

## **Quantifizierung von Einsatzgrenzen einer zentralen und dezentralen Steuerungsstruktur**

### ***Quantification of Application Limits of a Centralized and Decentralized Control Structure***

Nils Willeke, TU Berlin, Berlin (Germany), nils.willeke@campus.tu-berlin.de

Eckhard Hohwieler, Fraunhofer IPK, Berlin (Germany),  
eckhard.hohwieler@ipk.fraunhofer.de

Robert Scheffermann, Dortmund (Germany), robert@scheffermann.de

Eckart Uhlmann, TU Berlin, Berlin (Germany), eckart.uhlmann@iwf.tu-berlin.de

**Abstract:** This paper deals with a concept for the determination of application limits of decentralized and centralized control structures in workshop production and their application in a simulation study. In order to investigate the influence of the control structure, the decision logic will be adapted. Thus, statements about the suitability of the structure can be made. The study shows a higher suitability of central structures in application scenarios with a higher malfunction rate and longer setup times compared to decentralized structures.

## **1 Einleitung**

Die Globalisierung eröffnet Unternehmen neue Absatzmärkte und schafft gleichzeitig einen breiteren Wettbewerb (Brackel, 2009; Niehues, 2016). Gemeinsam mit den Trends zur Verkürzung der Produktlebenszyklen, der Produktindividualisierung sowie der steigenden Variantenvielfalt sehen sich Unternehmen zunehmend mit volatilen Märkten konfrontiert (Nyhuis und Wiendahl, 2009). Für einen Wirtschaftsstandort wie Deutschland, in dem die Produktion eine hohe Bedeutung genießt, wächst der Bedarf an einer flexibleren und effizienteren Fertigung (Abele und Reinhart, 2011).

Ein Lösungsansatz wird im Zuge der industriellen Digitalisierung in der Produktionssteuerung gesehen. Durch den digitalen Zwilling werden Produktionssteuerungen jederzeit befähigt sein, den Zustand der Fertigung virtuell zu erfassen, zu bewerten und gegebenenfalls Anpassungen einzuleiten (Kuhn, 2017). Neben der Datentransparenz spielt die Geschwindigkeit, mit der die Daten erfasst und verarbeitet werden, eine entscheidende Rolle für die Umsetzung einer echtzeitfähigen Produktionssteuerung (Schmidt et al., 2007).

Die Fertigungssteuerung nach Lödding (2016) entspricht einem Teil der Eigenfertigungsplanung und -steuerung aus dem Modell der Produktionsplanung und -steuerung nach Luczak und Eversheim (1999). Die Aufgaben der Fertigungssteuerung unterteilen sich in die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung (Lödding, 2016). Bei einer Fließfertigung bzw. Linienfertigung (LF) sind die Maschinen nach einer Arbeitsvorgangsfolge miteinander starr verkettet (Schuh, 2006). Dagegen ist der Materialfluss bei einer Werkstattfertigung (WF) mit entsprechend flexiblen Maschinen nicht fest vorgegeben. Das erhöht die Komplexität für eine Fertigungssteuerung und daher wird die in diesem Beitrag verwendete Fertigungssteuerung durch die Arbeitsverteilung nach Wiendahl (2002) ergänzt. Eine Liste einzelner Produktionsaufträge mit frühestmöglichem Start- und geplanten Fertigstellungsterminen ist das Resultat der Produktionsplanung und wird als Produktionsplan bezeichnet. Die Aufgabe der Fertigungssteuerung ist es, den Produktionsplan umzusetzen.

Fertigungssteuerungen können mittels einer zentral-hierarchischen, dezentral-hierarchischen oder dezentral-heterarchischen Steuerungsstruktur umgesetzt werden (Scholz-Reiter und Freitag, 2007). Bei zentral-hierarchischen Steuerungsstrukturen werden Steuerungsentscheidungen anhand eines vorher festgelegten *Ablaufplans* (schedule) getroffen (Jaehn und Pesch, 2014). Diese Art wird in der Folge als *zentrale Steuerungen* bezeichnet. Sofern die Vorhersagequalität hoch bzw. die Auftragsschwankungen gering sind, lassen sich mit zentralen Steuerungen eine hohe Planungssicherheit und Planungsgenauigkeit erzielen (Grundstein et al., 2013; Schukraft et al., 2015). Auch wenn die beiden Attribute nur unter den beschriebenen Voraussetzungen gelten, sorgen sie für eine weite Verbreitung der zentralen Steuerung in der Praxis (Lödding, 2016). In turbulenten Fertigungsumgebungen stellt das Konzept der dynamischen Ablaufplanung (*dynamic scheduling*) ein Lösungsansatz in zentral-hierarchischen Systemen dar. Bei Abweichungen vom Ablaufplan (z. B. infolge von Störungen) wird auf Basis des aktuellen Zustands eine Neuplanung (*rescheduling*) angestoßen. Die neu berechnete Lösung wird entweder in den bisherigen Ablaufplan integriert oder ersetzt diesen. In dynamischen Umfeldern neigen Rescheduling-Ansätze zu einem Übersteuern, was als Systemnervosität bezeichnet wird und zu Instabilitäten führen kann (Ouelhadj und Petrovic, 2008). Dezentrale Ansätze in der Fertigungssteuerung zeichnen sich durch kurze Entscheidungswege und einen geringen Koordinationsaufwand aus (Schuh et al., 2012). Sie sind dadurch sehr reaktionsschnell und flexibel einsetzbar (Ramsauer, 1997). Mehrere Studien stützen die These, dass dezentral-heterarchische Entscheidungsstrukturen (nachfolgend als *dezentrale Steuerungen* bezeichnet) in komplexen und dynamischen Produktionsumfeldern ähnlich gute oder sogar bessere Ergebnisse als ausgewählte zentrale Steuerungsansätze erzielen können (Windt et al., 2010a; Windt et al., 2010b; Scholz-Reiter et al., 2010).

