 2 entgegengerichtete Pfeilspitzen und ein Pfeilschaft weisen, ist ein Prio 2-Engpass

Die Wirksamkeit der definierten Ergänzung des Regelwerks wird mittels des folgenden Beispiels illustriert. Dabei sollen identische Randbedingungen hinsichtlich der Maximal- und Minimalkapazitäten der Prozesse, Rohteilquelle sowie Fertigteilensinke gelten wie in Kap. 4.2. In dem so definierten Ausschnitt eines Fertigungssystems existieren kombinatorisch bereits 16 Möglichkeiten der Pfeilanordnung. Von diesen sind 50% als eindeutige und 50% als mehrdeutige Lösungen zu charakterisieren. Von den mehrdeutigen Lösungen entfallen weitere sechs aufgrund von Analogien und Symmetrien, sodass lediglich zwei Sonderfälle hinsichtlich der Identifikation dynamischer Engpässe eine weiterführende Interpretation erfordern (s. Abb 4/Abb. 5).

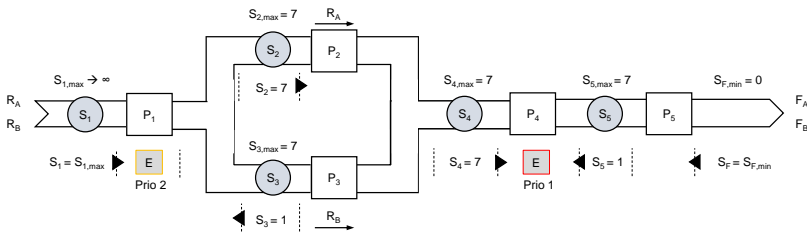


Abbildung 4: Identifikation dynamischer Engpässe – Sonderfall 1

Im ersten der beiden Sonderfälle liegt der Füllstand der virtuellen Puffer  $S_1$ ,  $S_2$  sowie  $S_4$  oberhalb des Grenzwertes von  $2/3 \cdot S_{1,max}$  bzw.  $2/3 \cdot S_{4,max}$ , sodass jeweils ein auf den Nachfolgeprozess weisender Pfeil zu setzen ist. Der Füllstand der Puffer  $S_3$  und  $S_5$  liegt hingegen unterhalb des Grenzwertes von  $1/3 \cdot S_{3,max}$  bzw.  $1/3 \cdot S_{5,max}$ , wodurch das Einsetzen eines auf den jeweiligen Vorgängerprozess weisenden Pfeils bewirkt wird. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, wird somit gemäß des erweiterten Regelwerks der Prozess  $P_4$  als Prio 1-Engpass identifiziert. Der Prozess  $P_1$  ist hingegen lediglich als Prio 2-Engpass zu charakterisieren, da neben den entgegengerichteten Pfeilspitzen der Puffer  $S_1$  und  $S_3$  ebenfalls der Pfeilschaft des Puffers  $S_2$  auf den Prozess  $P_1$  weist.

Als Ursache für die Identifikation des Prozesses  $P_1$  als Prio 2-Engpass sind folgend mögliche Ursachen aufzuführen:

- (1) Der Produktmix beinhaltet in Relation zur Fertigungsleistung von  $P_3$  einen zu geringen Anteil der Produktvariante B
- (2)  $P_2$  wird aufgrund einer zu geringen Produktionsleistung von  $P_4$  blockiert
- (3)  $P_3$  wird aufgrund einer zu geringen Produktionsleistung von  $P_1$  nicht ausreichend mit Produkten versorgt
- (4) Die Produktionsleistung von  $P_2$  reicht nicht aus, um die von  $P_1$  kommenden Produkte zu bearbeiten

In den Fällen (1) und (2) wird die Leistung des Gesamtsystems durch den Teilefluss der Produktvariante A dominiert. Eine Optimierung der Gesamtsystemleistung ist in diesem Szenario daher insbesondere durch eine Maximierung der Produktionsleistung des Prozesses  $P_4$  erreichbar. Während die Fälle (1) und (2) ebenfalls in statischen Systemen auftreten, sind die Szenarien (3) und (4) ausschließlich in dynamischen Systemen wie FFS vorzufinden. Analog zu den Szenarien (1) und (2) ist  $P_4$  der Prozess mit der durchschnittlich geringsten Produktionsleistung und somit aufgrund der Systemkonfiguration der statische Engpass. Das Szenario (3) tritt hingegen ein, wenn bei den Pufferfüllständen  $S_2 = S_{2,max}$  und  $S_3 < 1/3 \cdot S_{3,max}$  der Prozess  $P_1$  gestört ist und daher eine geringere Produktionsleistung aufweist als der Prozess  $P_4$ . In diesem Szenario ist der als Prio 1-Engpass zu identifizierende Prozess abhängig von der Ausfalldauer des Prozesses  $P_1$ . Dieser weist einen Grenzwert auf, bei dessen Überschreitung der mittels Pfeilsystematik zu identifizierende Prio 1-Engpass von  $P_4$  zu  $P_1$  übergeht. Dieser Übergang erfolgt in Form einer Driftphase, während die Füllstände der virtuellen Puffer zwischen  $P_1$  und  $P_4$  kontinuierlich sinken. Erst bei ausbleibender Teileversorgung des Prozesses  $P_4$  ist die Driftphase beendet und  $P_1$  wird zum Prio 1-Engpass des Gesamtsystems. In Szenario (4) tritt analog zu Szenario (3) eine Driftphase ein. Vor und während dieser stellt der Prozess  $P_4$  den Prio 1-Engpass des Gesamtsystems dar. Nach Beendigung der Driftphase, d.h. bei ausbleibender Teileversorgung des Prozesses  $P_4$ , wechselt der Prio 1-Engpass zum Prozess  $P_2$ .

