

Simulation als Methode zur Konzipierung vernetzter, getakteter Montagesysteme für variantenreiche Produkte

Simulation-based design of netted and synchronized assembly systems for versatile production

Mathias Kühn¹
Christian Fritzsche¹
Thorsten Schmidt¹
Michael Völker¹
Markus Rehm²

¹Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden
²Koenig & Bauer AG

Die Montage von Produkten in getakteten Fließstraßen als Alternative zu ortsfesten Varianten führt in der Regel zur Verbesserung der logistischen Zielerfüllung. Das volle Potential dieser Organisationsart wird jedoch weitgehend nur für standardisierte Produkte mit hohen Stückzahlen erschlossen. Hindernisse zur Produktion variantenreicher Großserien mit volatilen Arbeitsinhalten in einer Fließstraße bestehen vor allem in der Beherrschung der Komplexität in Bezug auf dazu erforderliche flexible Arbeitszeitmodelle, optimierte Produktreihenfolgen sowie operative Taktzeitvariationen. Sollen mehrere Fließstraßen mit differenzierten Produktionsparametern gekoppelt werden, steigt der Anspruch noch einmal erheblich. Bei der Konzipierung und Erprobung geeigneter Organisationsmodelle auf Basis diverser Produktionsszenarien kann auf den Einsatz der Simulationstechnik nicht verzichtet werden.

[Schlüsselwörter: Getaktete Fließstraße, Synchronisierung, Simulationsbasierte Konzipierung, Regel-Meta-Modell]

Assembling products in flow lines confirms to improve the logistical objectives compared to stationary assembly principles. Especially companies producing standardized products in bulk benefit from that production layout. However, a large product variety is causing problems in implementing that flow principle, mainly due to the involved complexity (e.g. handling the sequencing of bulks). The problem is further increased if various parallel flow lines with multiple source-sink relations need to be synchronized. For design and testing of suitable organization models based on various production scenarios, simulation is indispensable.

[Keywords: assembly lines, synchronization, simulation-based design, meta-model]

1 AUSGANGSSITUATION UND ZIELSTELLUNG

Die wachsende Nachfrage nach individuellen Produkten in allen Lebensbereichen wirkt sich auch komplexitätstreibend auf die Entwicklung der dafür erforderlichen Produktionstechniken aus. Die Herausforderung besteht darin, eine größere Variantenanzahl einhergehend mit kleineren Losgrößen und kürzeren Produktlebenszyklen ohne signifikante Mehrkosten zu realisieren [BMBF13; SS12]. Speziell in der Montage komplexer Maschinen und Anlagen, die aus mehreren variantenreichen Großbaugruppen bestehen und einen hohen manuellen Aufwand erfordern, ist ein effizienter Ressourceneinsatz wettbewerbsentscheidend [SRVC09].

Üblicherweise erfolgt die Montage dieser Produkte als Standplatzmontage. Eine Transformation hin zur getakteten Fließmontage kann die Produktion effizienter gestalten. Ziel ist dabei die Verbesserung logistischer Leistungsgrößen. Konzepte zur getakteten Fließmontage einzelner Großbaugruppen wurden bereits erforscht und erprobt (Abbildung 1). Die sequentielle Vernetzung einzelner Fließstraßen mit differenzierten Quelle-Senke-Beziehungen und verschiedenen Taktzeiten sind Herausforderungen, die jedoch bei bekannten Konzepten nicht berücksichtigt werden. Eine weitere Herausforderung resultiert aus der Variantenvielfalt und den damit verbundenen volatilen Arbeitsinhalten. Diese führen zu einem stark schwankenden Ressourcenbedarf, wodurch Konzepte zur Glättung Entwicklungsgegenstand sind.

Um das Potential der getakteten Fließmontage dennoch zu erschließen, sind somit neue Konzepte zur Planung (Taktzeitmodell) und zum Betrieb (Regel-Meta-Modell) von sequentiell vernetzten Taktstraßen-Systemen notwendig. Die simulationsbasierte Konzipierung stellt dabei einen vielversprechenden Ansatz dar, der im Rah-

men der Forschung erprobt und evaluiert wird. Zur Erreichung der Zielstellung werden Fallbeispiele untersucht.

Im Beitrag wird der aktuelle Stand der Entwicklung zur simulationsbasierten Konzipierung solcher Systeme vorgestellt.

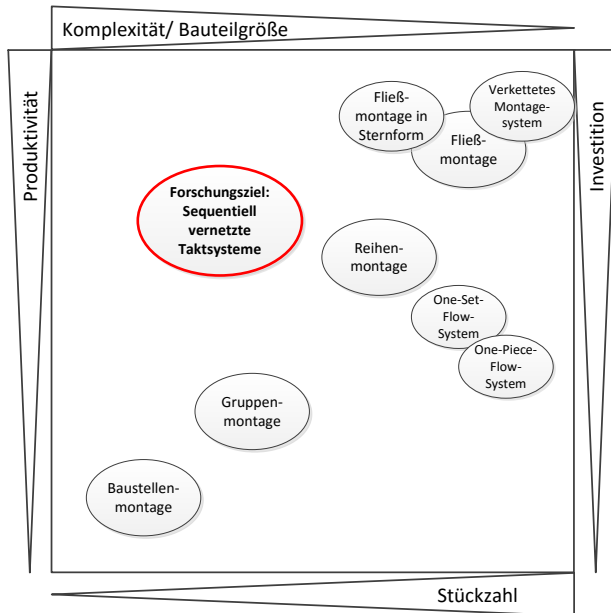


Abbildung 1. Etablierte Organisationsformen der Montage und Zielstellung der Forschung in Anlehnung an [Lot12a]

2 STAND DER FORSCHUNG: FLIESSMONTAGE VON VARIANTENREICHEN GROSSERZEUGNISSEN

Die Vorteile einer Fließmontage gegenüber einer Standplatzmontage bestehen vor allem in der Reduzierung von Durchlaufzeiten und Lagerbeständen bei gleichzeitiger Verbesserung der Auslastung und Termintreue. Dies wirkt sich bei besonders hohen Stückzahlen aus [Lot12b]. Zudem schafft solch eine Organisation der Montage eine höhere Transparenz in Form von Verbindlichkeiten: Verschwendungen im Arbeitsablauf können identifiziert, Arbeitsplätze ergonomischer gestaltet und schrittweise optimiert werden.