In Anbetracht der zu erwartenden Turbulenzen für die fertigende Industrie und dem damit verbundenen Bedarf an Flexibilität und Adaptivität stellt sich für das Anwendungsszenario eines Komponentenwerks in der Automobilindustrie die Frage, ob und falls zutreffend, unter welchen Bedingungen eine Werkstattfertigung mit der konventionellen Fließfertigung konkurrieren kann. Aufgrund der komplexeren Steuerung einer Werkstattfertigung und bisher weniger Studien, ist zu klären, welche Steuerungsstruktur (zentral oder dezentral) geeignet wäre.

Ein qualitativer Ansatz für die Auswahl einer Steuerungsstruktur existiert bereits (Schukraft et al., 2015). Eine Quantifizierung von Einsatzgrenzen zentraler und dezentraler Steuerungsstrukturen anhand der Parameter eines Fertigungssystems steht noch aus. Daher wird in diesem Beitrag eine Simulationsstudie vorgestellt, mit der Einsatzgrenzen anhand ausgewählter Parameter einer Fertigungsumgebung quantifiziert werden. In der Folge werden der Versuchsaufbau und die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt.

## 2 Versuchsaufbau

Das zu untersuchende Fertigungssystem besteht aus 5 Produktgruppen mit jeweils 2 Varianten und 5 Arbeitsgängen. Puffer sind jeweils vor den Maschinen und vor einem Arbeitsgang platziert. Der intralogistische Transport wird mit Transporteinheiten (TE) (Günther et al., 2014) durchgeführt, die eine bestimmte Anzahl an Halbzeugen enthalten. Der Auftragseingang und die Auftragsfreigabe sind taktgebunden. Der Takt ist konstant (60 Sekunden pro Stück). Bei jedem Takt wird pro Produktgruppe eine Transporteinheit, welche 20 bzw. 50 Teile umfasst, als Produktionsauftrag freigegeben. Die Kapazitäten der Transporteinheiten  $K_{TE}$  sind über alle Produktgruppen konstant. Die *Quelle* wird im Simulationsmodell durch den Puffer des ersten Arbeitsganges repräsentiert. Die *Senke* befindet sich hinter dem letzten Arbeitsgang (Abb. 1).

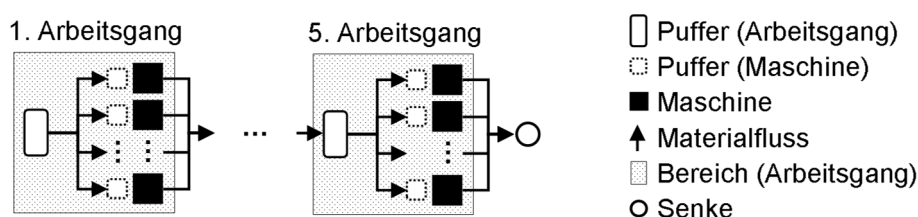


Abbildung 1: Materialfluss im Fertigungssystem

Im Anschluss werden Randbedingungen der Untersuchung benannt, das Vergleichskonzept und die Faktoren für die Versuchsplanung erläutert.

### 2.1 Randbedingungen

#### 2.1.1 Anwendungsszenario

Das Anwendungsszenario stammt aus einem spannenden Fertigungsbereich der Automobilindustrie und ist in die Massenfertigung einzuordnen. Der Auftragseingang lehnt sich an den Takt des Automobilwerks an. Der daraus ableitbare Durchsatz ist Grundlage für die Auslegung des Maschinenmengengerüsts eines Komponentenwerks in der Automobilindustrie. Das Maschinenmengengerüst sollte so aufgebaut werden, dass in Bezug auf die Maschinenkapazität ein Engpass am Anfang der Fertigung entsteht. Während der Fertigung wird die Maschinenkapazität durch deterministische (Rüst- und Werkzeugwechselfaufwände) und stochastische Ereignisse (technische Ausfälle) reduziert. Diese Einflüsse können durch die folgenden Parameter variiert werden: Rüstzeit  $t_R$ , technische Ausfallrate  $A_T$  und

Variantenwechselfaktor  $n_{vw}$  (VDI 3423). Die Werte der einzelnen Parameter können sich im Laufe der späteren Produktion durch kontinuierliche Verbesserungsprozesse verändern. Daher ist es unerlässlich, verschiedene Kombinationen möglicher Ausprägungsspektren der Parameter in Bezug auf die logistische Zielerreichung zu evaluieren. Die logistische Zielerreichung setzt sich aus den folgenden Kennzahlen zusammen: mittlere Verfügbarkeit  $V_{med}$ , mittlere Durchlaufzeit  $t_{D,med}$  und der mittlere Fertigungsbestand  $WIP_{med}$  (ISO 22400-2; VDMA 66412-1). Die mittlere Verfügbarkeit  $V_{med}$  gibt den Anteil der wertschöpfenden Zeiten aller Maschinen an der geplanten Belegungszeit aller Maschinen an (ISO 22400-2).

