

# Produktionssteuerung von komplexen Materialflüssen

## Berücksichtigung von Wechselwirkungseffekten zur Erreichung einer hohen logistischen Leistungsfähigkeit

Melissa Seitz, Alexander Mütze, Peter Nyhuis

*In nach dem Werkstattprinzip organisierten Produktionsbereichen bestehen zumeist komplexe Materialflussbeziehungen zwischen den einzelnen Arbeitssystemen. Aus PPS-Entscheidungen können daher neben den Auswirkungen auf die direkt adressierten Arbeitssysteme auch unerwartete Wechselwirkungseffekte bezogen auf den gesamten Produktionsbereich resultieren. Diese wirken sich auf die logistische Leistungsfähigkeit aus und sollten folglich bei der Gestaltung und Konfiguration der PPS berücksichtigt werden.*

### 1. Einleitung

Der globalen Wettbewerbsdynamik und den wachsenden Ansprüchen ihrer Kunden begegnen produzierende Unternehmen zunehmend mit einer Differenzierung ihres Leistungsspektrums [1]. Aus dieser strategischen Ausrichtung resultiert die Anforderung, Produkte in einer hohen Variantenvielfalt sowie mit einem wachsenden Individualisierungsgrad am Markt anzubieten [2]. Neben der Produktqualität und dem Preis ist dabei insbesondere auch die Logistikleistung ein wichtiges und kaufentscheidendes Kriterium und stellt somit einen strategischen Wettbewerbsfaktor dar [3–5]. Hinsichtlich der hohen Variantenvielfalt stehen produzierende Unternehmen folglich zunehmend vor der Herausforderung, für eine wettbewerbsfähige Positionierung am Markt sowohl geringe Herstellkosten als auch kurze Durchlaufzeiten sowie eine hohe Termintreue zu realisieren [6]. Für eine wirtschaftliche und logistikeffiziente Produktion hochindividueller und variantenreicher Produkte sind zumeist Produktionssysteme gefordert, in denen Prozessschritte mit unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren in variierenden Abfolgen flexibel kombiniert werden können [7, 8]. Dies spiegelt sich in einer zunehmenden Prozesskomplexität in den Produktionsbereichen wieder, die es unternehmensseitig zu beherrschen gilt [1].

### 2. Der Produktionsbereich als komplexes System

In der industriellen Fertigung können Produktionsbereiche nach verschiedenen Prinzipien organisiert werden [9]. Ein Produktionsbereich wird in diesem Kontext als „organisatorisch selbstständige Anordnung von Arbeitssystemen zum Zwecke der Herstellung von Erzeugnissen“ definiert [10]. Für Produktionsbereiche, in denen aufgrund der Verschiedenartigkeit von Produkten und Varianten ein Auftragspektrum mit stark variierenden Materialflüssen abgewickelt werden soll, hat sich vor allem die Organisation nach dem Werkstattprinzip bewährt [11, 12]. Gemäß verschiedener Studien ist diese insbesondere bei zunehmender Produktindividualität die in der Praxis am häufigsten vertretene Organisationsform [7, 12, 13].

Das charakteristische Merkmal einer Werkstattfertigung ist die räumliche Anordnung der Arbeitssysteme nach dem Verrichtungsprinzip und somit gemäß ihrer Bearbeitungsverfahren [9]. Die Varianz der Produkte hinsichtlich der Art und Abfolge verschiedener Fertigungsschritte führt dabei zu ungerichteten und verzweigten Materialflüssen [14]. Die Komplexität des Materialflusses eines nach dem Werkstattprinzip organisierten Produktionsbereichs wird dabei durch die Art und Anzahl der Arbeitssysteme (Varietät) sowie die aus den Arbeitsplänen resultierende Anzahl der Vorgänger und

Nachfolger der einzelnen Arbeitssysteme und die Anzahl der Rückflüsse bestimmt (Konnektivität) [15, 16]. In Abgrenzung zur Linienfertigung sind dabei insbesondere auch gegenseitige Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Arbeitssystemen möglich. Mit der beschriebenen Komplexität geht zudem oftmals eine Intransparenz einher, die als wesentlicher Nachteil für die Auftragsabwicklung bei Anwendung des Werkstattprinzips gesehen wird [17].

