

# Untersuchung der Auswirkungen von Störungen auf produktionslogistische Prozesse mittels Simulation

Investigation of the impact of disruptions on processes related to production logistics using simulation

**Nina Vojdani**  
**Björn Erichsen**

*Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Universität Rostock*

**F**orderung nach immer kundenindividuelleren Produkten und zunehmender Wettbewerbsdruck stellt produzierende Unternehmen hinsichtlich der Erfolgsdimensionen Qualität, Zeit und Kosten vor signifikante Herausforderungen. Dies führt zu komplexen Prozessen, welche eine hohe Anfälligkeit gegenüber logistischen und produktionsbezogenen Störungen aufweisen können.

Dieser Beitrag stellt eine Simulationsstudie zur Untersuchung der Auswirkungen von Störungen auf produktionslogistische Prozesse vor. Dabei werden in einer dezentral gesteuerten Produktion verschiedene Störungsszenarien abgebildet und anhand ausgewählter Leistungskennzahlen miteinander verglichen. Ziel dieser Vergleiche ist es, die Auswirkungen von Störungen auf Produktionsprozesse zu untersuchen und dadurch die jeweilige Robustheit zu bewerten.

*[Schlüsselwörter: Störungen, dezentrale Produktionssteuerung, produktionslogistische Prozesse, Simulation, Robustheit]*

**D**emand for more and more customer specific products as well as rising competitive pressure constitute a significant challenge for companies regarding the success factors quality, time and costs. As a result a high vulnerability regarding logistical or production-related disruptions can be determined.

This paper represents a simulation study to examine the impacts of disruptions on production logistics. By means of selected key performance indicators several scenarios are compared to each other. The aim of this comparison should be to analyze the effects of different disruptions on production processes and furthermore to assess the respective robustness.

*[Keywords: disruptions, decentral production control, production logistics processes, simulation, robustness]*

## 1 EINLEITUNG

Die Produktionsplanung ist ein Entscheidungsprozess zur Zuordnung der limitierten Produktionsressourcen zu verschiedenen, um diese konkurrierenden Aufträge, um die Produktionsziele kurze Durchlaufzeiten, geringe Bestände, hohe Termintreue usw. zu erreichen.

Während des Produktionsprozesses ist die termingerechte Lieferung der Teile und Baugruppen ein entscheidender Faktor zur Fortführung der Produktion. Eine Störung eines Prozessschrittes aufgrund eines unvorhergesehenen Ereignisses kann zu verheerenden Auswirkungen auf die Produktivität der Produktion, wie z.B. reduzierter Durchsatz und Lieferverspätungen, führen. Einige Aufträge erreichen die Maschinen früher, einige später als geplant, wodurch die Anwendung des Plans in der neuen Situation hinfällig wird und zu einer verminderten Leistung der Produktion führt. Der Originalplan wird obsolet und Umplanungen werden zur Tagesordnung.

Ziel des Beitrags ist die Vorstellung einer am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik (LPL) der Universität Rostock durchgeführten Simulationsstudie zur Untersuchung der Auswirkungen von Störungen auf produktionslogistische Prozesse. Anhand ausgewählter Leistungskennzahlen werden verschiedene Störungsszenarien in einer dezentral gesteuerten Produktion abgebildet und deren Auswirkungen auf die Produktionsergebnisse untersucht sowie die jeweilige Robustheit bewertet.

## 2 PROBLEMSTELLUNG

Produktionssteuerungssysteme lassen sich hinsichtlich ihrer Aufgabenverteilung innerhalb des Produktionssystems nach zentraler und dezentraler Organisationsform differenzieren [Paw07]. Wesentliches Merkmal der zentralen Steuerung ist, dass alle bei den Produktionsstellen zu treffenden Entscheidungen über die Festlegung der Fertigungsaufträge bis hin zur Bestimmung der Start- und End-