### 2.1.2 Simulator

Für die Simulationsstudien wurde das Simulationsmodell verwendet, welches im Rahmen des Forschungsprojektes iWePro entwickelt wurde (Otto und Uhlmann, 2016). Der Aufbau und die Funktionsweise des Simulators sind in Willeke et al. (2017) beschrieben.

## 2.2 Vergleichskonzept

Das Ziel des Vergleichskonzepts ist es, durch eine hohe Anzahl an Simulationsläufen die Parameter eines Fertigungssystems zu identifizieren, mit denen sich Einsatzgrenzen von Steuerungsstrukturen quantifizieren lassen. Aus der Betrachtung des Prozesses der Steuerungsentscheidung und den Eigenschaften einer Entscheidungsgrundlage wird in der Folge ein Vergleichskonzept abgeleitet.

### 2.2.1 Steuerungsentscheidung

Der Prozess *Steuerungsentscheidung* kann in die Prozessschritte Detektion einer Entscheidungssituation, Entscheidungsfindung und Entscheidungsumsetzung gegliedert werden. Im Schritt der Entscheidungsfindung wird auf eine *Entscheidungsgrundlage* zurückgegriffen. Bei der zentralen Steuerung ist die Entscheidungsgrundlage der Ablaufplan. Die Erstellung des Ablaufplans ist vom Entscheidungsprozess entkoppelt. Innerhalb der dezentralen Steuerung ist die Berechnung der Entscheidungsgrundlage (Algorithmus für Arbeitsverteilung) in die Entscheidungsfindung integriert.

### 2.2.2 Eigenschaften einer Entscheidungsgrundlage

Die Berechnung der Entscheidungsgrundlage bei zentralen Steuerungen erfolgt, indem ein mit Hilfe einer Meta-Heuristik zulässiger Ablaufplan als Startlösung (*Initialplan*) generiert wird. Der Initialplan wird optimiert, indem nach besseren Lösungen gesucht wird. Durch die Vorgabe einer Zeit bzw. der Anzahl der Iterationsläufe kann die Suche eingegrenzt werden. Die Entscheidungsgrundlage bei dezentralen Steuerungsstrukturen basiert auf lokalen Informationen der beteiligten logistischen Objekte.

Die Lösungsgüte einer zentralen Steuerung hängt vom Optimierungsproblem, der Wahl des Scheduling-Algorithmus (Heuristik oder exakte Verfahren), und der für die Lösungssuche zur Verfügung stehenden Zeit ab. Da das Optimierungsproblem als NP-schwer klassifiziert werden kann (Hoogeveen et al., 1996), eignen sich exakte Verfahren für das vorliegende Planungsproblem in der zu betrachtenden Problemgröße nicht. Lösungen von Heuristiken lassen keine Aussage zu, inwieweit diese dem globalen Optimum nahe kommen (Jaehn und Pesch, 2014). Darüber hinaus

kann keine Aussage darüber getroffen werden, „ob eine Heuristik besser als eine andere“ für ein allgemeines Optimierungsproblem geeignet ist (Jaehn und Pesch, 2014). Das heißt, der Vergleich von Algorithmen kann nur auf Basis von Versuchen in demselben Anwendungsszenario erfolgen.

Die Aktualität der Entscheidungsgrundlage wird in einem zeitbasierten Rescheduling durch einen Zeitwert konfiguriert. Bei einem ereignisbasierten Rescheduling wird die Neuplanung durch den Ein- und Austritt einer Störung ausgelöst. In diesem Fall kann über die Zeit zwischen dem Ein- und Austritt von Störungen die Maximaldauer einer Neuberechnung der Entscheidungsgrundlage abgeleitet werden. Die Aktualität der Entscheidungsgrundlage wird mittels der Ausfallkontrollfrequenz  $f_r$  parametrisiert. Sie ist die Frequenz, in der kontrolliert wird, ob ein technischer Ausfall einer Maschine eingetreten bzw. behoben wurde. Ist dies der Fall, wird ein Rescheduling ausgelöst. Dieser Faktor ist während eines Simulationslaufs konstant. Die dezentrale Steuerung entscheidet stets auf Basis einer aktuellen Berechnung der Entscheidungsgrundlage.

Entstehen bei zentralen Steuerungsstrukturen Leerlaufzeiten in nachfolgenden Arbeitsgängen und ist die Entscheidung für einen Produktionsauftrag für eine Maschine bereits gefallen, kann durch *Proaktives Rüsten* ein Rüstvorgang bereits ausgeführt werden, obwohl der Produktionsauftrag noch in der vorgelagerten Operation bearbeitet wird. Das vermeidet Wartezeiten und verkürzt die Durchlaufzeit des Produktionsauftrags.

Zusammenfassend listet Tabelle 1 die Eigenschaften einer Entscheidungsgrundlage auf und bewertet sie, isoliert für die einzelnen Steuerungsstrukturen, als vorteilhaft (+) bzw. nachteilig (-) gegenüber der anderen Steuerungsstruktur im Hinblick auf ein besseres Gesamtergebnis einer Fertigungssteuerung.