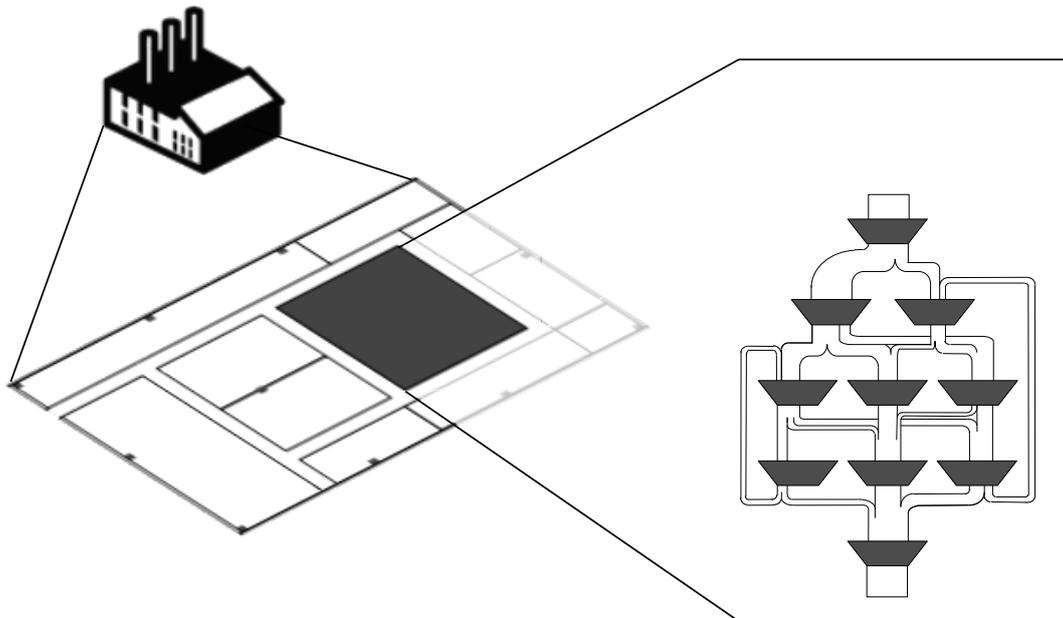


Abbildung 1 - Exemplarischer komplexer Materialfluss eines Produktionsbereichs

Die logistische Leistungsfähigkeit eines Produktionsbereichs wird durch zum Teil konfliktäre logistische Zielgrößen bestimmt. Aufgrund der Leistungsanforderungen der Kunden sollen die Durchlaufzeiten möglichst gering sein, da diese sich insbesondere bei einer reinen Auftragsfertigung unmittelbar auf die Lieferzeiten auswirken. Neben kurzen Lieferzeiten äußert sich eine gute logistische Leistungsfähigkeit des Weiteren in einer hohen Termintreue. Zur Erreichung niedriger Kosten auf der Herstellerseite sollten die Bestände an den einzelnen Arbeitssystemen möglichst gering, jedoch die Auslastung möglichst hoch sein. [9]

Die wettbewerbstaugliche Positionierung in dem zuvor beschriebenen Spannungsfeld durch eine geschickte Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist eine der Kernaufgaben des Produktionsmanagements [18]. Im Umgang mit komplexen Systemen neigen Menschen jedoch häufig zu systematischen Fehlentscheidungen, da oftmals nicht alle Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen bekannt sind [19]. Folglich ist es von höchster Relevanz, die Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen eines Fertigungsbereichs möglichst genau zu kennen.

### 3. Grundlagen der Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung (auch: Eigenfertigungssteuerung oder Fertigungssteuerung) ist eine Hauptaufgabe der Produktionsplanung und -steuerung produzierender Unternehmen und beeinflusst maßgeblich den unternehmerischen Erfolg [16, 20]. Das übergeordnete Ziel der Produktionssteuerung ist es dabei, den aus der Produktionsplanung resultierenden Produktionsplan auch bei unvermeidlichen Änderungen im Produktionsprozess (z. B. Störungen oder Reihenfolgevertauschungen) möglichst erfolgreich zu realisieren [21]. Eine gute Produktionssteuerung

gleicht somit Abweichungen und ggf. auch Planungsfehler aus, wohingegen eine schlechte Produktionssteuerung selbst bei einer guten Planung zu einer schlechten logistischen Zielerreichung der Produktion führt [16]. Die Produktionssteuerung kann sich dabei sowohl auf einen einzelnen Arbeitsplatz, Fertigungsgruppen sowie unterschiedlich abgegrenzte Fertigungsbereiche beziehen [22]. Im Folgenden wird der Fokus auf die Steuerung der Auftragsabwicklung in Produktionsbereichen gelegt.

Abbildung 2 zeigt auf der linken Seite die drei Aufgaben der Produktionssteuerung Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung in Anlehnung an LÖDDING. Jede Aufgabe hat einen direkten Einfluss auf eine Stellgröße und beeinflusst somit die Ist-Situation in einem Produktionsbereich. Die Bildung der Differenz bzw. durch den Abgleich von zwei Stellgrößen ergeben sich Regelgrößen, die wiederum Einfluss auf die logistischen Zielgrößen der Produktion haben. Hierbei können die Stellgrößen entweder aus den Aufgaben der Produktionssteuerung resultieren oder als Planungswerte aus der Produktionsplanung stammen. [16]

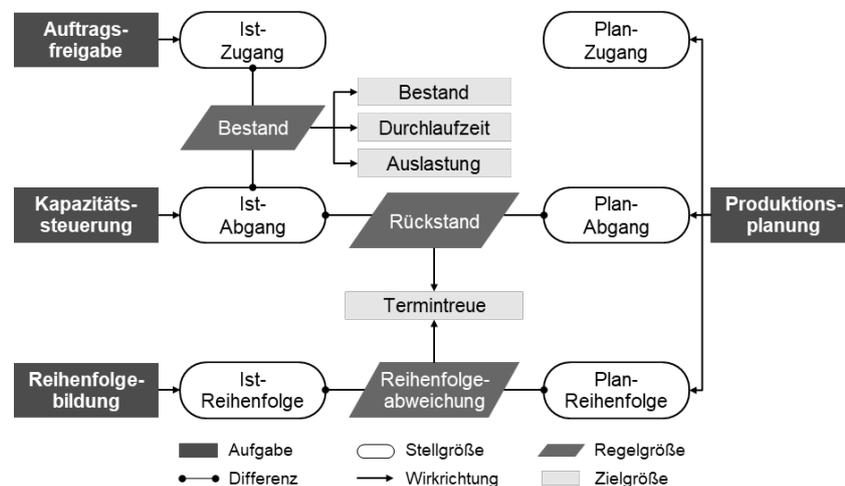


Abbildung 2 - Aufgaben der Produktionssteuerung (in Anlehnung an [16])

Im Rahmen der Produktionssteuerungsaufgabe Auftragsfreigabe werden Produktionsaufträge physisch für die Bearbeitung freigegeben, wodurch der Ist-Zugang zu einem Produktionsbereich und somit die zugehende Art, Anzahl und Reihenfolge der zu produzierenden Produkte gesteuert wird. Zur Erfüllung dieser Aufgabe wird in der Regel auf einen Pool von auf die Freigabe wartenden Aufträgen zurückgegriffen. Die Verfahren der Auftragsfreigabe unterteilen sich in die sofortige, die terminorientierte und die bestandsorientierte Auftragsfreigabe, wobei bei letzterem zudem zwischen zentralen und dezentralen Verfahren unterschieden werden kann. Durch den Einfluss auf den Ist-Zugang hat die Auftragsfreigabe Einfluss auf die Regelgröße Bestand, wodurch die Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung beeinflusst werden, die wiederum in einem Zielkonflikt zueinanderstehen. [16, 20]