termine der einzelnen Arbeitsvorgänge zentral getroffen werden [Cor98]. Die Aufgaben der einzelnen Produktionsstellen werden damit auf die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen, die eigentlichen Produktionstätigkeiten und die Rückmeldung von Ist-Daten beschränkt. Beim Auftreten von unerwarteten Ereignissen bzw. Abweichungen von Planvorgaben ist das zentrale PPS-System in der Verantwortung, entsprechende Anpassungsmaßnahmen einzuleiten. Dieser Aufgabenbereich legt aber eine kontinuierliche Informationsaktualisierung bezüglich der realen Systemzustände der Produktionsstellen zugrunde [Cor98]. Vorteile der zentralen Steuerung liegen in der Möglichkeit zur zentralen Koordination aller Bereiche, welche als Grundlage für globale Optimierungsbestrebungen genutzt werden kann [Paw07]. Dies bedingt jedoch einen hohen Steuerungsaufwand sowie zielführende Optimierungsalgorithmen mit polynomieller Laufzeit [Hol96]. Veränderte Marktanforderungen, unter anderem bezüglich hoher Kundenorientierung und kurzer Lieferzeiten, sorgen für ein turbulentes Unternehmensumfeld mit sich daraus ergebenden dynamisch komplexen Prozessen der Produktion und Logistik [Win06]. Zentral ausgerichtete Steuerungsmethoden und -systeme weisen Schwächen im Umgang mit solch dynamisch komplexen Prozessen auf. [Zel98] spricht in diesem Zusammenhang unter anderem von einem Steuerungsdefekt. Neben starken, kurzfristigen und oftmals unvorhersehbaren Nachfrageschwankungen treten innerbetriebliche Störungen logistischer oder produktionsbezogener Art auf, welche bei zentralen PPS-Systemen sogenannte Planungsnervosität hervorrufen. Konventionelle Kompensationsmechanismen führen dabei oft zu einer hohen Puffergröße bzw. Platzbedarf.

Vor dem Hintergrund steigender Herausforderungen in Produktion und Logistik sind statt hierarchisch und zentral organisierte Produktionsplanung und -steuerung intelligente und dezentrale Produktionssteuerungsmethoden einzusetzen, um effizienter auf unvorhergesehene Ereignisse in der Produktion reagieren zu können. Die dezentrale Steuerung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Aufgabe der Produktionsfeinplanung und -steuerung auf mindestens zwei Organisationseinheiten aufgeteilt werden [Cor98]. Dabei können Produktionsstellen selbst als Organisationseinheit agieren, deren Aufgabenfelder auch die Maschinenbelegung und eigenständige Auftragsfreigaben beinhalten. Die Verteilung von Kompetenzen auf mehrere Produktionsstellen birgt in Hinblick auf dynamisch komplexe Prozesse in der Produktion und Logistik einige Vorteile. Die dezentrale Organisation ermöglicht eine zeitnahe Steuerung der Produktion und Logistik, wodurch unmittelbar auf Störungen reagiert werden kann. Dezentrale Entscheidungsfindung und kurzfristige Anpassungsmaßnahmen bei Störungen führen zu einer höheren Robustheit des Gesamtsystems und sorgen für eine reduzierte Planungsnervosität im Vergleich zu zentralen PPS-Systemen [Win06].

### 3 KLASSEIFIKATION VON STÖRUNGEN

Für den Begriff „Störung“ findet sich in der Literatur eine Vielzahl von Definitionen. Nach REFA sind Störungen Ereignisse, die „unerwartet eintreten und eine Unterbrechung oder zumindest Verzögerung der Aufgabendurchführung zur Folge“ haben [REF85]. [Hei94] beschreibt Störungen als „zeitlich befristete Zustände der Wertschöpfungskette, in denen durch das Einwirken von Störgrößen auf die Produktionsfaktoren und deren Kombinationsprozess eine unmittelbar festgestellte Abweichung vom optimalen Prozessverlauf oder dessen Ergebnis entsteht“. Folgende Merkmale werden dem Störungsbegriff zugrunde gelegt:

- der zeitliche Verlauf der Störung
- der crossfunktionale Charakter über die gesamte Wertschöpfungskette
- die Ursache-Wirkungskette einer Störung, mit einer Störgröße als auslösendes Ereignis
- die Berücksichtigung von Prozessverlauf und -ergebnis in Bezug auf die Störungsauswirkung
- die unmittelbare Störungserfassung und Abweichungsfeststellung

Nach [Bra09] können Störungen in deterministische und stochastische Störungen unterteilt werden. Bei deterministischen Störungen handelt es sich um Störungen, die den Produktionsablauf geplant unterbrechen, wie z.B. vorbeugende und geplante Instandhaltung. Die stochastischen Störungen sind Störungen, die unvorhergesehen zu einer Unterbrechung der Produktion führen. In diesem Beitrag werden ausschließlich stochastische Störungen betrachtet. Diese können in zwei Kategorien klassifiziert werden:

- Störungen der Produktionsressourcen, wie Maschinenausfälle, Personalabwesenheit, Nichtverfügbarkeit von Werkzeugen
- Auftragsbezogene Störungen, wie Eilaufträge, Auftragsstornierungen, Prioritätsänderungen, Nacharbeit, Fehlerhaft kommissioniertes Material

[Gre70] definiert Störgrößen als zufällig auf das System wirkende Größen, welche Abweichungen geplanter Prozessabläufe und -ergebnisse verursachen.

Die Literatur bietet eine Vielzahl von Störungsklassifizierungen, wie z.B. extern und intern induzierte Störungen, eine Klassifizierung nach der Art der Störgröße [Gre70] sowie Primär- und Sekundärstörungen [Sch04].

#### 4 ROBUSTHEIT IN PRODUKTION UND LOGISTIK

Damit Anlagen und Systeme auch bei schwankender Last und Störungen über ausreichend Leistungsfähigkeit verfügen, muss eine entsprechende Robustheit vorhanden sein. Eine eindeutige Definition für den Robustheitsbegriff im logistischen Bereich ist kaum vorhanden. Die verschiedenen Definitionen weichen jedoch nicht maßgeblich voneinander ab, so dass sich ein allgemeines grundsätzliches Verständnis ableiten lässt [HSS16]. Laut [Sch92] ist Robustheit im Allgemeinen die Unempfindlichkeit eines Systems oder einer Strategie gegenüber stochastischen Störungen. Zusammenfassend kann Robustheit als Eigenschaft eines Systems verstanden werden, welche den Grad der systemimmanenten Fähigkeit darstellt, ungeplante Veränderungen der Leistungsanforderung möglichst vollständig zu erfüllen [HSS16]. [Sch01] unterscheidet sechs verschiedenen Arten von Robustheit.

- Ergebnisrobustheit: Das Erreichen bzw. nur mit geringfügigen Abweichungen Erreichen oder Überschreiten eines für ein Ziel gesetztes Anspruchsniveau in jedem Szenario.
- Optimalitätsrobustheit: das Ergebnis weicht für den Großteil der Szenarien nur geringfügig von deren Optimalwert ab.
- Informationsrobustheit: der Plan ist auch im Falle anderer, nicht berücksichtigter Szenarien durchführbar.
- Bewertungsrobustheit: ein Plan ist unempfindlich gegenüber unscharfen Bewertungsansätzen, wie Nutzwerten oder Zielgewichten.
- Zulässigkeitsrobustheit: ein Plan ist für jedes bzw. fast jedes Szenario ohne ungeplante Anpassungsmaßnahmen durchführbar.
- Planungsrobustheit: ein Plan ist ungeachtet des dynamischen Systems auch im späteren Zeitverlauf stabil und muss nicht angepasst werden.

[Bra09] schlägt folgende einfache Methode zur Robustheitsprüfung vor: Die Betrachtung der Schwankungen des Zielfunktionswertes unter Störungseinwirkungen. Bei großen Abweichungen ist dies ein Indiz auf ein instabiles bzw. nicht robustes Systemverhalten. In der Literatur finden sich zahlreiche weitere Methoden zur Analyse von Robustheit. Im Rahmen dieses Beitrags wird die Robustheit gegenüber Störungen durch Abweichungen des Zielfunktionswertes und des Ist-Wertes gemessen.

#### 5 EINGESETZTE METHODEN

Gegenstand der hier vorgestellten Simulationsstudie ist die Untersuchung der Auswirkungen von Störungen in einer dezentral gesteuerten Montage. Dabei wird die Montage nach dem Werkstattprinzip organisiert. Die Werk-

stattfertigung bzw. -montage ist ein Produktionskonzept, wobei die Arbeitssysteme nach dem Funktions- oder Ver richtungsprinzip als räumliche Zusammenfassung von funktionsgleichen Betriebsmitteln angeordnet sind.