**Tabelle 1:** *Eigenschaften der Entscheidungsgrundlage von Steuerungsstrukturen*

Eigenschaften	Zentral	Dezentral
Lösungsgüte	+	-
Aktualität der Entscheidungsgrundlage	-	+
Proaktives Rüsten	+	-
Robustheit	-	+
Globales Optimum	+	-
Berechnungszeit	-	+

### 2.2.3 Ableitung eines Vergleichskonzepts

Allgemeine Aussagen über Einsatzgebiete von zentralen und dezentralen Steuerungen unter Berücksichtigung der Lösungsgüte sind in Anbetracht der Anzahl der Parameter einer Fertigung und der Anzahl existierender Algorithmen für die verschiedenen Steuerungsstrukturen unrealistisch (Jungwattanakit et al., 2009; Windt et al., 2010a).

Der Produktionsplan ist für beide Steuerungsstrukturen in einem Anwendungsszenario derselbe. Die Entscheidungslogiken der dezentralen Steuerung für das

Zuordnungsproblem (Aufträge zu Maschinen) und für das Reihenfolgeproblem (Warteschlange vor den Maschinen) werden in die Ablaufplanberechnung integriert. Der Initialplan kann mit Hilfe einer beliebigen Meta-Heuristik (z.B. „Bergsteigeralgorithmus“) erzeugt werden, sodass diese als Ausgangsbasis die Sequenz der Produktionsaufträge generiert. Eine Optimierung des Initialplans findet nicht statt. Das bedeutet, dass beide Steuerungsstrukturen ohne Einfluss von Randbedingungen (z.B. technische Ausfälle, Rüsten) nahezu identische Ergebnisse erzielen. Dadurch können die Wirkzusammenhänge zwischen den Randbedingungen (bspw. technische Ausfallrate  $A_T$ , Rüstzeit  $t_R$ ) und den Eigenschaften der Entscheidungsgrundlage (Aktualität der Entscheidungsgrundlage und Proaktives Rüsten) isoliert betrachtet werden.

#### 2.2.4 Algorithmen der Fertigungssteuerung

Der Algorithmus des Zuordnungsproblems (Auswahl der Maschine) für die dezentrale Steuerung wurde auf Basis eines in Scholz-Reiter et al. (2005) vorgestellten generischen Algorithmus realisiert, welcher in anderen Publikationen als Queue Length Estimator (QLE) bezeichnet wird (Scholz-Reiter et al., 2010; Windt et al., 2010a). Dieser berechnet für einen Produktionsauftrag, welcher jeweils ein logistisches Objekt darstellt, vor jedem anstehenden Arbeitsgang die aktuell möglichen Fertigstellungszeitpunkte an allen zur Verfügung stehenden Maschinen. Bei der Berechnung des Termins werden Werkzeugwechsel-, Bearbeitungs- und Rüst dauern innerhalb der Warteschlange einer Maschine berücksichtigt. Das logistische Objekt entscheidet sich situativ und lokal für die Maschine mit dem frühestmöglichen Fertigstellungszeitpunkt. Als Algorithmus für die Abarbeitung der Produktionsaufträge an den Maschinen wird die Prioritätsregel FIFO (First-In-First-Out) verwendet (Nyhuis und Wiendahl, 2012). Zur Übersicht sind die Aufgaben und Algorithmen in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Berücksichtigte Aufgaben der Fertigungssteuerung und verwendete Algorithmen (in Anlehnung an Wiendahl (2002) und Lödding (2016))

Aufgaben	Algorithmen
Auftragsfreigabe	Engpass-Steuerung
Reihenfolgebildung	FIFO
Arbeitsverteilung	QLE

#### 2.2.5 Parameter der Einsatzgrenzen

Technische Ausfälle von Maschinen, Rüstvorgänge und Transportwege führen trotz gleicher Logik zu unterschiedlichen Ankunftszeiten der Produktionsaufträge an den einzelnen Maschinen und damit in der Folge zu unterschiedlichen Entscheidungssituationen. Die gezielte Parametrierung der Fertigungsumgebung durch Veränderung von Störungs- und Rüst szenarien wird genutzt, um Einsatzgrenzen zu quantifizieren. Die Häufigkeit einer Störung wird dabei über die technische Ausfallrate  $A_T$  eingestellt. Die Auswirkung eines Rüstvorgangs kann mit Hilfe des Verhältnisses der Rüstzeit  $t_R$  zur kleinsten Bearbeitungsdauer  $t_{B,TE,min}$  einer

Transporteinheit in der Engpass-Operation bestimmt werden. Dieser Wert wird in der Auswertung als *Rüstauswirkung* bezeichnet. Die Zeit zwischen dem Ein- und Austreten bzw. dem Aus- und Eintreten eines Störungsereignisses wird als Time Between Necessary Rescheduling (TBNR)  $t_{\text{TBNR}}$  definiert. Die mittlere TBNR  $t_{\text{TBNR,med}}$  kann als Anforderungen bei der Auswahl von Heuristiken für die zentrale Steuerungsstruktur verwendet werden.