Die Produktionssteuerungsaufgabe Kapazitätssteuerung hat zur Aufgabe kurzfristig die zur Abarbeitung der freigegebenen Produktionsaufträge eingesetzten Kapazitäten zu steuern, wodurch der Ist-Abgang bestimmt wird. Im Rahmen der Kapazitätssteuerung ist der Entscheidungsspielraum zur Abstimmung von Kapazitätsangebot und -nachfrage im Vergleich zur Regelung im Rahmen der Produktionsplanung jedoch deutlich geringer. Die Steuerung kann starr, planorientiert, rückstandsorientiert, bestandsregelnd oder leistungsmaximierend erfolgen. Aus der Beeinflussung der Stellgröße Ist-Abgang resultiert der Einfluss der Kapazitätssteuerung auf die Regelgrößen Bestand und Rückstand, welche wiederum die logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und

Termintreue beeinflussen. Neben dem Zielkonflikt dieser logistischen Zielgrößen, müssen im Rahmen der Kapazitätssteuerung auch die anfallenden Kosten für die genutzte Kapazitätsflexibilität betrachtet werden. [16, 20]

Im Rahmen der Produktionssteuerungsaufgabe Reihenfolgebildung werden die sich vor einem Arbeitssystem eines Produktionsbereichs in einer Warteschlange befindlichen Produktionsaufträge in eine priorisierte Abfolge gebracht, wodurch die Ist-Reihenfolge festgelegt wird. Zur Priorisierung der Produktionsaufträge existiert eine Vielzahl von Verfahren, wie beispielsweise die natürliche Reihenfolgebildung nach dem First-In-First-Out-Prinzip sowie terminorientierte oder rüstaufwandsorientierte Verfahren. Durch die Einflussnahme auf die Ist-Reihenfolge wirkt die Reihenfolgebildung direkt auf die Regelgröße Reihenfolgeabweichung und somit auf die logistische Zielgröße Termintreue. Zudem kann durch rüstaufwandsorientierte Verfahren auch ein Einfluss auf den Ist-Abgang eines Arbeitssystems bestehen, da durch solche Verfahren Rüstzeiten reduzieren oder sogar vollständig eingespart werden können, wodurch der Ist-Abgang gemessen in Anzahl abgearbeiteter Aufträge steigt. Allerdings haben solche Verfahren zur Folge, dass die Priorisierung der Aufträge die geplanten Termine und somit die geplante Reihenfolge oftmals gänzlich außer Acht lassen, wodurch die Termintreue negativ beeinflusst wird. Die Reihenfolgebildung bewegt sich daher im Zielkonflikt zwischen Leistung und Termintreue. [16, 20, 23, 24]

Wie die vorangegangenen Ausführungen und Abbildung 2 zeigen, wirken über die jeweiligen Stellgrößen die verschiedenen Aufgaben der Produktionssteuerung zusammen auf die logistischen Zielgrößen eines Produktionsbereichs, sodass für eine ganzheitliche Gestaltung und Konfiguration stets alle drei Aufgaben aufeinander abgestimmt und ihre Wechselwirkungen betrachtet werden müssen. Insbesondere die Konfiguration der Produktionssteuerung (Auswahl von Verfahren und Festlegung von Verfahrensparametern) stellt daher eine große praktische Herausforderung und Relevanz dar. [16]

#### **4. Herausforderungen bei komplexen Materialflüssen**

Die zuvor beschriebenen Aufgaben der Produktionsteuerung beeinflussen die logistische Leistungsfähigkeit eines Produktionsbereichs [16]. Im Wesentlichen kann hierbei zwischen einer Wirkung auf den Bereich bzw. dessen Systemgrenze sowie auf dessen einzelne Elemente unterschieden werden. So bezieht sich beispielsweise die bestandsorientierte Auftragsfreigabe nach dem klassischen ConWIP-Verfahren auf die Anzahl der Aufträge im Produktionsbereich und somit auf den Bereich als Gesamtsystem, während die Festlegung einer Auftragsreihenfolgeregel für ein Arbeitssystem als spezifisches Element des Produktionsbereichs erfolgt. An beiden Angriffspunkten Systemgrenze sowie einzelne Arbeitssysteme hat die Produktionssteuerung einen direkten Einfluss auf die logistischen Zielgrößen.

In einem Produktionsbereich können sich die einzelnen Arbeitssysteme gegenseitig in ihrem Systemverhalten beeinflussen. In Abhängigkeit des Produktionsprogramms und der Materialflussbeziehungen wirken Entscheidungen der Produktionssteuerung folglich nicht nur primär auf die direkt adressierten Elemente, sondern können indirekt ebenfalls das Systemverhalten verknüpfter Elemente beeinflussen. Je komplexer die Materialflussbeziehungen, desto vielfältiger sind die Auftretens- und Überlagerungsmöglichkeiten solcher indirekter Einflüsse. Mit zunehmender Komplexität geht zudem oftmals eine steigende Intransparenz einher, sodass ungeplante und schwer vorhersehbare Effekte auf die logistische Leistungsfähigkeit einzelner Elemente sowie des Gesamtsystems induziert werden können. Dies soll im Folgenden am Beispiel der Kapazitätssteuerung sowie der Reihenfolgebildung andiskutiert werden.