Die eingesetzten Betriebsmittel können für die Herstellung mehrerer verschiedenartiger Produkte verwendet werden [KGJ06]. Die Materialströme in der Werkstattfertigung verlaufen ungerichtet in unterschiedlichen Richtungen zwischen den Arbeitssystemen [Eve02]. Oft gestaltet es sich als schwierig die Arbeits- und Transportvorgänge in der Werkstattfertigung aufeinander abzustimmen. Dies kann zu Unter- und Überlastungen von Arbeitssystemen führen, wodurch lange Warte- und Durchlaufzeiten für die Aufträge entstehen können.

Im Hinblick auf eine kundenauftragsorientierte Produktion weist das Werkstattprinzip jedoch entscheidende Vorteile durch seine hohe Flexibilität auf und eignet sich daher besonders für die Produktion von Einzel- und Kleinserien [JB99].

In diesem Beitrag handelt es sich um ein dynamisch stochastisches Werkstattssystem, wobei während des Produktionsablaufs unvorhersehbare Störungen auftreten. In den letzten Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Methoden zur Ablaufplanung in der Werkstattfertigung entwickelt. Begründet durch die Komplexitätstheorie eignen sich Verfahren, welche optimale Ablaufpläne generieren, jedoch kaum für die praktische Anwendung. Heuristische Verfahren liefern Auftragsfolgen, die solange Gültigkeit haben, bis ein unerwartetes Ereignis auftritt. Zur Steuerung dynamisch stochastischer Systeme ist der Einsatz dezentraler Steuerungsverfahren vielversprechend. Bei der dezentralen Steuerung eines mehrstufigen Werkstattsystems wird ein M-stufiges Werkstattsteuerungsproblem als eine Menge von M einstufigen Reihenfolgeplanungsproblemen abgebildet. Diese Reihenfolgeplanungsprobleme besitzen eine gegenseitige Abhängigkeit und werden dezentral betrachtet [Hol96]. Die in den Teilsystemen auf ihre Bearbeitung wartenden Aufträge werden entsprechend einer bestimmten Regel Prioritäten zugewiesen. Anhand der Prioritäten wird die Abarbeitungsreihenfolge der Aufträge bestimmt [Hol96]. In der Literatur ist eine große Auswahl an Prioritätsregeln verschiedener Art zu finden. Der isolierte Einsatz von Prioritätsregeln kann für die einzelnen Stationen generell eine gute Auftragsreihenfolge generieren, welche aber nicht zwingend einen guten Ablaufplan für das Gesamtsystem bedeutet. Besonders unter dem Einfluss von Störungen können isolierte Prioritätsregeln zu unwirtschaftlichen Auftragsreihenfolgen führen. Damit das Werkstattssystem mit einer am Gesamtoptimum orientierten Steuerung betrieben werden kann, sollten die dezentralen Steuerungen der Teilsysteme zielorientiert koordiniert werden. Dafür eignen sich spezielle Koordinationsmechanismen, welche nach bestimmen Vorgehensweisen Einfluss auf die Prioritätsregeln der einzelnen Teilsysteme nehmen können [Hol96]. In diesem

Beitrag werden die Teilsysteme der Werkstattmontage mittels Due-Date-Regeln gesteuert. Die Due-Date-Regeln werden mit dem Koordinationsverfahren „vorausschauende Auftragsnachfrage (VANF)“ koordiniert. [Hol96] hat dieses Verfahren zur zielorientierten Koordination von Auftragsreihenfolgeentscheidungen in Werkstattfertigungssystemen entwickelt. In der hier vorgestellten Simulationsstudie wird der Ansatz dieses Verfahrens auf ein Montageszenario angewandt. Aufgrund der höheren Komplexität der Materialflüsse bei der Montage im Vergleich zur Fertigung musste das Verfahren entsprechend angepasst werden. Der Ablauf des VANF-Verfahrens ist in [Hol96] beschrieben.