## 2.3 Faktoren

### 2.3.1 Fertigungsumgebung

Die folgenden Parameter einer Fertigungsumgebung bilden die Faktoren der Untersuchung: das Maschinenmengengerüst (MMG), die Kapazität einer Transporteinheit  $K_{\text{TE}}$ , die Organisationsform der Fertigung (OF), die Rüstzeit  $t_{\text{R}}$ , der Variantenwechselfaktor  $n_{\text{VW}}$  und die technische Ausfallrate  $A_{\text{T}}$ . Das Maschinenmengengerüst beschreibt die Anzahl der Parallelmaschinen für jeden Arbeitsgang. Bei einer Fließfertigung ist die Anzahl der Parallelmaschinen in allen Arbeitsgängen konstant. Ein Maschinenmengengerüst einer Fließfertigung mit 5 Arbeitsgängen und jeweils 5 Parallelmaschinen wird in diesem Beitrag in der folgenden Schreibweise beschrieben: 5-5-5-5-5. Innerhalb einer Werkstattfertigung kann die Anzahl der Parallelmaschinen je Arbeitsgang variiert werden (Bsp.: 7-5-6-5-5). Dadurch ist eine größere Flexibilität in Bezug auf die Kapazitätsanpassung einzelner Arbeitsgänge gegeben.

Die Kapazität einer Transporteinheit  $K_{\text{TE}}$  beschreibt die Anzahl der zu fertigenden Teile auf einer Transporteinheit. Die Transporteinheit ist immer produktrein. Bei einer Werkstattfertigung kann die Kapazität einer Transporteinheit  $K_{\text{TE}}$  mit der Losgröße  $q$  gleichgesetzt werden. Dem gegenüber hat jede Produktgruppe in einer Fließfertigung aufgrund der starren Verkettung eine dedizierte Maschine für jeden Arbeitsgang. Daher wird die Losgröße  $q$  in einer Fließfertigung unter Umständen auch durch mehrere Transporteinheiten definiert, wenn sie hintereinander gefertigt werden. Innerhalb dieses Beitrags wird trotzdem die Losgröße  $q$  mit der Kapazität einer Transporteinheit  $K_{\text{TE}}$  gleichgesetzt.

Der Variantenwechselfaktor  $n_{\text{VW}}$  beschreibt die Anzahl der Teile von einer Variante aus einer Produktgruppe, die im Auftragseingang hintereinander freigegeben wird, bis es zu einem Variantenwechsel kommt. Folglich ist der Variantenwechselfaktor  $n_{\text{VW}}$  ein Maß für die Häufigkeit eines Variantenwechsels innerhalb einer Produktgruppe und gleichzeitig ein Maß für die Turbulenz innerhalb des Auftragseingangs. Jeder Variantenwechsel bedingt einen Rüstvorgang. Die Auswirkungen eines Rüstvorgangs wird durch die Rüstzeit  $t_{\text{R}}$  beschrieben. Sie ist definiert als die Dauer eines Rüstvorgangs an einer Maschine und ist innerhalb der Untersuchung über alle Arbeitsgänge und Produkte konstant.

Für einen Auftragshorizont von 5 Tagen und jeweils 24 Stunden werden Produktionsaufträge für alle Produktgruppen erzeugt. Der Anteil einer Variante innerhalb einer Produktgruppe beträgt jeweils die Hälfte. Die gesamte Störungszeit wird mittels des Auftragshorizonts und der vorgegebenen technischen Ausfallrate  $A_{\text{T}}$  sowie der Anzahl der Maschinen ermittelt. Die geplante Betriebszeit ist die Summe aus Auftragshorizont und der gesamten Störungszeit. Aus der gesamten Störungszeit werden mittels der Gammaverteilung Stördauern ermittelt, die auf alle Maschinen gleich verteilt werden. Der Anteil der Störungszeit an der geplanten Betriebszeit gilt

für alle Maschinen innerhalb der Fertigung. Sie ist ein Maß für die Turbulenzen, die durch Maschinenausfälle entstehen können. Innerhalb eines Simulationslaufs sind die Kapazität einer Transporteinheit  $K_{TE}$ , Rüstzeit  $t_R$  und der Variantenwechselfaktor  $n_{VW}$  konstant. Die Ausprägungen der Faktoren der Fertigungsumgebung (AF) werden in Tabelle 3 illustriert.

**Tabelle 3:** Ausprägungen der Faktoren einer Fertigungsumgebung (AF)

Faktor	AF 1	AF 2	AF 3	AF 4	AF 6	AF 7
MMG	5-5-5-5-5	6-5-5-5-5	7-6-5-6-5			
$K_{TE}$	20 Stk.	50 Stk.	100 Stk.			
OF	WF	LF				
$t_R$	1 min	10 min	20 min			
$n_{VW}$	20 Stk.	50 Stk.	100 Stk.	500 Stk.	1000 Stk.	2000 Stk.
$A_T$	0%	2%	10%			