#### **4.1 Beispiel Kapazitätssteuerung**

In einem Produktionsbereich sollte die mittlere Leistung der Arbeitssysteme grundsätzlich deren mittlerer Belastung entsprechen. Aufgrund von Planungsfehlern, Störungen oder weiterer äußerer Einflüsse können jedoch über den Zeitverlauf Abweichungen zwischen Belastung und Leistung auftreten. Mögliche Folgen dessen sind ungeplanter Bestandsaufbau und Rückstand an einzelnen Arbeitssystemen im Produktionsbereich. Zur Erreichung der Terminziele und zum Abbau der erhöhten, durchlaufzeitwirksamen Bestände können Maßnahmen der Kapazitätssteuerung zum Einsatz kommen. Bei der Kapazitätssteuerung wird dabei im Allgemeinen dem Engpassprinzip gefolgt. Dies besagt, dass eine vorübergehende Kapazitätsanpassung an einem Arbeitssystem stets auf eine mögliche Kapazitätserhöhung am Engpass abgestimmt sein sollte. Anderenfalls würde beispielsweise eine Kapazitätserhöhung an einem Arbeitssystem, welches einem bereits vollausgelasteten Engpasssystem vorgelagert ist, gegebenenfalls nicht die gewünschten Effekte auf die Leistung und die Termintreue des gesamten Produktionsbereichs erzielen. [16] Wird dagegen nur die Kapazität am Engpasssystem erhöht, können sich in Folge des erhöhten Abgangs und der somit erhöhten Belastung der nachgelagerten Arbeitssysteme die Bestände an ebendiese verlagern [25]. Hierdurch können neue Engpässe sichtbar werden, welche wiederum die gewünschte Steigerung der Logistikleistung bezogen auf den gesamten Produktionsbereich begrenzen.

Insbesondere bei komplexen Materialflüssen ist aufgrund der verzweigten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen die strikte Unterscheidung in Arbeitssysteme vor dem Engpass und nach dem Engpass jedoch zumeist nicht eindeutig möglich. Anhand des lediglich begrenzt komplexen Beispiels in Abbildung 3 wird in diesem Zusammenhang exemplarisch die Wirkung der Kapazitätserhöhung an einem Arbeitssystem auf die logistischen Zielgrößen des Produktionsbereichs betrachtet.

Im gewählten Beispiel stellt das Arbeitssystem (AS) 3 den initialen Durchsatzengpass dar, dessen Ist-Abgang durch eine Kapazitätsanpassung erhöht werden soll. Das Ziel dieser Maßnahme ist neben der Erhöhung der Leistung insbesondere bei bereits aufgebautem Rückstand die Verbesserung der Termintreue – sowohl für das Engpasssystem sowie aufgrund der direkten Korrelation auch für den gesamten Produktionsbereich [10, 16].

Die Kapazitätserhöhung am Engpasssystem AS 3 bewirkt in Abhängigkeit der Aufträge in der Warteschlange direkt eine Erhöhung des Ist-Abgangs und somit eine Leistungssteigerung am betreffenden Arbeitssystem. In Folge dessen erhöht sich in Abhängigkeit des Produktionsprogramms auch die Belastung und somit der Ist-Zugang der Nachfolgesysteme AS 4 und AS 5.

Sofern die Auslastung von AS 4 und AS 5 vor der Kapazitätsanpassung an AS 3 kleiner als 100% war, erhöht sich aufgrund der gestiegenen Belastung auch hier temporär der Ist-Abgang. Folglich kann auch an den Folgesystemen eine indirekt bewirkte Leistungssteigerung eintreten. Ist aber bedingt durch die Kapazitätsstruktur die maximal mögliche Leistung dieser Systeme geringer als die erhöhte Belastung, stauen sich die Aufträge vor diesen Arbeitssystemen und es entsteht gegebenenfalls temporär neuer Engpass. Geschieht dies beispielsweise an AS 4, entspricht die am ursprünglichen Engpass erzielte Leistungssteigerung nicht der Leistungssteigerung des Produktionsbereichs bezogen auf die fertiggestellten Aufträge. Auch können die zunächst erzielten positiven Effekte auf die Termintreue aufgrund des reduzierten Rückstands an AS 3 durch indirekte Wirkungen, wie beispielsweise den Aufbau von Rückstand an AS 4 wieder verringert werden. Zusätzliche Wartezeiten können die Durchlaufzeit am betreffenden Arbeitssystem sowie die Auftragsdurchlaufzeit durch den Bereich entsprechend verlängern.

Darüber hinaus würde ein veränderter Ist-Abgang des AS 4 wiederum die Belastung von AS 1 und somit indirekt gegebenenfalls auch wiederum die von AS 3 beeinflussen. Um die direkten sowie indirekten Auswirkung einzelner Kapazitätsanpassungen auf die Logistikleistung des Produktionsbereichs zu bestimmen, müssen folglich die Effekte auf die Leistung und Belastung aller Arbeitssysteme in

Abhängigkeit des Produktionsprogramms, der Materialflussbeziehungen und der Kapazitätsstruktur des Produktionsbereichs mitberücksichtigt werden.

Über die Wechselwirkungen zwischen den Arbeitssystemen hinaus lässt sich zudem festhalten, dass die verschiedenen Aufgaben der Produktionssteuerung gemeinsam auf den Produktionsbereich und dessen Elemente einwirken, wodurch ebenfalls indirekte Einflüsse oder Überlagerungseffekte auftreten können. Beispielsweise kann die Beeinflussung des Bestandsniveaus in Folge kapazitätssteuernder Maßnahmen Auswirkungen auf das Ausmaß der Wirkung einzelner Regeln zur Reihenfolgebildung haben.