2.1 KONZEPTE ZUR PLANUNG UND ZUM BETRIEB VON GETAKTETEN FLIESSSTRASSEN

Die Produktion von Großerzeugnissen erfolgt wie bereits erwähnt in der Regel als Standplatzmontage. Die einfachen Gründe hierfür sind die geringe Transportfähigkeit aufgrund der Größe und des Gewichts der Produkte sowie die hohe Komplexität und die damit verbundene Fertigungstiefe [PM12]. Die größte Herausforderung besteht aber in der Beherrschung der hohen Variantenvielfalt, verbunden mit geringen Absatzmengen je Variante [HMBD13]. Daraus resultieren variable Arbeitsinhalte und schwankende Bearbeitungszeiten. Die (eigentlich sehr

starrten) Takte müssen flexibel konzipiert werden. Ressourceneinsatz und Bereitstellung sind somit optimal zu planen. Die Glättung von Arbeitsinhalten kann bspw. durch prospektives Vermeiden von Komplexität geschehen. Ist das nicht möglich, muss die vorhandene Komplexität effizient reduziert werden. Grundsätzlich besteht das Ziel, Abweichungen zwischen Bearbeitungszeit (BZ) und Taktzeit (TZ), vor allem $BZ > TZ$, zu vermeiden, damit keine Blockierungen in der Linie auftreten und somit die Ausbringung sinkt. Dies kann bspw. durch Taktzeitvariation oder Verlagerung von Arbeitsinhalten auf weitere Stationen bzw. aus der Linie realisiert werden. Besteht keine Möglichkeit zur Anpassung der Bearbeitungszeit an die Taktzeit, können durch Reihenfolgebildung oder die gezielte Einplanung von Leertakten (Bearbeitungszeit = 0) die Folgen der Abweichungen kompensiert werden. Verfahren zur Reihenfolgebildung sind in [BFS09] beschrieben. Zu ihnen gehören z. B. Abstandsregelung, Car Sequencing und Mixed-Model Sequencing. Diese Methoden eignen sich besonders für einzelne Linien. Einschlägige Methoden zur übergreifenden Optimierung vernetzter Taktmontagen bestehen dagegen derzeit nicht. Zudem wurden die Konzepte nur an etablierten Produkten (Bspw. Automobilbau), die in Fließfertigung hergestellt werden, erprobt. Tabelle 1 verdeutlicht die unterschiedlichen Randbedingungen zwischen den betrachteten Produktklassen. Die Widersprüche zeigen, dass Ansätze aus der etablierten Serienfertigung nicht ohne weiteres übertragbar sind. Zur Konzipierung einer Fließstraße für die betrachtete Produktklasse sind daher Optimierungen von Prozess und Produkt sowie Unterstützung des Arbeiters durch Automatisierungslösungen notwendig [GKM11].

Tabelle 1. Vergleich Serienproduktion und Produktion von Großbauteilen, eigene Darstellung unter Verwendung von [GKM11]

	Fließproduktion im Automobilbau	Produktion von Großbauteilen
Stückzahlen / Jahr	100.000	100
Losgrößen	600	3
Taktzeiten (TZ)	10-180 s	20-240 min
Bearbeitungszeit (BZ)	$BZ \leq TZ$	$BZ \leq TZ$ oder $BZ \geq TZ$
Prozessverständnis	Dezentral: Kompetenzen bei Experten	Lokal: hohe Prozess- und Entscheidungskompetenz des Werkers
Prozesskontrolle	Strategien zur statistischen Prozesskontrolle	Statistische Absicherung selten möglich

Eine Transformation in eine getaktete Fließmontage ist, abgesehen von der Automobilindustrie, nur in weni-

gen Fällen belegt. Ein Beispiel ist die Flugzeugmontage bei Airbus in Hamburg [HS07]. Hier konnten Arbeitsinhalte neu verteilt und parallelisiert werden. Bereits in der Entwicklungsphase wird auf eine fließfertigungsgerechte Modularisierung geachtet.

Ein weiteres Beispiel findet sich bei der Firma Koenig & Bauer AG (KBA) [Reh15]. KBA entwickelt und produziert am Standort Radebeul kundenspezifische Druckmaschinen. Mit der getakteten Fließmontage von einzelnen Großbaugruppen (Bsp. Drucktürme) konnte die logistische Zielerfüllung deutlich verbessert werden. Eine weitere Herausforderung besteht in der Vernetzung der einzelnen Taktstraßen zu einem Taktstraßensystem.

2.2 FORSCHUNGSFRAGEN

Vor diesem Hintergrund stellen sich folgende Fragen an die Forschung:

- Stellt die Simulation ein geeignetes Instrument dar, um vernetzte, getaktete Montagesysteme für die genannte Produktklasse zu konzipieren?
- Welche Einflussgrößen bestimmen die Konzipierung des Taktmodells?
- Ist die simulationsbasierte Erstellung und Analyse von Szenarien eine geeignete Methode zur Erstellung des Regel-Meta-Modells?

Die Forschungsfragen sollen in den folgenden Abschnitten anhand der Untersuchung eines Fallbeispiels beantwortet werden.

3 FALLSTUDIE

Für eine Fallstudie wurden Daten der Firma KBA zur Verfügung gestellt. Die bereits erwähnte besondere Herausforderung besteht in der sequentiellen, vernetzten Kopplung bereits vorhandener Baugruppen-Taktstraßen mit differenzierten Taktzeiten und unterschiedlichen Quelle-Senke-Beziehungen. Das Beispiel stellt daher eine hervorragende Grundlage zur Entwicklung einer auf Auslastungsszenarien basierenden Methode zur Ressourceneinsatzoptimierung und Ableitung von Stellhebeln und Planungsregeln dar.