### 2.3.2 Steuerungsstruktur

In Bezug auf die Steuerungsstruktur stellen die Art der Steuerungsstruktur, das Proaktive Rüsten und die Ausfallkontrollfrequenz  $f_T$  Faktoren dar. Für Werkstattfertigungen wird zwischen einer dezentralen (D) und zwei unterschiedlichen zentralen Steuerungen unterschieden. Zum einen ist eine zentrale Steuerung ohne Neuplanung und mit Proaktivem Rüsten (nachfolgend als *ZE1C* bezeichnet) und zum anderen eine zentrale Steuerungsstruktur mit Neuplanung, aber ohne Proaktives Rüsten (nachfolgend als *ZE3A* bezeichnet) Teil der Untersuchung. In den Untersuchungen ist die Ausfallkontrollfrequenz  $f_T$  im Falle einer Neuplanung auf 1 Minute eingestellt. Die Steuerungsstrukturen, deren Abkürzungen und Eigenschaften sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tabelle 4:** Abkürzung und Eigenschaften der Steuerungen

Abk.	Organisationsform	Steuerungsstruktur	Proaktives Rüsten	Neuplanung
LF	Linie	Zentral	Ja	Nein
D	Werkstatt	Dezentral	Nein	-
ZE1C	Werkstatt	Zentral	Ja	Nein
ZE3A	Werkstatt	Zentral	Nein	Ja ( $f_T = 1$ min)

## 3 Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse für eine Faktorkombination setzen sich aus insgesamt 5 Replikationen zusammen. Für jeden Simulationslauf wurde basierend auf dem



graphisch-visuellen Verfahren nach Welch eine stationäre Phase bestimmt (Law, 2015).

### 3.1 Linie vs. Werkstatt

Eine Werkstattfertigung konnte nur in sehr wenigen Szenarien bessere Ergebnisse gegenüber der Fließfertigung hinsichtlich der Durchlaufzeit erzielen. Als beste Steuerungsvariante erweist sich an dieser Stelle die dezentrale Steuerung. Die Auswirkungen von Rüstentscheidungen sind bei Rüstzeiten von 1 Minute bzw. 10 Minuten und Bearbeitungszeiten eines Loses (zwischen 80-103 min) sehr gering. Wenn zusätzlich die technische Ausfallrate  $A_T$  sehr gering ist (0-2%), kann eine dezentral gesteuerte Werkstattfertigung im Mittel bessere Durchlaufzeiten erzielen. Die Einsatzgrenzen der Werkstattfertigung werden in Abbildung 2 durch die Einsatzgebiete der dezentrale Steuerungsstruktur (D) und der Linienfertigung (LF) illustriert.

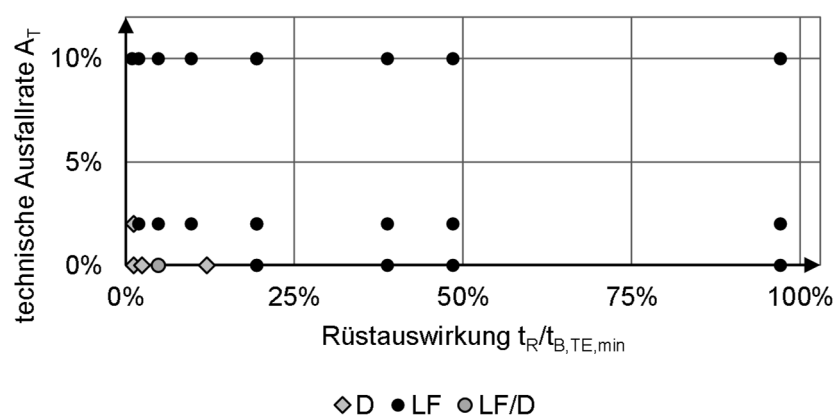


Abbildung 2: Einsatzgrenzen der Werkstattfertigung

Bei störungsfreien Simulationsläufen und einer Rüstauswirkung von 9,7 % zeigen die Ergebniswerte keinen signifikanten Unterschied. Dem Ergebniswert liegen eine Rüstzeit von 1 min und eine Losgröße von 20 Stk./TE zu Grunde. Die kleine Losgröße (20 Stk./TE) hat sich als tendenziell unvorteilhaft für die dezentrale Steuerungsstruktur herausgestellt. Durch die geringe Losgröße kommt es zu mehr Entscheidungssituationen und der Steuerungsalgorithmus neigt durch die geringe Rüstzeit zu mehr Rüstvorgängen. Dies kann an der Standardabweichung des Rüstgrads festgemacht werden, welche für die dezentrale Struktur bei 1,8 und für die Fließfertigung bei 0 liegt (ISO 22400-2). Die Kombination aus einer ausreichenden Differenz zwischen Bearbeitungszeiten von Losgrößen unterschiedlicher Produktgruppen (Bsp. 23 min), einem minimalen Verhältnis von Rüstzeiten zu Bearbeitungszeiten eines Loses (zwischen 1-1,3 %) und die Flexibilität der Werkstattfertigung, ermöglicht einen losweisen Wechsel zwischen den angesprochenen Produktgruppen (Abb. 3).