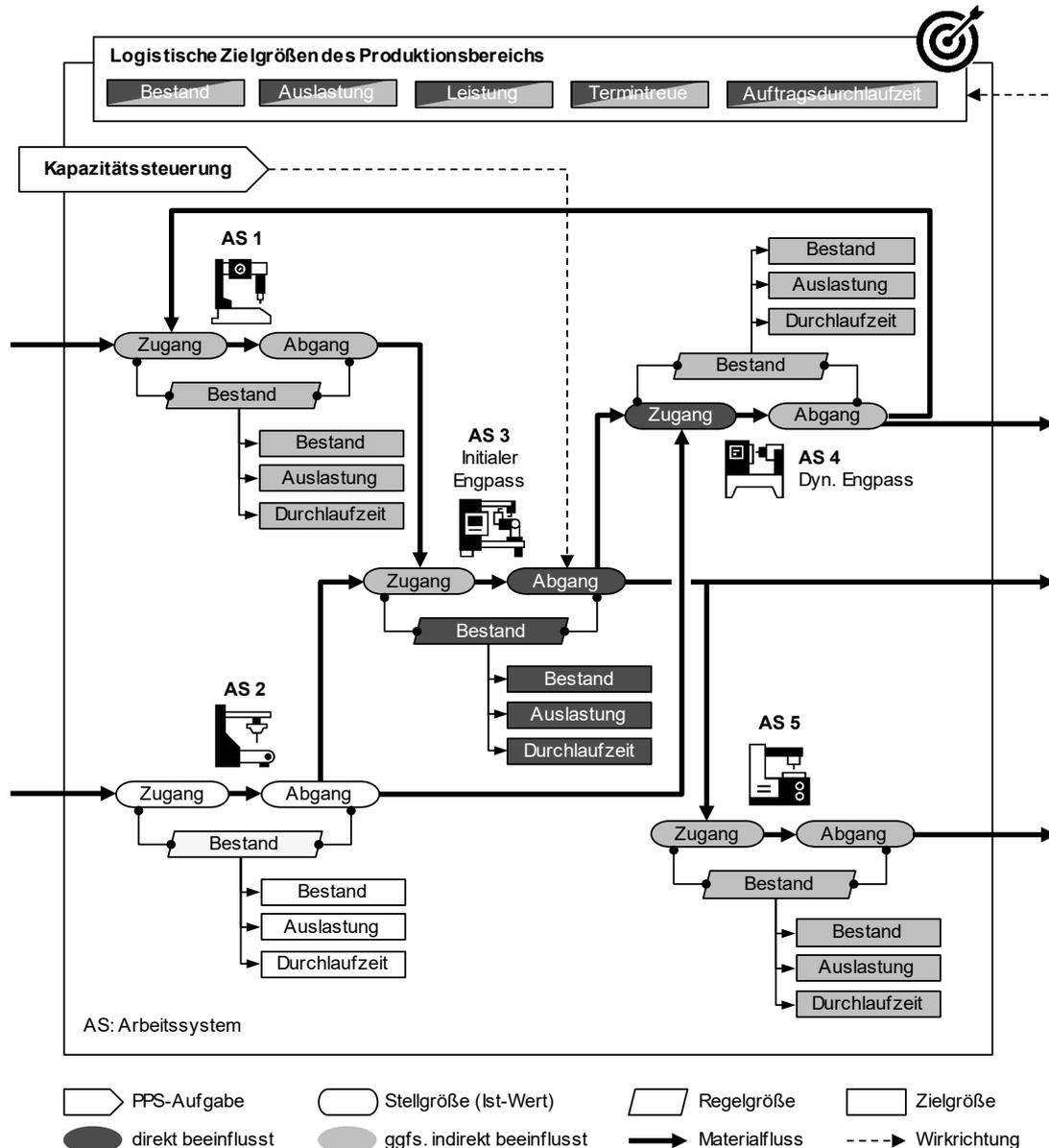


Abbildung 3 - Direkte und mögliche indirekte Beeinflussung der logistischen Zielgrößen eines Produktionsbereichs durch die Produktionssteuerungsaufgabe Kapazitätssteuerung

#### 4.2 Beispiel Reihenfolgebildung

Im Gegensatz zu den Produktionssteuerungsaufgaben Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung wirkt die Reihenfolgebildung immer ausschließlich auf das Produktionsbereichselement Arbeitssystem und priorisiert wie bereits beschrieben die Produktionsaufträge in dessen Warteschlange [16, 20].

Durch den Einfluss der Reihenfolgebildung auf die Reihenfolgeabweichung an einem Arbeitssystem wird die logistische Zielgröße Termintreue eines Arbeitssystems direkt beeinflusst. Betrachtet man jedoch einen Produktionsbereich, so ergibt sich die Termintreue für diesen aus dem Rückstand des Produktionsbereichs sowie der Reihenfolgeabweichung der Produktionsaufträge beim Verlassen des Produktionsbereichs. Je nach Komplexität und Aufbau des Materialflusses im Produktionsbereich, verlassen die Produktionsaufträge die Systemgrenze über mehrere Arbeitssysteme, wodurch die Reihenfolgebildung an diesen einen direkten Einfluss auf die Termintreue des Produktionsbereichs hat.

Zur Beschreibung der Auswirkung der Reihenfolgeregel First-In-First-Out (FIFO), terminorientierter Reihenfolgeregel sowie der aus terminlicher Sicht zufälligen Reihenfolgebildung (z.B. rüstaufwandsoptimiert) auf die Termintreue wurden am Institut für Fabrikanlagen und Logistik logistische Partialmodelle entwickelt [23, 24, 26, 27]. Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Wirkmodell für die rüstaufwandsoptimierte Reihenfolgebildung in Anlehnung an MAYER UND NYHUIS. Allen entwickelten Partialmodellen ist gemein, dass die Wirkung der jeweiligen Reihenfolgeregel auf die reihenfolgebedingte Terminabweichungsstreuung im Abgang in Abhängigkeit des Bestandes des Arbeitssystems und somit auch in Abhängigkeit der Durchlaufzeit sowie der reihenfolgebedingten Terminabweichungsstreuung im Zugang berechnet werden kann. Die reihenfolgebedingte Terminabweichungsstreuung beziffert hierbei das Streuungsmaß der Reihenfolgeabweichung aus Terminalsicht und ist in die logistische Zielgröße Termintreue überführbar. Hierdurch lässt sich für jeden Wert der reihenfolgebedingten Terminabweichungsstreuung im Zugang ( $TAZ_{rf,s}$ ) eine Kurve einzeichnen, mit Hilfe derer je nach Bestandsniveau die reihenfolgebedingte Terminabweichungsstreuung im Abgang abgelesen werden kann. Des Weiteren sind die verschiedenen Wirkmodelle über die Koppelgröße reihenfolgebedingte Terminabweichungsstreuung miteinander verknüpfbar. Zur genaueren mathematischen Herleitung der einzelnen Modelle sei an dieser Stelle auf [23, 24, 27] verwiesen.