3.1 STRUKTURMODELL

Abbildung 2 ordnet die zu planende Druckwerkmontage (DW) in das Montagestraßen-System ein. Ein DW besteht aus Unterbau und Turm. Druckturm (DT)-, Unterbau (UB)- und Sonderturmmontage (ST) stellen Quellen dar. Zur Entkopplung zwischen den Taktstraßen bestehen Puffer. Die UB-Montage produziert ausschließlich für die DW-Montage. Hingegen produziert die DT-Montage zusätzlich für die Anlagedruckwerkmontage (ADW). Hierdurch entstehen Lücken, die kompensiert werden müssen. Die ST-Montage stellt kontinuierlich Aggregate zur Verfügung. Die DW-Montage selbst kann über bis zu 10 Taktstationen (TS) verfügen. Die Taktzeit der DT- und UB-Montage entspricht einer halben Schicht (SCH), so dass unter Idealbedingungen eine Ausbringung von zwei Einheiten pro Schicht denkbar ist. DW-Montage und ADW-Montage sind durch einen gemeinsamen Ressourcenpool miteinander verbunden.

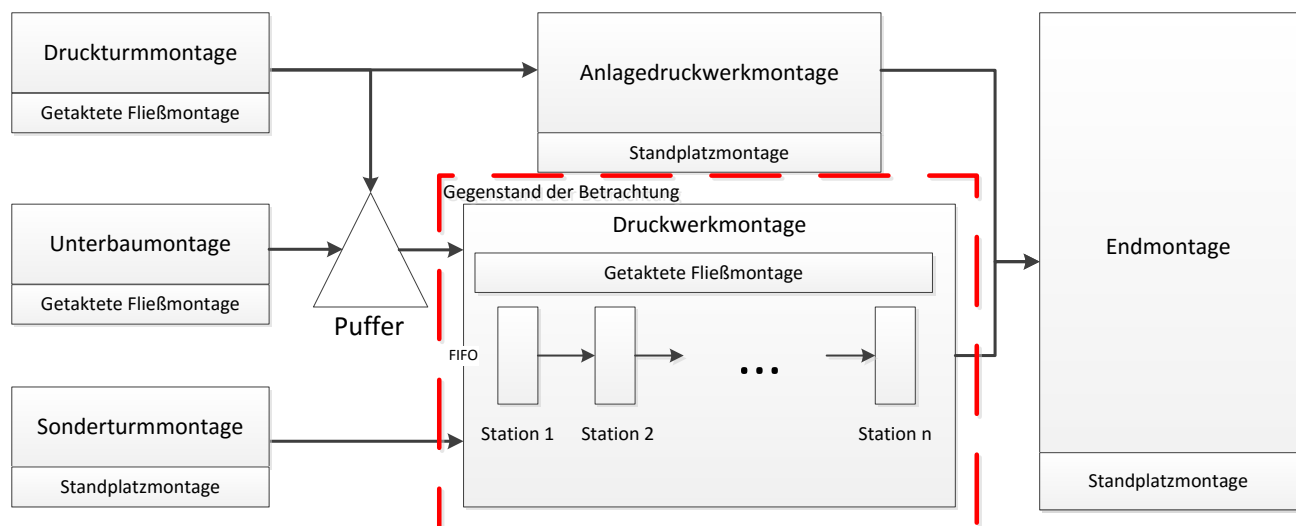


Abbildung 2. Strukturmodell

3.2 RESTRIKTIONEN

Entsprechend kundenindividueller Konfiguration können Druckmaschinen aus unterschiedlich vielen DW zusammengesetzt sein. Die DW einer Maschine können in ihrer Montagereihenfolge vertauscht werden. Anhand der Konfiguration ergeben sich insgesamt 8 Typenvertreter mit unterschiedlichen Auftrittshäufigkeiten. Zusätzlich variieren die Bearbeitungszeiten in den einzelnen Stationen je nach Konfiguration. Die Verteilungen der Typenvertreter, Anzahl der DW und Bearbeitungszeiten sind bekannt, eine Prognose zur zukünftigen Auftragsentwicklung ist jedoch kaum möglich. Somit ist eine Restriktion, mit möglichst minimalem Aufwand / minimaler Investition eine hohe Flexibilität der Taktstraße zu erreichen. Eine weitere Restriktion liegt in der stationsweise notwendigen Arbeitsteilung von mechanischen, elektrischen und pneumatischen Tätigkeiten, wodurch Arbeitsinhalte nicht beliebig aufgeteilt werden können.

3.3 STELLHEBEL/MASSNAHMEN

Unter den beschriebenen Bedingungen sollen diverse Möglichkeiten zur Organisation der Taktstraße überprüft werden. Die sogenannten Stellhebel / Maßnahmen dienen neben der Hauptrestriktion Erfüllung der geforderten Ausbringung (Durchsatz), auch zur Optimierung (Bsp. Auslastung).

Ein *technologischer Stellhebel* ist die *Effizienzsteigerung der Prozesse* mit dem Ziel der Reduzierung der Varianz der Arbeitsinhalte, insbesondere bei Überschreitung der Taktzeit. Das kann z. B. durch spezifische Optimierungen am Prozess oder am Produkt sowie durch Arbeitsplatz- und Logistiksystemgestaltung geschehen oder durch einen höheren Vormontagegrad. Weiterhin ist eine *Erhöhung der Kapazität* durch zusätzliche Taktstationen denkbar. Insbesondere Hybridtakte, die zwischen den Gewerken Mechanik, Elektrik und Pneumatik installiert werden, können für eine Glättung sorgen. Sie dienen bedarfsweise als nachträglicher Puffer zur Verlagerung von Arbeitsinhalten. Eine weitere Maßnahme zur Kapazitätserhöhung besteht in der Dopplung von kritischen Taktstationen als paralleler Arbeitsplatz in der Straße.