Maschinen ↓	Zeitleiste →	
Maschine 1 1.Arbeitsgang	Bearbeitung Produkt 1, Auftrag 59	Bearbeitung Produkt 1, Auftrag 64
Maschine 2 1.Arbeitsgang	Bearbeitung <b>Produkt 2</b> , Auftrag 56	Bearbeitung Produkt 3, Auftrag 65
Maschine 3 1.Arbeitsgang	Bearbeitung Produkt 3, Auftrag 60	Bearbeitung <b>Produkt 2</b> , Auftrag 61

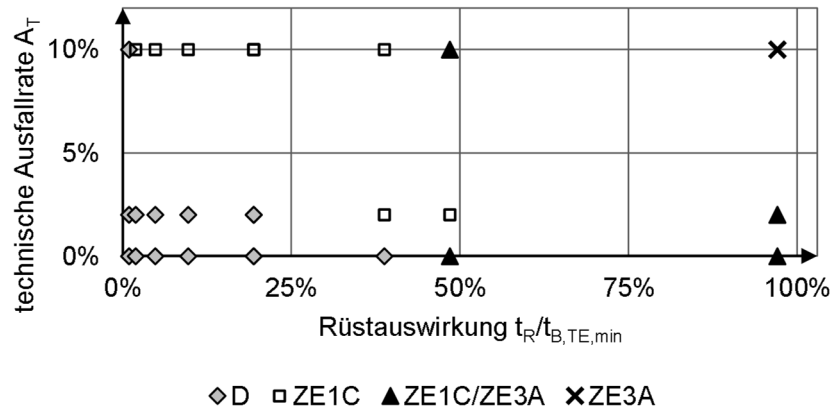
▨ Rüstvorgang

**Abbildung 3:** Ausschnitt aus Gantt-Diagramm (Faktorkombination:  $D$ ,  $t_R = 1 \text{ min}$ ,  $K_{TE} = 100 \text{ Stk./TE}$ ,  $A_T = 0 \%$ ,  $n_{vW} = 500 \text{ Stk.}$ )

Der Flexibilitätsvorteil ermöglicht einen höheren Durchsatz und damit eine geringere mittlere Durchlaufzeit aller Losgrößen. Auftretende Maschinenausfälle verändern die Entscheidungszeitpunkte und verlängern die Bearbeitungsdauer eines Loses. Dadurch wird mit zunehmender Störung der in Abbildung 3 illustrierte Vorteil unwirksam.

### 3.2 Zentral vs. Dezentral

Die dezentrale Struktur (D) erzielt gegenüber den zentralen Strukturen (ZE1C, ZE3A) bessere Durchlaufzeiten in Szenarien, in denen die Losgrößen eher groß sind ( $K_{TE} = 50\text{-}100 \text{ Stk./TE}$ ), die Rüstzeiten eher gering ( $t_R = 1 \text{ min}$ ) und die technische Ausfallrate gering ist ( $A_T = 0\text{-}2\%$ ). Für die isolierte Betrachtung von Werkstattfertigungen ergeben sich abgrenzbare Einsatzgrenzen für dezentrale bzw. zentrale Steuerungsstrukturen (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Einsatzgrenzen der Steuerungsstrukturen in der Werkstattfertigung

Es lässt sich festhalten, dass die dezentrale Struktur im Falle störungsfreier Fertigung bis zu einer Rüstauswirkung von 38,8 % Vorteile besitzt, die sich durch geringere

Rüstaufwendungen erklären. Erst darüber hinaus erzielen zentrale Steuerungsstrukturen bessere Ergebnisse. Bei einer Rüstausrückung von 97,1 % und einer technischen Ausfallrate von 10,0 % erzielt die zentrale Steuerung mit Neuplanung (ZE3A) trotz eines höheren Rüstgrads kürzere Durchlaufzeiten. Die Standardabweichung des Rüstgrads dieser Steuerung liegt bei unter 2 und die der zentralen Steuerung ohne Neuplanung (ZE1C) bei 6. Der Fertigungsbestand (WIP) gibt in diesem Fall Aufschluss über die besseren Werte für Durchlaufzeiten der Steuerung mit Neuplanung. Durch einen deutlich höheren Rüstgrad im ersten Arbeitsgang gelangt weniger Material in das Fertigungssystem (WIP = 31 TE gegenüber 61 TE). Folglich entstehen weniger Wartezeiten in nachfolgenden Operationen, wodurch die mittleren Durchlaufzeiten der Produktionsaufträge kürzer werden.

### **3.3 Parameter Maschinenmengengerüst**

Variationen des Maschinenmengengerüst haben sich in den Untersuchungen in Bezug auf die Durchlaufzeiten als nicht vorteilhaft gegenüber dem Maschinenmengengerüst einer Fließfertigung erwiesen. Insbesondere die Reduktion von Maschinen innerhalb der Arbeitsgänge führte zu deutlich längeren Durchlaufzeiten. Es konnte gezeigt werden, dass die Auslastung gegenüber der Fließfertigung durch Anpassung der Parallelmaschinen in einzelnen Arbeitsgängen zu einer Verbesserung führte. Der Nutzen der höheren Auslastung steht aber in keinem Verhältnis zu den einerseits deutlich erhöhten Durchlaufzeiten und andererseits den Investmentkosten der zusätzlichen Maschinen.