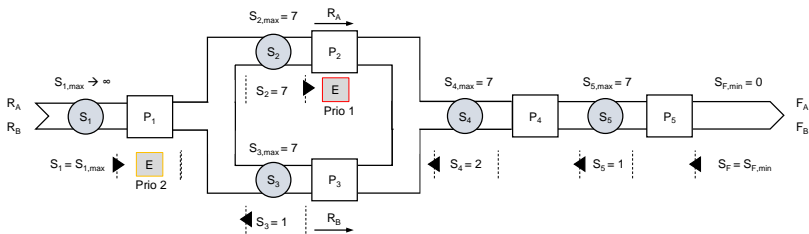


Abbildung 5: Identifikation dynamischer Engpässe – Sonderfall 2

Der Sonderfall 2 weist eine hohe Ähnlichkeit zu Sonderfall 1 auf (s. Abb. 5). Lediglich der Pufferfüllstand des virtuellen Puffers vor Prozess  $P_4$  ist verändert zu  $S_4 < 1/3 \cdot S_{4,\max}$ . Wie in Abb. 5 ersichtlich, führt die Anwendung der Regeln erneut zu keiner eindeutigen Lösung. Entgegen dem Sonderfall 1 liegt hier der Prio 1-Engpass des Gesamtsystems in Prozess  $P_2$  somit in der Verzweigung. Analog zum Sonderfall 1 wird zudem der Prozess  $P_1$  als Prio 2-Engpass des Systems identifiziert, da hier erneut eine Prozesszeitendifferenz zwischen den beiden Prozessen  $P_2$  und  $P_3$  vorliegt. Aufgrund der veränderten Position des Prio 1-Engpasses sind jedoch verglichen mit Sonderfall 1 für die bestehende Mehrdeutigkeit veränderte Gründe zu identifizieren.

- (1) Der Produktmix beinhaltet in Relation zur Fertigungsleistung von  $P_3$  einen zu geringen Anteil der Produktvariante B
- (2) Die Fertigungsleistung von  $P_2$  ist zu gering, sodass Prozess  $P_1$  blockiert wird
- (3) Die Fertigungsleistung von  $P_1$  ist zu gering, sodass die Werkstückversorgung von  $P_3$  abreißt

In den Szenarien (1) und (2) ist der Prozess  $P_2$  der Prio 1-Engpass des Gesamtsystems, da die Produktionsleistung des Gesamtsystems durch den Teilefluss der Produktvariante A begrenzt wird. Das Engpassverhalten im Szenario (3) ist hingegen analog zum gleichnamigen Szenario in Sonderfall 1 dadurch gekennzeichnet, dass der Engpass ein dynamisches Verhalten aufweist. Der gestaltungsbedingte statische Engpass  $P_2$  ist zum Betrachtungszeitpunkt der Prio 1-Engpass des Gesamtsystems. Der Prozess  $P_2$  wird hingegen aufgrund einer Reduzierung der prozessspezifischen Produktionsleistung (Störung, etc.) nach Beendigung einer Driftphase zum Prio 1-Engpass und begrenzt die Produktionsleistung des Gesamtsystems.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz flexibler Fertigungssysteme in der Großserienproduktion zielt auf eine optimale Positionierung im Spannungsfeld zwischen Flexibilität und Ausbringung ab. Durch das Charakteristikum einer hohen Flexibilität ist diese Organisationsform der Fertigung jedoch ebenfalls durch ein gestiegenes Maß an systeminterner Variabilität geprägt. Begründet in dieser Variabilität weisen Engpässe in FFS i.d.R. ein stark dynamisches Verhalten auf, weshalb die Anwendung statischer Verfahren zur Engpassidentifikation nicht zielführend ist. Basierend auf diesen Erkenntnissen stellt dieser Beitrag eine Methodik vor, die eine zuverlässige Identifikation dynamischer Engpässe auf Basis eines Datenanalysemodells ermöglicht und so das Bedienpersonal zur Beherrschung der systemischen Komplexität befähigt.