Des Weiteren existieren diverse *organisatorische Stellhebel*. Die *Ausschleusung von Exoten* sieht vor, dass Sonderprodukte mit extrem hohen Bearbeitungszeiten nicht weiter in der Straße gefertigt werden, sondern in einer gesonderten Standplatzmontage. Durch geeignete *Reihenfolgebildung* der Aufträge können Leertakte erzeugt oder ausgeglichen werden. Bestimmte Reihenfolgeregeln vermeiden z. B., dass Aufträge mit extremen Bearbeitungszeiten aufeinanderfolgen und schaffen stattdessen die Möglichkeit, diese durch Aufträge mit kurzen Bearbeitungszeiten abzufedern. Gleichzeitig gilt es zu ermitteln, welche *Taktzeit* die Ausbringungsmenge optimiert. Geeignete (flexible) *Arbeitszeitmodelle* geben zusätzlich die Möglichkeit, Ressourcenengpässe operativ auszuglei-

chen. Durch die gezielte *Einplanung von Leertakten* ist es möglich, auch Aufträge mit einer deutlich längeren Bearbeitungszeit gegenüber der Taktzeit auf der Straße zu bearbeiten, ohne den Fluss auf den anderen Taktstationen zu behindern.

4 KONZIPIERUNG UND PLANUNG VON TAKTSTRASSEN MITTELS SIMULATION

Mit Hilfe einer Simulationsstudie kann die Entwicklung von bestimmten Zielgrößen über die Zeit untersucht werden. In der VDI-Richtlinie 3633-1 wird sie als Hilfsmittel u.a. zur Planung und Realisierung von Systemen beschrieben. Dabei wandelt sich ihr Einsatzzweck von der reinen Planungsabsicherung hin zur durchgängigen Anwendung in allen Planungs- und Realisierungsphasen. Insbesondere bei Neuplanungen können Funktion und Leistung von Konzepten nachgewiesen werden. Eine Simulation ersetzt jedoch die Planung nicht, sondern soll insbesondere dann zum Einsatz kommen, wenn analytische Methoden ausgeschöpft sind. Bei der Konzipierung von Taktstraßen mit volatilen Arbeitsinhalten ist das der Fall. Zu ihrer Abbildung sind keine mathematisch-analytischen Modelle bekannt. Der Einsatz einer Simulation ist also gerechtfertigt bzw. sogar notwendig [VDI13]. Für die Simulationsstudie wurde eine Software zur ereignisdiskreten Simulation verwendet. Die Modellierung in der Software erfolgt mit Hilfe von kooperierenden Objekten, denen Methoden und Attribute zugeordnet werden. Dadurch ist es möglich, auch komplexe Systeme übersichtlich abzubilden.

4.1 SIMULATIONSMODELL

Die Erstellung des experimentierbaren Modells basiert auf einer Analyse zum Systemeingang und zur Systemreaktion. Zur Beschreibung der Systemeingangsdaten wurden empirische Informationen ausgewertet. Die Beschreibung der verhaltensbestimmenden Struktur des Systems basiert auf a priori Informationen.

Die relevanten Systemeingangsdaten sind die stochastisch verteilten DW-Reihenfolgen mit charakteristischen Bearbeitungszeiten. Zur Beschreibung dieses Auftragsstroms wurden Vergangenheitsdaten aus drei Produktionsjahren erhoben und daraus entsprechende Verteilungen (Bspw. Normalverteilung) abgeleitet. Um Szenarien für den Auftragsstrom zu generieren, wurde ein Excel-basiertes VBA-Tool programmiert.

Das erstellte Modell des Taktstraßen-Systems orientiert sich an der Struktur der Fallstudie (vgl. Abbildung 2). Die Systemobjekte der DT- und UB-Montage wurden idealisiert mit jeweils einem Baustein dargestellt. Der einstellbare Parameter für diese Bausteine ist die Taktzeit. Die ST-Montage ist nicht Betrachtungsgegenstand und wurde in der Modellierung durch ein unendlich großes Lager mit wahlfreiem Zugriff abgebildet. Die ADW-

Standplatzmontage wurde mit einem Baustein und einem vorgelagerten Puffer abgebildet. Zur Modellierung der DW-Montage wurden alle Taktstationen einzeln durch Bausteine abgebildet. Zusätzlich wurde zwischen DW-Montage und DT-, UB- sowie ST-Montage ein parametrierbarer Puffer installiert. Für die DW-Montage wurden verschiedene Methoden programmiert, um die diversen Stellhebel abzubilden. Bspw. wird beim Einsatz von Hybridarbeitsplätzen die Abweichung von der geplanten Taktzeit berechnet und bei Überschreitung einer Grenze an die nachgelagerte Station weitergegeben.

Der Material- und Informationsfluss wird ebenfalls durch Methoden realisiert. Die abzuarbeitenden Aufträge werden dabei als Liste mit Bezeichnung des Typenvertreterers und der Bearbeitungszeit aus dem Excel-Tool eingelesen. Durch eine Methode werden die Aufträge auf die DT- und ST-Montage verteilt und als Objekt auf den jeweiligen Stationen erzeugt. Der Unterbau stellt kontinuierlich auftragsneutrale Objekte her. Je nach Typenvertreterbezeichnung werden die Objekte auf die DW- bzw. ADW-Montage verteilt. An der Taktstation wird die Bearbeitungszeit vom Objekt abgefragt. Die Weitergabe erfolgt im Takt unter der Bedingung, dass alle Arbeitsinhalte abgeschlossen sind. Nach Durchlauf der Taktstraßen werden die Objekte in der als Endmontage dargestellten Senke vernichtet. Zur Evaluierung der Stellhebel wurden diverse Auswerteeinheiten zu logistischen Kenngrößen erstellt.