## 6 SIMULATIONSMODELL UND BEWERTUNG

Das entwickelte Simulationsmodell wurde mit der ereignisdiskreten Simulationssoftware Plant Simulation erstellt. Die abgebildete Werkstattmontage besteht aus fünf unterschiedlichen Arbeitssystemen. Die Systemgrenze des Modelles bilden Quelle und Senke. Über die Quelle werden Aufträge zeitlich kontinuierlich in die Werkstatt eingelastet. Dabei stellen die Aufträge die Flussobjekte des Simulationsszenarios dar. Jeder Auftrag der in die Werkstatt eingelastet wird, bekommt eine zufällige Bearbeitungsreihenfolge zugeteilt. Dadurch entsteht eine entsprechend hohe Variantenvielfalt unter den Produkten. Entsprechend ihrer zugeteilten Bearbeitungsreihenfolge ordnen sich die Aufträge im Wartebereich des jeweiligen Arbeitssystems ein und werden dort anhand ihrer Liefertermine sortiert und abgearbeitet. Jedes Mal wenn ein neuer Auftrag bei einem Arbeitssystem eintrifft, wird die Abarbeitungsreihenfolge in dessen Wartebereich neu geordnet. Nachdem die Aufträge vom jeweiligen Arbeitssystem bearbeitet wurden, werden sie zum nachfolgenden Arbeitssystem gebracht. Die Transportzeiten und die Verfügbarkeit von Transportmitteln werden in der Simulation vernachlässigt. Hat ein Auftrag entsprechend seiner Bearbeitungsreihenfolge alle Arbeitssysteme durchlaufen, verlässt dieser durch die Senke die Werkstatt. Damit ist die Bearbeitung des jeweiligen Auftrags abgeschlossen. Zusätzlich zu den Prioritätsregeln an den Arbeitssystemen wird das Werkstattsszenario durch das VANF-Verfahren koordiniert.

Beim Eintreten einer Störung in der Werkstatt wird eine Störungsreaktionsregel (SR) verwendet, die ähnlich dem VANF-Verfahren auf vorausschauendes Handeln basiert [Hol96]. Beim Einsatz der Störungsregel überprüft ein Arbeitssystem, ob das laut Bearbeitungsreihenfolge anschließend zu durchlaufende Arbeitssystem des aktuellen Auftrags gestört ist. Ist dies der Fall, erfolgt eine Auftragsrückstellung und der nächste Auftrag in der Warteschlange, dessen nachfolgend zu durchlaufendes Arbeitssystem nicht gestört ist, wird stattdessen bearbeitet. Durch dieses Verfahren wird verhindert, dass Aufträge bearbeitet werden, die anschließend zu Arbeitssystemen

transportiert werden, welche gestört sind und dort temporär keine weitere Bearbeitung stattfinden kann. Ein Auftrag wird an einem Arbeitssystem so lange zurückgestellt, bis das anschließend zu durchlaufende Arbeitssystem wieder entstört wurde. Störungen an einem Arbeitssystem können vielfältige Ursachen haben. Für das Simulationsszenario ist entscheidend, dass am Arbeitssystem für eine bestimmte Zeitspanne kein Auftrag bearbeitet werden kann. Eine andere Art von Störungen, die im Simulationsmodell auftreten können, sind solche, die sich auf einzelne Aufträge beziehen. Solche Störungen entstehen in der Praxis beispielsweise durch fehlerhafte Materialbereitstellung, wodurch ein Auftrag nicht bearbeitet werden kann. In diesem Fall wird der Auftrag ebenfalls zurückgestellt und erst bearbeitet, wenn die entsprechende Störung behoben wurde. Der Auftrag hat durch die Rückstellung zwar Zeit verloren, erhält aber eine hohe Priorität und wird im Wartebereich nachfolgenden Arbeitssystemen entsprechend vorgezogen, um den Liefertermin einhalten zu können. Dadurch ist es im Simulationsszenario für einige Aufträge möglich, störungsbedingte Zeitverluste zu kompensieren.

Nachfolgend werden einige Auswertungen der Simulationsläufe präsentiert, anhand derer Störungsauswirkungen aufgezeigt werden. Des Weiteren soll durch die Abbildung der Schwankungen von Zielfunktionswerten bzw. Soll-Verläufen die Robustheit der Werkstattsteuerung sowie den eingesetzten Störungsreaktionsregeln bewertet werden. In allen Szenarien erfolgt die Simulation mit einer festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeit von Störungen. Dabei werden je festgelegter Störungseintrittswahrscheinlichkeit Simulationsläufe mit und ohne Verwendung von Störungsreaktionsregeln durchgeführt.

In Abbildung 1 erfolgt der Vergleich sieben verschiedener Szenarien. In einem Referenzszenario wird ohne stochastische Einflüsse von Störungen simuliert und die durchschnittliche Durchlaufzeit aller Aufträge als Leistungs-Kennzahl ermittelt.