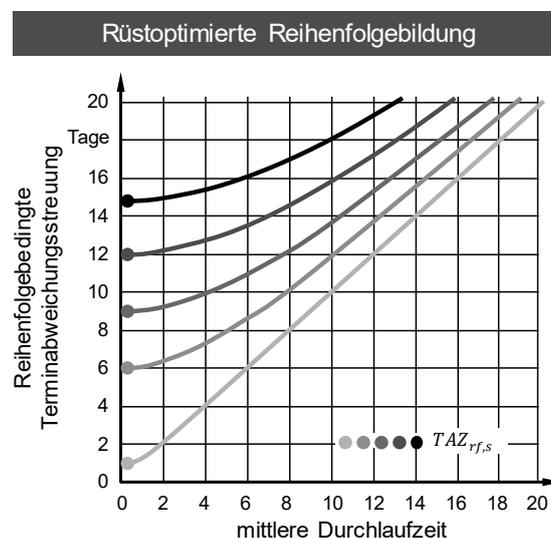


Abbildung 4 - Kennlinien zur modellbasierten Berechnung der reihenfolgebedingten Terminabweichungsstreuung im Abgang eines Arbeitssystems bei rüstoptimaler Reihenfolgebildung (in Anlehnung an [24, 27])

Zur Herleitung der Wirkung der Produktionssteuerungsaufgabe Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen eines Produktionsbereichs muss die festgelegte Reihenfolgestrategie für die einzelnen Arbeitssysteme unter Berücksichtigung der jeweiligen Bestandsniveaus zu Grunde gelegt werden. Im Falle eines linearen und gerichteten Materialflusses würde dies bedeuten, dass auf Basis der Zugangsreihenfolgeabweichung am ersten Arbeitssystem im Produktionsbereich die Streuung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Abgang dieses Arbeitssystems modellgestützt berechnet werden kann, die wiederum als Eingangsgröße für das folgende Arbeitssystem dient. Aufgrund des

linearen Materialflusses lässt sich so die reihenfolgebedingte Terminabweichung bis zum letzten Arbeitssystem durchrechnen.

Eine Übertragung dieses Verfahrens auf einen Produktionsbereich mit komplexen Materialflüssen stellt sich aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung der Arbeitssysteme und einer hieraus folgenden Wirkkaskade jedoch als komplizierter dar. So zeigt Abbildung 5 einen exemplarisch sehr vereinfachten Produktionsbereich, der lediglich aus drei Arbeitssystemen besteht und von zwei unterschiedlichen Produktgruppen durchlaufen wird. Produktgruppe 1 durchläuft den Bereich in der Reihenfolge (AS 1 - AS 2 - AS 3), während Produktgruppe 2 den Bereich in der Reihenfolge (AS 2 - AS 1 - AS 3) durchläuft. Die sich hieraus ergebenden Materialflussbeziehungen sind im grauen Kasten oben rechts dargestellt. Aus dem skizzierten Materialfluss folgt, dass AS 1 sowohl Vorgänger wie auch Nachfolger von AS 2 ist. So ergibt sich die Reihenfolgeabweichung im Zugang von AS 1 aus der Reihenfolgeabweichung im Zugang durch den externen Zufluss von Produktgruppe 1 sowie den Zugang von Produktgruppe 2, welche zuvor von AS2 bearbeitet wurden. Durch die Wahl einer Reihenfolgeregel beeinflusst AS 1 über seinen Abgang jedoch nicht nur den Zugang zu AS 3 (Produktgruppe 2), sondern auch den Zugang zu AS 2 (Produktgruppe 1), wodurch sich wiederum Änderungen in der Reihenfolgeabweichung von AS 2 für die Produktgruppen 1 & 2 ergeben. Diese wirkt sich wiederum zum Teil auf AS 1 aus und kann somit zu einer Veränderung der Reihenfolgeabweichung im Abgang von AS 1 führen. Die Reihenfolgebildung am AS 1 kann folglich indirekt auf den eigenen Zugang wirken.