Abbildung 3 stellt die Komponenten des Simulationsmodells zusammenfassend dar.

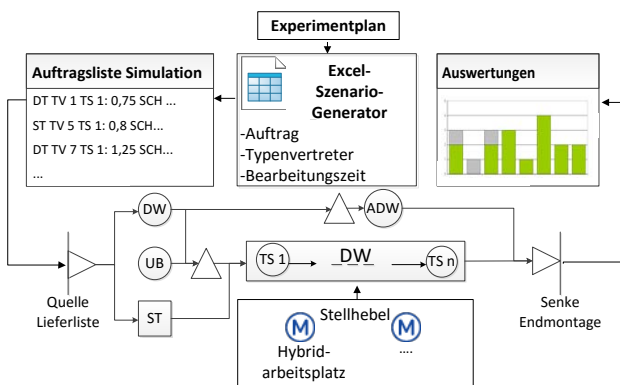


Abbildung 3. Komponenten Simulationsmodell

Zur Konzipierung der Taktstraße wird zunächst das Taktmodell erstellt. Dazu wird eine Idealplanung als Referenz für die darauf folgende Realplanung durchgeführt. Für das aus der Realplanung entwickelte Taktmodell wird ein Betriebsmodell (Regel-Meta-Modell) entwickelt.

4.2 IDEALPLANUNG

Die technologische Idealplanung (Erstellung Taktmodell) ohne Berücksichtigung von Restriktionen und Stellhebeln ist notwendig, um einen objektiven Maßstab

für die nachfolgende Realplanung zu erstellen. Zur Festlegung der Taktstationsanzahl wird der Arbeitsinhalt der verschiedenen DW nach der Taktzeit der UB-Montage und der DT-Montage aufgeteilt. Diese beträgt im Fallbeispiel 0,5 SCH, was einer Ausbringung von 2 Aggregaten pro SCH entspricht. Die daraus benötigte durchschnittliche Taktstationsanzahl liegt bei 6,4 Stationen, die maximal benötigte bei 9,4 Stationen und die minimal benötigte bei 2,1 Stationen (Abbildung 4).

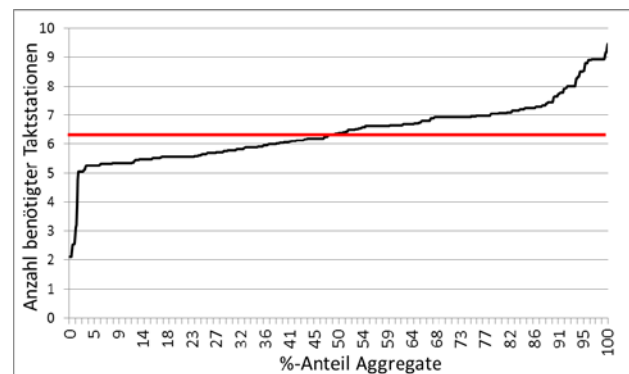


Abbildung 4. Theoretischer Taktbedarf der Druckwerke

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Montagezeiten auf den einzelnen Taktstationen ohne Berücksichtigung technologischer Restriktionen. Die maximale Bearbeitungszeit entspricht der Taktzeit von 0,5 SCH.

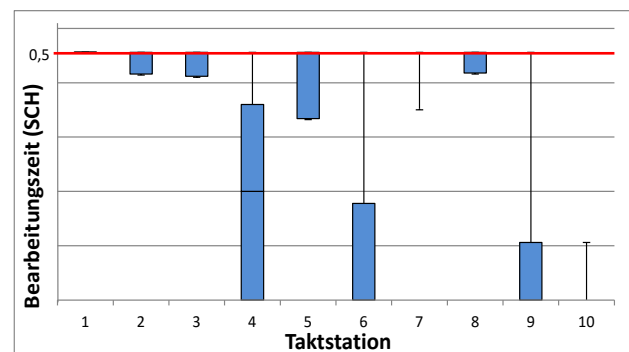


Abbildung 5. Box-Whisker-Plot der Montagezeiten ideal

Zur Überprüfung der Idealkonzipierung der Taktstraße wurde ein gesamtes Auftragsjahr simuliert. Die maximale Ausbringung betrug 1,89 DW pro SCH bei einer DLZ von 5,1 SCH. Die geforderte Anzahl von 2 DW pro SCH wird nicht erreicht, da nicht immer ausreichend DT zur Verfügung stehen. Einige DT werden in der ADW-Montage benötigt. Die dadurch entstehenden Lücken können nicht vollständig von der ST-Montage ausgeglichen werden.

4.3 REALPLANUNG

Unter Berücksichtigung technologischer Restriktionen der Gewerke (M = Mechanik, E = Elektrik, P = Pneumatik) ergibt sich bei der Aufteilung der Arbeitsinhalte auf 10 Stationen folgendes Box-Whisker-Plot (Abbildung 6):

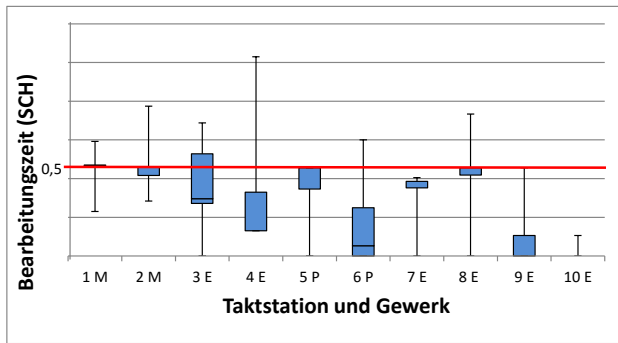


Abbildung 6. Box-Whisker-Plot Montagezeiten real

Die Bearbeitungszeit einzelner DW übersteigt die Taktzeit in 6 der 10 Stationen. Ohne die Anwendung von Stellhebeln ergibt sich eine Ausbringung von 1,1 DW pro SCH bei einer DLZ von 13 SCH. Damit ist es zwingend notwendig, Stellhebel zur technischen Organisation und zum Betrieb der Taktstraße anzuwenden. Die Wirkung der genannten Stellhebel ist unterschiedlich effektiv und effizient. Aus diesem Grund wurden diese zunächst separat anhand von 10 Taktstationen getestet und anschließend in eine Maßnahmenhierarchie gebracht. Die Wirkweise der einzelnen Experimente wird exemplarisch dargestellt.