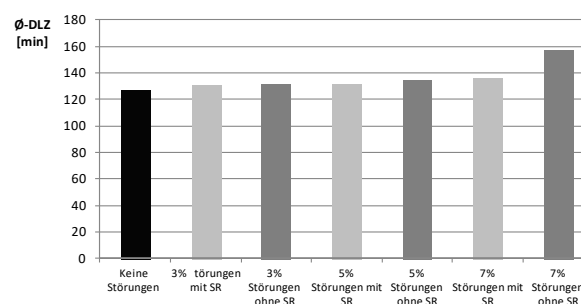


Abbildung 1. Durchlaufzeit verschiedener Szenarien

Bei geringen Störungsaufkommen weisen die Messwerte ein nahezu identisches Ergebnis im Vergleich zu einem störungsfreien Szenario auf. Bei einem Störungsaufkommen von 7 Prozent führen Störungsreaktionsregeln zu

einer deutlichen Verbesserung im Vergleich zu einem Szenario ohne den Einsatz von Störungsreaktionsregeln.

Abbildung 2 illustriert die Störungsauswirkungen auf die Auslastung der fünf eingesetzten Arbeitssysteme. Dabei zeigt sich, dass der Einsatz von Störungsreaktionsregeln zu einer Verbesserung der Auslastung führen kann.

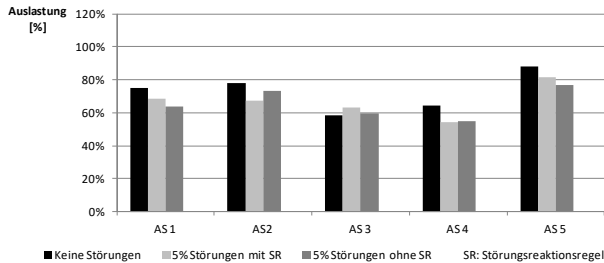


Abbildung 2. Auslastung der Arbeitssysteme bei verschiedenen Szenarien

Der Verzicht auf Störungsreaktionsregeln bewirkt beim Arbeitssystem 2 eine leichte Erhöhung der Auslastung im Vergleich zur Verwendung einer Störungsreaktionsregel. Dies lässt sich durch die Wechselwirkungen innerhalb des Systems begründen.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf des gesamten Bestandes im System bei verschiedenen Simulationsszenarien. Die Bestandsverläufe beider störungsinduzierter Szenarien schwanken um den Soll-Verlauf. Der Einsatz von Störungsreaktionsregeln führt abschnittsweise zu einem besseren Bestandsverlauf. Es zeigt sich, dass der durchschnittliche Bestand unter Verwendung von Störungsreaktionsregeln um 5,13 Prozent und ohne deren

Verwendung um 13,85 Prozent über den durchschnittlichen Bestand des störungsfreien Szenarios liegt.

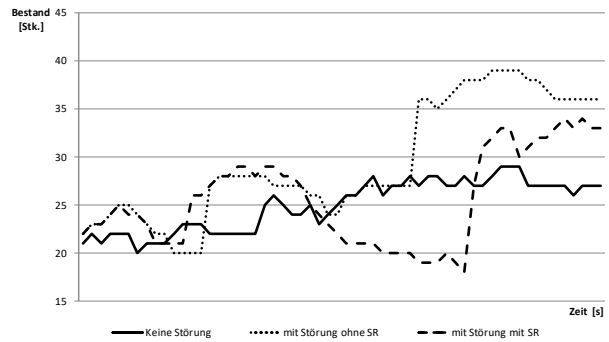


Abbildung 3. Bestandsverlauf verschiedener Szenarien

In Abbildung 4 werden die Abweichungen der Ist-Fertigstellungstermine der Aufträge von den Soll-Fertigstellungsterminen dargestellt. Es ist zu beobachten, dass unter Verwendung von Störungsreaktionsregeln die Abweichungen von den Soll-Werten weniger stark ausgeprägt sind. Die ermittelte Termintreue für das störungsinduzierte Szenario, in dem keine Störungsreaktionsregeln verwendet werden, beträgt ca. 67 Prozent, wo hingegen unter Einsatz von Störungsreaktionsregeln eine Termintreue von 77 Prozent zu verzeichnen ist. Die Termintreue ist eine relative Kennzahl und wird durch das Verhältnis von pünktlich gefertigten Aufträgen zu Gesamtzahl der Aufträge gebildet. Bei der Berechnung der Termintreue wurde eine definierte Termintoleranz berücksichtigt. Es zeigt sich für das betrachtete Szenario, dass durch Verwendung von Störungsreaktionsregeln ein robusteres Systemverhalten erzielt werden konnte.