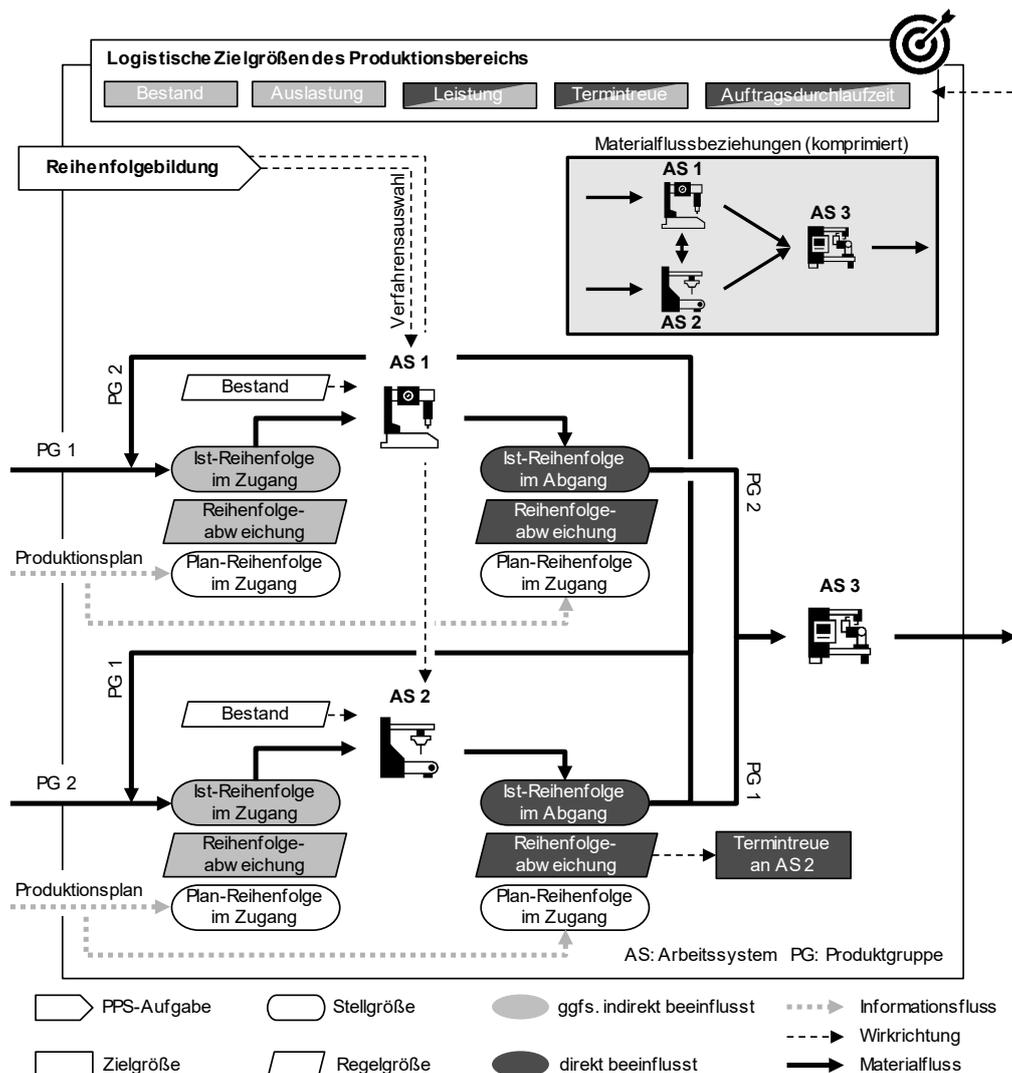


Abbildung 5 - Direkte und mögliche indirekte Beeinflussung der logistischen Zielgrößen eines Produktionsbereichs durch die Produktionssteuerungsaufgabe Reihenfolgebildung

Es folgt, dass zur Berechnung der Wirkung der Reihenfolgebildung auf die Termintreue eines komplexen Produktionsbereichs, aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Arbeitssysteme ein Durchrechnen mittels der Verknüpfung der Partialmodelle nicht einfach möglich ist und weitere Untersuchungen notwendig sind. Hierbei müssen weitere Faktoren, wie die Anzahl der Arbeitssysteme sowie deren Materialflussbeziehungen berücksichtigt und ihr Einfluss auf die Wirkung der verschiedenen Reihenfolgeregeln beziffert werden.

Des Weiteren ist in dem Beispiel nicht berücksichtigt worden, dass eine rüstoptimierende Reihenfolgebildung auch zu einer Leistungserhöhung an einem Arbeitssystem führt, welche bei unveränderter Kapazität eine Erhöhung des Ist-Abgangs sowie die Reduzierung des Bestandes und der Durchlaufzeit nach sich zieht [24]. Die Reihenfolgebildung kann somit ähnliche Effekte, wie zuvor für die Kapazitätssteuerung ausgeführt wurde, bewirken und hat somit ebenfalls indirekte Auswirkungen auf logistische Zielgrößen wie die Auslastung und den Bestand.

## **5. Fazit und Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf**

Analog zu den ausgewählten Beispielen lassen sich verschiedene weitere Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Arbeitssystemen eines Produktionsbereichs in Zusammenhang mit den Aufgaben der Produktionssteuerung identifizieren. Zahlreiche einzelne Wirkzusammenhänge lassen sich bereits mittels logistischer Modelle quantitativ beschreiben [28, 29]. Der Fokus liegt hierbei jedoch vermehrt auf der Analyse der einzelnen Arbeitssysteme [10]. Durch die Kopplung ausgewählter Partialmodelle können zwar Analysen entlang der innerbetrieblichen Lieferketten erfolgen [30], im Hinblick auf einen Produktionsbereich bietet die zusätzliche Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen einzelnen, durch verzweigte und komplexe Materialflüssen verbundenen Arbeitssystemen sowie weiterer Einflussfaktoren wie beispielsweise der PPS-Konfiguration oder des Produktionsprogramms weiteres Potenzial.

Insbesondere die indirekten Einflüsse ebenso wie die Überlagerung verschiedener Effekte gilt es quantitativ zu beschreiben. Das Wissen, welche Effekte in welchem Ausmaß wo und wann im Gesamtsystem Produktionsbereich auftreten und welche resultierende Beeinflussung der logistischen Leistungsfähigkeit auftritt, stellt eine grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche Produktionssteuerung in Bereichen mit komplexen Materialflüssen dar. Im Hinblick auf die logistische Leistungsfähigkeit des Produktionsbereichs ermöglicht die Kenntnis dieser quantitativen Wirkzusammenhänge beispielsweise die gezielte Kombination einzelner Steuerungsentscheidungen anstelle einer iterativen Nachregelung mit zeitlichem Verzug und somit eine ganzheitliche Gestaltung und Konfiguration der PPS. Aktuelle und zukünftige Forschungsarbeiten am Institut für Fabrikanlagen und Logistik widmen sich daher verstärkt der quantitativen Modellierung von Wirkzusammenhängen in Produktionsbereichen mit verzweigten oder komplexen Materialflüssen. Hierfür sollen sowohl logistische Modelle als auch Ansätze aus dem Bereich des Data Mining und Machine Learning zum Einsatz kommen.

## **Danksagung**

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung ihrer Forschungstätigkeiten im Rahmen des Transferprojekts „Logistikorientierte Reihenfolgestrategien für mehrstufige Produktionen“.

## Autoren

Dipl.-Ing. Melissa Seitz, geb. 1989, studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Produktionstechnik an der Leibniz Universität Hannover. Seit ihrem Diplomabschluss im Jahr 2014 ist sie dort als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) tätig. Ihre Arbeits- und Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Produktionsmanagements.