## **4 Zusammenfassung**

Es kann festgehalten werden, dass in der Untersuchung in einem Anwendungsszenario der Massenfertigung die Organisationsform der Werkstattfertigung keine signifikant besseren Ergebnisse erzielt als die Fließfertigung. Mit dem Vergleichskonzept zu Steuerungsstrukturen konnten charakteristische Einsatzgrenzen für eine dezentrale und eine zentrale Steuerungsstruktur ermittelt werden, deren Entscheidungslogik für das Zuordnungsproblem auf der gleichen Algorithmik basieren. Hinsichtlich der Parametrisierung einer zentralen Steuerung zeigte eine rollierende Neuplanung in den untersuchten Szenarien keine Vorteile. Der Vorteil des Proaktiven Rüstens zeigte in den untersuchten Bedingungen ebenfalls keinen Vorteil. Entgegen der bisher im Raum stehenden Hypothese der Robustheit von dezentralen Steuerungsstrukturen gegenüber Störungen, zeigen die Ergebnisse diesbezüglich eine starke Abhängigkeit von der Rüstausrückung und der Höhe der technischen Ausfallrate.

### **Danksagung**

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Verbundforschungsvorhabens iWePro „Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion“ im Rahmen der Fördermaßnahme „Intelligente Vernetzung in der Produktion – Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0“.

## Literatur

- Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser 2011.
- Brackel, T.v.: *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen*. Wiesbaden: Gabler 2009.
- Grundstein, S.; Schukraft, S.; Görges, M.; Scholz-Reiter, B.: Interlinking central production planning with autonomous production control. In: Marascu-Klein, V. (Hrsg.): *Advances in Production, Automation and Transportation Systems*, 2013, S. 326–332.
- Günther, W.A.; ten Hompel, M.; Krause, F.; Katterfeld, A.: U7 Lager- und Systemtechnik. In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel*. Berlin: Springer Berlin 2014, U89-U104.
- Hoogeveen, J.A.; Lenstra, J.K.; Veltman, B.: Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard. *European Journal of Operational Research* 89 (1996) 1, S. 172–175.
- ISO 22400-2: *Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management*. Genf: ISO, Januar 2014.
- Jaehn, F.; Pesch, E.: *Ablaufplanung: Einführung in Scheduling*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2014.
- Jungwattanakit, J.; Reodecha, M.; Chaovalitwongse, P.; Werner, F.: A Comparison of Scheduling Algorithms for Flexible Flow Shop Problems with Unrelated Parallel Machines, Setup Times, and Dual Criteria. *Comput. Oper. Res.* 36 (2009) 2, S. 358–378.
- Kuhn, T.: Digitaler Zwilling. *Informatik-Spektrum* 40 (2017) 5, S. 440–444.
- Law, A.M.: *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill Education 2015.
- Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016.
- Luczak, H.; Eversheim, W. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin, Heidelberg: Springer 1999.
- Niehues, M.: *Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung*. München, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2016.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Fundamentals of production logistics: Theory, tools and applications*. Berlin [u.a.]: Springer 2009.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Berlin: Springer 2012.
- Otto, F.; Uhlmann, E.: iWePro – Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion. In: Krüger, J.; Uhlmann, E.; Verl, A.; Klemm, P.; Brecher, C. (Hrsg.): *Industrie 4.0*. Düsseldorf: VDI Verlag 2016, S. 71–85.
- Ouelhadj, D.; Petrovic, S.: A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling* 12 (2008) 4, S. 417–431.
- Ramsauer, C.: *Dezentrale PPS-Systeme: Neue Strukturen bei hoher Innovationsdynamik*. Wiesbaden: Gabler 1997.
- Schmidt, M.; Fronia, P.; Fisser, F.; Nyhuis, P.: Decentralized planning and control for assembly areas driven by Gentelligent® parts. In: Helander, M. (Hrsg.): *IEEM 2007*. [Piscataway, NJ]: IEEE 2007, S. 1088–1092.

- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous processes in assembly systems. *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 712–729.
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; Beer, C. de; Jagalski, T.: Modelling and analysis of autonomous shop floor control. In: *Proceedings of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 2005, S. 1–6.
- Scholz-Reiter, B.; Rekersbrink, H.; Görges, M.: Dynamic Flexible Flow Shop Problems - Scheduling Heuristics vs. Autonomous Control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 465–468.
- Schuh, G.: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin: Springer 2006.
- Schuh, G.; Brosze, T.; Meier, C.: Gestaltung der innerbetrieblichen Produktionsplanung und -steuerung. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Berlin: Springer Vieweg 2012, S. 297–305.
- Schukraft, S.; Grundstein, S.; Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Evaluation approach for the identification of promising methods to couple central planning and autonomous control. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (2015), S. 1–24.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure VDI 3423: *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen*. Berlin: Beuth, Januar 2002.
- VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V. VDMA 66412-1: *Manufacturing Execution Systems (MES)*. Berlin: Beuth, Oktober 2009.
- Wiendahl, H.-H.: *Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld*. Heimsheim: Jost-Jetter 2002.
- Willeke, N.; Scheffermann, R.; Kuhrke, B.; Kuschicke, F.; Uhlmann, E.: Simulativer Vergleich zentraler und dezentraler Steuerungen einer Getriebefertigung. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2017: Simulative Comparison of Central and Decentralized Controls of a Transmission Production*, 2017, S. 249–258.
- Windt, K.; Becker, T.; Jeken, O.; Gelessus, A.: A classification pattern for autonomous control methods in logistics. *Logistics Research* 2 (2010a) 2, S. 109–120.
- Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.; Becker, T.: Application of the 3-component evaluation system for autonomous control in logistics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* (2010b) 224, S. 1267–1276.