Das größte Potential wird in der *Ausschleusung von Exoten* gesehen, die eine deutlich höhere Bearbeitungszeit gegenüber der Standzeit aufweisen. Die Frage, ab wann DW ausgeschleust werden sollten, wird mit Hilfe der Simulation beantwortet. Dazu werden verschiedene Szenarien erzeugt, in denen Exoten ausgeschleust werden, deren Bearbeitungszeit die Taktzeit um einen bestimmten Wert überschreitet. Zusammengefasst ergibt sich folgendes Ergebnis (vgl. Tabelle 2):

Tabelle 2. Auswahl von Exoten

Verhältnis BZ zu TZ	Rel. Häufigkeit der DW	Verbesserung DLZ
$BZ \geq 3 \times TZ$	5 %	20 %
$BZ \geq 2,5 \times TZ$	20 %	25 %
$BZ \geq 2 \times TZ$	40 %	33 %

Die Auswahl fällt auf Exoten, bei denen die BZ die 3-fache TZ überschreitet. Das Verhältnis von DW, die ausgeschleust werden zur Verbesserung der DLZ, ist in dieser Gruppe am besten.

Als zweite Maßnahme wurde ein geeigneter *Reduzierungsfaktor der Bearbeitungszeit* identifiziert. Dieser gibt an, in welchem Maße eine Reduzierung der Arbeitsinhalte z. B. durch Optimierung der Prozesse und Produkte oder Vormontagen stattfinden soll. Es zeigte sich im konkreten Fall ein besonders effektiver Faktor von 0,62 (Abbildung 7). Eine solche Reduzierung ist jedoch unrealistisch. Jedoch zeigt die Abbildung, dass eine Erhöhung des Faktors allgemein eine Verkürzung der DLZ zur Folge hat.

Eine relativ signifikante Senkung der DLZ wird im Fallbeispiel mit einem Reduzierungsfaktor von 0,24 erreicht, ein Wert der durch Vormontagen bzw. Prozessautomatisierung erreichbar ist. Die DLZ verringert sich dadurch auf 8,2 SCH, die Ausbringung erhöht sich dagegen auf 1,3 DW pro SCH.

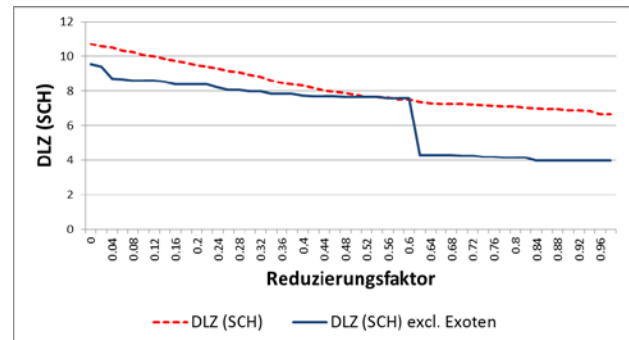


Abbildung 7. Reduzierungsfaktor

Die *Variation der Taktzeit* in DW, DT, UB zeigt, dass eine Reduzierung eine Verbesserung der Ausbringung und Durchlaufzeit (DLZ) zur Folge hat (Abbildung 8). Markant ist das Sägezahnmuster. Lokale Extrema liegen sehr nah beieinander, woraus eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Taktzeitabweichungen resultiert. Hier stellt sich die Frage nach einer optimalen Taktzeit, die eine geringe DLZ ermöglicht, aber auch technisch und organisatorisch realisiert werden kann. Im Fallbeispiel wird eine Verkürzung der Taktzeit um 0,25 Stunden vorgeschlagen (vgl. Abbildung 8), wodurch eine DLZ von 7,8 SCH und eine Ausbringung von 1,36 DW pro SCH erreicht wird. Gleichzeitig ist die technische und organisatorische Machbarkeit sichergestellt. Angebot und Nachfrageschwankungen in den einzelnen Straßen können zusätzlich durch Sonderschichten ausgeglichen werden.

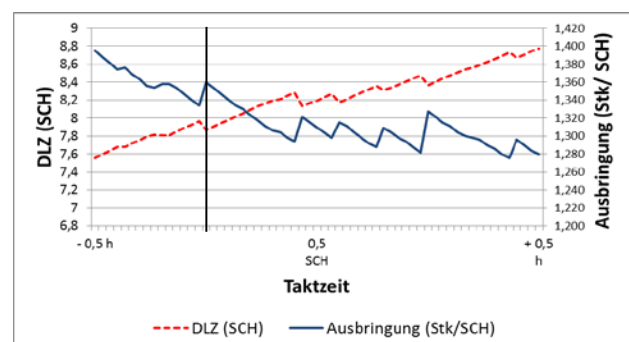


Abbildung 8. Taktzeitvariation

Durch die *Etablierung von Hybridarbeitsplätzen* zwischen den Gewerken können Arbeitsinhalte weitergegeben werden. So wird eine operative Verteilung erhöhter Arbeitszeiten realisiert. Weiterhin können die letzten Takte ausgelassen werden, wenn dort keine Bearbeitung notwendig ist. Im vorliegenden Modell konnte so die Ausbringungsmenge auf über 1,81 DW/SCH bei einer DLZ von 3,4 SCH gesteigert werden. Damit konnten durch ge-

zielte Maßnahmen die Benchmark-Werte der Idealplanung annähernd erreicht werden.