Alexander Mütze, M.Sc., geb. 1994, studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit den Schwerpunkten Produktionswirtschaft und Produktionstechnik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2018 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe Produktionsmanagement am Institut für Fabrikanlagen und Logistik.

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis, geb. 1957, studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und arbeitete im Anschluss als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA). Nach seiner Promotion zum Dr.-Ing. wurde er habilitiert, bevor er als Führungskraft im Bereich Supply Chain Management in der Elektronik- und Maschinenbaubranche tätig war. Seit 2003 leitet er das Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Leibniz Universität.

## Stichwörter

Produktionsplanung und -steuerung, Logistische Leistungsfähigkeit, Produktionsbereich, Komplexität, Materialfluss

## ENGLISCH

Production Control of Complex Material Flows

Considering Interaction Effects to Achieve a High Logistics Performance

*In production areas organized in accordance to the workshop principle, there are usually complex material flow relationships between the individual work systems. PPC decisions can therefore result not only in effects on directly addressed work systems but also in unexpected interaction effects on the entire production area. These affect the logistical performance and should therefore be taken into account when designing and configuring PPC.*

## Literatur

1. Lindemann, U. ; Baumberger, G.: Individualisierte Produkte. In: Lindemann, U; Reichwald; Reichwald, R; Zäh, M. (Hrsg.): Individualisierte Produkte — Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg 2006, S. 7–16.
2. Lindemann, U. ; Reichwald, R. ; Zäh, M.: Einführung. In: Lindemann, U; Reichwald; Reichwald, R; Zäh, M. (Hrsg.): Individualisierte Produkte — Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg 2006, S. 1–6.
3. Hon, K.K.B.: Performance and Evaluation of Manufacturing Systems. **CIRP Annals** 54 (2005) 2, S. 139–154.
4. Soepenber, G. ; Land, M. ; Gaalman, G.J.C.: A framework for diagnosing the delivery reliability performance of make-to-order companies. **International Journal of Production Research** 50 (2012) 19, S. 5491–5507.

5. Handfield, R. ; Straube, F. ; Pfohl, H.-C. ; Wieland, A.: Embracing global logistics complexity to drive market advantage: Trends and strategies in logistics and supply chain management. DVV Media Group, Hamburg 2013.
6. Schuh, G; Stich, V. (Hrsg.): Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. FIR an der RWTH Aachen, Aachen 2013.
7. Niehues, M.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung. Dissertation, München 2016.
8. Feldmann, K. ; Slama, S.: Highly flexible Assembly – Scope and Justification. **CIRP Annals** 50 (2001) 2, S. 489–498.
9. Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Hanser, München 2010.
10. Schneider, M.: Logistische Fertigungsbereichskennlinien. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2004. Nr. 647: Fortschrittberichte VDI, Düsseldorf 2004.
11. Thebud, N.: Fertigungsnahe industrielle Dienstleistungen. Rationalisierungspotenzial für die Produktionsorganisation in KMU. Zugl.: Rostock, Univ., Diss., 2007: Betriebswirtschaft. Shaker, Aachen 2007.
12. Letmathe, P.: Flexible Standardisierung. Ein dezentrales Produktionsmanagement-Konzept für kleine und mittlere Unternehmen. Band 297: Neue betriebswirtschaftliche Forschung. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden 2002.
13. Seitz, M. ; Härtel, L. ; Hübner, M. ; Merkel, L. ; be Isa, J. ; Engehausen, F. ; Meluzov, N. ; Rost, R. ; Schmidhuber, M. ; Sauermann, F. ; Hünnekes, P.: PPS-Report 2017/18. Studienergebnisse. Band 2018: Berichte aus dem IFA. TEWISS, Garbsen 2018.
14. Günther, H.-O. ; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik: Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2005.
15. Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 1982.
16. Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration: VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2016.
17. Haberlandt, K.: Engpaßorientierte Werkstattfertigung. **PPS Management** (1999) 4, S. 17–22.
18. Schmidt, M. ; Nyhuis, P.: Produktionsplanung und -steuerung. B 3.3. In: Arnold, D; Isermann, H; Kuhn, A; Tempelmeier, H; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2008, S. 323–343.
19. Dörner, D.: Die Logik des Mislingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 1989.
20. Schmidt, M.: Beeinflussung logistischer Zielgrößen in der unternehmensinternen Lieferkette durch die Produktionsplanung und -steuerung und das Produktionscontrolling. Habilitationsschrift, Hannover 2018.
21. Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Hanser, München 1997.

22. Schuh, G. ; Schürmeyer, M. ; Hering, N.: Funktionen. Produktionssteuerung. In: Schuh, G; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. Springer, Berlin 2012, S. 219–220.
23. Bertsch, S.: Modellbasierte Berechnung der Termintreue. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2014. Band 2015,2: Berichte aus dem IFA. PZH-Verl., Garbsen 2015.
24. Mayer, J.: Quantitative Modellierung logistischer Auswirkungen von rüstopimalen Auftragsreihenfolgen an Arbeitssystemen. Dissertation. 2018, Band 1: Berichte aus dem IFA 2018.
25. Becker, T.: Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2018.
26. Bertsch, S. ; Felix, C. ; Nyhuis, P.: Modeling the Sequence Dependent Lateness of a Single Workstation. **AMR** 1140 (2016), S. 443–448.
27. Mayer, J. ; Nyhuis, P.: Describing the influence of set-up optimised sequencing on output lateness of workstations. **Production Planning & Control** 28 (2017) 10, S. 791–801.
28. Nyhuis, P. ; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2012.
29. Wiendahl, H.-P. ; Nyhuis, P. ; Bertsch, S; Grigutsch, Michael: Controlling in Lieferketten. In: Schuh, G; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 2. Evolution der PPS. Springer, Berlin, Heidelberg 2012, S. 11–59.
30. Fastabend, H.: Kennliniengestützte Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1997. Band 452: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik. VDI Verl., Düsseldorf 1997.