In der Literatur sind verschiedene Methoden zur Identifikation dynamischer Engpässe bekannt. Verglichen mit diesen weist die vorgestellte Methodik die Vorteile einer hohen Präzision, einer einfachen Anwendbarkeit sowie einer kleinen erforderlichen Datenbasis auf. Letzteres erlaubt dem Anwender dieser Methodik bereits in der Hochlaufphase einer Anlage eine Identifikation dynamischer Engpässe mit hoher Ergebnisgüte und geringem Datenerhebungs- und Berechnungsaufwand.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der getroffenen Prämisse eines unendlichen schnellen Verkettungssystems. In der Realität erfolgt die Auslegung von FFS jedoch i.d.R. in einer Art, dass diese Annahme zulässig ist. Allerdings ist im Hinblick auf die Entwicklung eines vollständigen Ansatzes die Methodik derart weiter zu entwickeln, dass ebenfalls eine Identifikation der nicht-wertschöpfenden Systembereiche möglich ist. Des Weiteren ist die Validierung der Methodik um multidirektionale Verzweigungen sowie Prozessschleifen zu erweitern, da eine ausschließliche Betrachtung bidirektionaler Verzweigungen die Komplexität von FFS nicht vollständig erfasst. Letztlich ist die Prämisse der definierten Kapazitätsgrenzwerte der virtuellen Puffer aufzuheben, da diese das Charakteristikum einer variablen Pufferallokation moderner FFS nicht wirklichkeitsnah abbildet. Mittels Verfahren des Maschinellen Lernens ist die Erweiterung des bestehenden Datenanalysemodells zur automatisierten Identifikation variabler Pufferkapazitätsgrenzen zu erzielen.

Wenngleich die beschriebene Methodik auf verschiedenen Annahmen basiert und keine vollständige Identifikationsmethodik darstellt, sind Anwender dieser dennoch in der Lage, engpassbedingte Prozessstillstände zu identifizieren und zu priorisieren. Dies erhöht die systeminterne Transparenz von FFS und befähigt das Bedienpersonal zur Komplexitätsbeherrschung, wodurch Effizienzsteigerungen realisierbar sind. Im Hinblick auf den Prozess des Manufacturing Data Analytics befasst sich der vorliegende Beitrag insbesondere mit den Prozessschritten der Datenakquisition und -vorverarbeitung. Laufende Arbeiten nutzen die vorgestellten Ergebnisse und bearbeiten die Themengebiete der Prognosemodellerstellung und -anwendung.

## Literatur

- Elmasry, G.F., McCann, C.J., 2003.  
Bottleneck discovery in large-scale networks based on the expected value of per-hop delay. In: Proceedings of IEEE Military Communications Conference, 2003(MILCOM 2003), Vol. 1, S. 405-410.
- Goldratt, E., Cox, J., 1984.  
The Goal - A Process of Ongoing Improvement. National Productivity Institute.
- Gruß, R., 2010.  
Schlanke Unikatfertigung. Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production. In: Specht, D. (Hrsg.): Beiträge zur Produktionswirtschaft. Springer Gabler.
- Hintsches, A., 2012.  
Dynamische Kapazitätssteuerung bei kundenindividueller Auftragsproduktion in der stahlverarbeitenden Industrie. Springer Gabler.
- Kletti, J., Schumacher, J., 2014.  
Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Springer.
- Law, A. M., Kelton, W. D., 1991.  
Simulation Modeling & Analysis, 5. Aufl.. McGraw Hill.
- Li, Q., Ni, J., 2009.  
Data Driven bottleneck detection of manufacturing systems. In: International Journal of Production Research, Vol. 47, Nr. 18, S. 5019-5036.
- Nyhuis, P., Wiendahl, H., 2012.  
Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer.
- Pollett, P. K., 2000.  
Modeling Congestion in Closed Queueing Networks. In: International Transactions in Operations Research, Vol. 7, Nr. 4, S. 319-330.
- Roser, C., Nakano, M., Tanaka, M., 2002.  
Detecting Shifting Bottlenecks. In: International Symposium on Scheduling, S. 59-62, Hamatsu (JPN).

- Roser, C., Lorentzen, K., Deuse, J., 2015.  
Reliable Shop Floor Bottleneck Detection for Flow Lines through Process and Inventory Observations: The Bottleneck Walk. In: *Procedia CIRP*, Vol. 19, S. 63-68.
- Roser, C., Nakano, M., 2015.  
A Quantitative Comparison of Bottleneck Detection Methods in Manufacturing Systems with Particular Consideration for Shifting Bottlenecks. In: Umeda, S., Nakano, M., Mizuyama, H., Hibino, H., Kiritsis, D., von Cieminski, G. *Proceedings of the IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Part II*, S. 273-281. Springer
- Weck, M., Brecher, C., 2005.  
*Werkzeugmaschinen 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, 6. Aufl.. Springer.
- Weck, M., Brecher, C., 2006.  
*Werkzeugmaschinen 4. Automatisierung von Maschinen und Anlagen*, 6. Aufl.. Springer.
- Wedel, M., Hacht, M., Hieber, R., Metternich, J., Abele, E., 2015.  
Real-time Bottleneck Detection and Prediction to Prioritize Fault Repair in Inter-linked Production Lines. In: *Procedia CIRP*, Vol. 37, S. 140-145.
- Wiegand, M., Konrad, B., Jalali Sousanabady, R., Willats, P., Deuse, J., 2014.  
Quantifizierung von Variabilität durch Big Data Technologien. In: *Productivity Management*, Vol. 19, Nr. 5, S. 35-38.