Zusammenfassung technologische Realplanung:

- 10 Taktstationen
- Ausschleusung von Exoten mit $BZ \geq 3 \times TZ$
- Reduzierung der BZ um 24 % bei Überschreitung eines Vielfachen der TZ
- Verkürzung der Taktzeit im DW um 0,25 h
- Einrichtung von Hybridarbeitsplätzen

Bei Betrachtung des Kapazitätsverlaufes wird die stark schwankende Auslastung der Taktstraße bzw. der Mitarbeiter deutlich (Abbildung 9). Der daraus resultierende Mitarbeiterbedarf verläuft im Wesentlichen zwischen 8 und 9 Mitarbeitern mit Extremwerten von 7 und 10 Mitarbeitern.

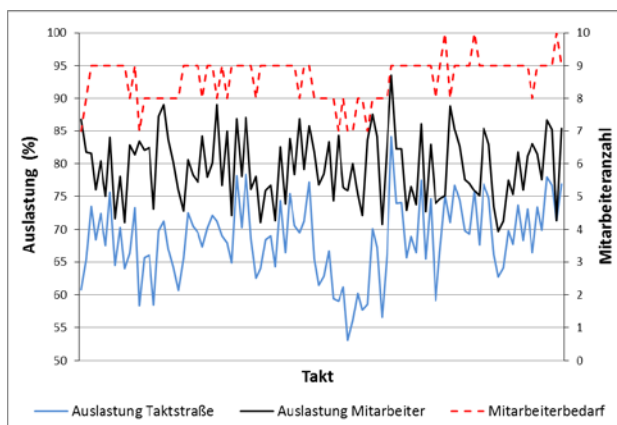


Abbildung 9. Kapazitätsbetrachtung

Zur weiteren Optimierung der Ausbringung und Durchlaufzeit und insbesondere zur Glättung des Mitarbeiterbedarfs ist somit die Erstellung eines Betriebsmodells notwendig.

4.4 BETRIEBSMODELL

Das zu erstellende Regel-Meta-Modell befindet sich aktuell in der Entwicklung (Tabelle 3). Es sind verschiedene Organisationsmaßnahmen (Reihenfolgevertauschung, Taktzeitanpassung, Leertakte) für Vorgänger-Nachfolger-Paarungen (VG-NF) zu definieren (Sequencing-Regeln), die zu einer bestmöglichen logistischen Zielerfüllung führen. Diese sind für jede Taktstation zu entwickeln.

Zur Ableitung der Regeln werden zunächst verschiedene Auftragsszenarien erstellt und simuliert. Diese werden anschließend in Bezug auf die logistische Zielerfüllung bewertet. Bei Abweichungen erfolgt eine Ursachenanalyse. Diese können durch die Komplexität des Taktsystems nicht konkret identifiziert werden. Zu-

dem ist es bei über 1000 simulierten Takten nicht möglich jede einzelne Ursache zu überprüfen. Bspw. ist die Ursache für eine Blockierung in der Linie sehr vielfältig und kann z.B. durch eine bestimmte Auftragsreihenfolge, Taktzeitkonstellation der einzelnen Straßen, fehlende Teile oder fehlende Kapazitäten hervorgerufen werden. In den simulierten Szenarien soll deshalb nach übereinstimmenden Merkmalen (Auftragsreihenfolge, Zustand Taktsystem) zur Identifikation der Ursachen gesucht werden. Nach der Ursachenidentifikation werden entsprechende Maßnahmen / Regeln zur Verbesserung festgelegt. Die Überprüfung der Maßnahmen erfolgt wiederum durch Simulation und Evaluation. Im Ergebnis steht eine Matrix die zur Reihenfolgeplanung (spez. Startarbeitssystem) und zum Betrieb der Taktstraße (Folgearbeitssysteme) verwendet wird.

Tabelle 3. Regel-Meta-Modell für das Startarbeitssystem DW

NF \ VG	TV1	TV2	TV3	TVn
TV1	Ausschleusen, keine SCH im UB	Zulässig, wenn 2. Vorgänger \neq TV1, sonst Ausschleusen	Zulässig, jedoch Entstehung von Leertakt ab Station 4	...
TV2	Zulässig, wenn 2. Vorgänger = TV 2	Taktzeit DW = Bearbeitungszeit TV 2	Zulässig, wenn UB in Puffer	...
TV3	Sonderschicht DT	Zulässig, keine SCH im UB	Unzulässig, Nachfolger zurückstellen	...
TVn

5 FAZIT UND FORSCHUNGSBEDARF

Im Rahmen der Studie konnte die Eignung der Simulationstechnik als geeignetes Werkzeug zur Konzipierung komplexer Taktstraßen-Systeme nachgewiesen werden. Speziell durch die Möglichkeit, eine Vielzahl von Szenarien zu modellieren und zu analysieren, können Einflusskriterien zur Dimensionierung und zum Betrieb erkannt und gezielt gestaltet werden. Mit der technologischen Idealplanung ohne Berücksichtigung von Restriktionen kann ein objektiver Bewertungsmaßstab erstellt werden. Dieser dient in der Realplanung zur Bewertung der Wirkweise einzelner Stellhebel. Dabei konnte ein ideales Verhältnis zwischen der Anzahl ausgeschleuster Exoten zur Durchlaufzeit ermittelt werden. Des Weiteren wurde ein Zielwert zur notwendigen Reduzierung der Bearbeitungszeit ermittelt, der den besten Einfluss auf die Ausbringung und Durchlaufzeit hat. Durch Einrichtung von Hybridarbeitsplätzen konnte letztendlich ein flexibles Taktzeitmodell mit zehn Stationen zur annähernden Erfüllung der geforderten Ausbringung erstellt werden. Die Ziele der Kapazi-

tätsglättung und Optimierung weiterer logistischer Zielgrößen erfolgt durch die Erstellung des „Regel-Meta-Modells“.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Anwendung der Simulationstechnik als unterstützendes Tool für die Konzipierung vernetzter Taktstraßen in Verbindung mit geeigneten Datenaufbereitungs- und Auswertungsmethoden zu befriedigenden Ergebnissen mit akzeptablem Aufwand führt. Die erarbeitete Methodik zur Entwicklung eines Regel-Meta-Modells ist im Rahmen weitere Fallstudien zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Forschungsbedarf besteht außerdem in der Entwicklung eines Standard-Prozess- und Parametermodells als Basis für die simulationsbasierte exakte Ermittlung des Grenzverhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen bei Einführung von Taktstraßen als Alternative zu Standplatzmontagen.

Literatur

- [AWK12] Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011 (2011). 1., Aufl. Herzogenrath: Shaker (Aachener Perspektiven).
- [BFS09] Boysen, Nils; Fliedner, Malte; Scholl, Armin (2009): Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. In: *European Journal of Operational Research* 192 (2), S. 349–373.
- [BMBF13] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014): Zukunftsbild „Industrie 4.0“ Bundesministerium für Bildung und Forschung, S. 13 ff., Berlin
- [GKM11] Gorgels, C.; Klocke, F.; Martel, G.; Michel, W.; Mundt, A.; Queins, M. et al. (2011): Serienproduktion von Großbauteilen. In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011. 1., Aufl. Herzogenrath: Shaker (Aachener Perspektiven).
- [HS07] Harjes, Ivo-Marko; Stechow, Michael (2007): Von der Dockfertigung zur Fließfertigung. Ein Paradigmenwechsel in der industriellen Flugzeugfertigung. In: *Industrie Management* 23 (3), S. 32–34, zuletzt geprüft am 22.07.2015.
- [HMBD13] Hasselmann, Veit-Robert; Maschek, Thomas; Bohnen, Fabian; Deuse, Jochen (2013): Taktgebundene Fließmontage in der Großgerätemontage. Reife-gradorientierte Gestaltung eines Produktionssystems. In: *ZWF* 108 (1-2), S. 32–36, zuletzt geprüft am 21.07.2015.
- [Lot12a] Lotter, Edwin (2012): Hybride Montagesysteme. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis.* 2., Aufl. Berlin: Springer Berlin (VDI-Buch), S. 167–193.
- [Lot12b] Lotter, Bruno (2012): Manuelle Montage von Großgeräten. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis.* 2., Aufl. Berlin: Springer Berlin (VDI-Buch), S. 147–166.
- [LW12] Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hg.) (2012): *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis.* 2., Aufl. Berlin: Springer Berlin (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http%3A//www.worldcat.org/oclc/809159242>, zuletzt geprüft am 28.07.2015.
- [PM12] Potthast, Jens-Michael; Meers, Stephan (2012): Produktionssystem für XXL-Produkte. Studie über Methodeneinsatz bei XXL-Herstellern. In: *Productivity Management* 17 (1), S. 49–52, zuletzt geprüft am 21.07.2015.
- [Reh15] Rehm, Markus (2015): Synchronisierung eines mehrstufigen Montagesystems. Vortrag zum ERFA, Lean-Assessment, des VDMA-Ost- Tagungs-ort: Koenig & Bauer AG, Radebeul.
- [SRVC09] Schmidt, Thorsten; Rose, Oliver; Völker, Michael; Carl, Sebastian (2009): Optimierte Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse. In: *wt Werkstatttechnik Online, Jahrgang 99* (4), Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf
- [SS12] Schuh, G., Stich, V. (2012): *Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS*. Springer Vieweg Berlin-Heidelberg, S.3-5, Aachen –ISBN: 978-3642254222
- [VDI13] VDI-Richtlinie 3633-1, 2014: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*, zuletzt geprüft am 25.08.2015.

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Head of the Chair of Logistics Engineering, Director of the Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Logistics Engineering in the Mechanical Engineering faculty since 2008. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dortmund and a Master degree in industrial engineering from the Georgia Institute of Technology. He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His research areas are the design and optimization of facility logistics and production systems including a focus on the machinery and components involved. He currently works on energy efficient control strategies in material flow, fast approximation in early planning stages by means of standard design modules, online data analysis, formal verification of control logic, performance analysis of decentral and selfcontrolled systems, lightweight structures in material handling and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respectively. His email address is: thorsten.schmidt@tu-dresden.de.

Dipl.-Ing. Mathias Kühn is a member of the scientific staff of Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt at the chair of logistics engineering, at the department of mechanical engineering, TU Dresden, Germany. He studied mechanical engineering with the specialisation production technology and factory planning. His research interest includes modelling complex production processes and simulation based optimization for complex assembly lines. His email address is: mathias.kuehn@tu-dresden.de.

Dipl.-Ing. Christian Fritzsche is a member of the scientific staff of Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt at the chair of logistics engineering, at the department of mechanical engineering, TU Dresden, Germany. He studied mechanical engineering with specialisation industrial engineering. His current research areas analysis of error rates in order picking, the consequences of demographic change in logistics processes and assembly lines for versatile production.

Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Völker, born in 1956, studied mechanical engineering at Technische Universität Dresden. He received his doctorate in 1988. His doctoral thesis analyses the use of industrial robots for automated machine charging. In the context of various industrial projects he gained experience as a senior project manager in the planning and commissioning of more than 20 factories in different countries. In addition, he gave guest lectures at various universities. He is currently working as head of the factory planning department at Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Engineering, Chair of Logistics Engineering. His expertise in teaching and research lies in particular in

the planning and design of production systems and factories. Core issues are Digital Factory concepts and the organization and optimization of production processes. His email address is: michael.voelker@tu-dresden.de.

Dr.-Ing. Markus Rehm, born in 1984, studied Industrial Engineering and Management at the Technische Universität Dresden. He received his doctorate in 2015. His doctoral thesis is about leveling paced assembly lines, work force allocation, capacity controlling, scheduling and synchronization of complex assembly systems. Since July 2014 he is head of Process Planning of the Koenig & Bauer Group subsidiary Sheetfed Solutions. His email address is: markus.rehm@kba.com.