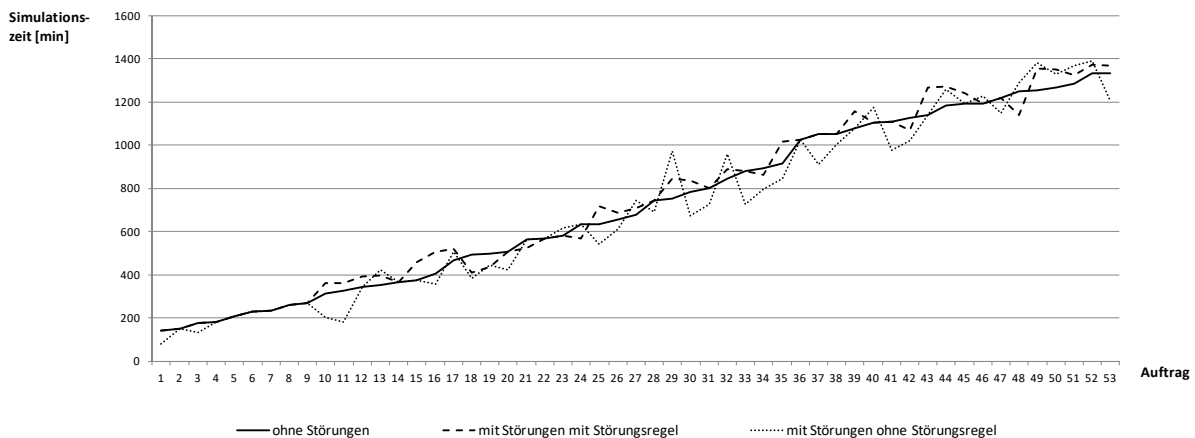


Abbildung 4. Zeitlicher Verlauf der fertiggestellten Aufträge

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurden anhand eines Werkstatt-szenarios verschiedene störungsinduzierte Szenarien mittels Simulation miteinander verglichen und deren Auswirkungen untersucht. Die Untersuchungen bezogen sich insbesondere auf das Systemverhalten unter dem Einsatz von Störungsreaktionsregeln. Dabei haben einige Messungen gezeigt, dass je nach Störungseintrittswahrscheinlichkeit der Einsatz von Störungsreaktionsregeln zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Untersuchungen der störungsbedingten Wechselwirkungen innerhalb der Produktion bieten Raum für weitere Forschungen auf diesem Gebiet.

### LITERATUR

- [Bra09] van Brackel, T.: *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme*. Dissertation. Universität Paderborn. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2009.
- [Cor98] Corsten, H.: *Dezentrale Produktionsplanung- und -steuerungs-Systeme*. Stuttgart: Verlag Kohlhammer, 1998.
- [Eve02] Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik. Band 3: Arbeitsvorbereitung*. Berlin: Springer, 2002.
- [Gre70] Greve, J.: *Störungsmanagement im Industriebetrieb - Eine klassifizierende Untersuchung der Störungen des Störverhaltens betrieblicher Systeme unter Anwendung kybernetischer Betrachtungsweise*. Dissertation. TU Darmstadt. 1970.
- [Hei94] Heil, M.: *Entstörung betrieblicher Abläufe*. Dissertation. TU München. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1994.
- [Hol96] Holthaus, O.: *Ablaufplanung bei Werkstattfertigung - Simulationsgestützte Analyse von Steuerungs- und Koordinationsregeln*. Dissertation. TU Ilmenau. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1996.
- [HSS16] Hammel, C.; Schulze, F.; Schmidt, T.: *Robustheit intralogistischer Anlagen*. In: *Logistics Journal* (2016)
- [JB99] Jahnke, H.; Biskup, D.: *Planung und Steuerung der Produktion*. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1991.
- [KGJ06] Kummer, S.; Grün, O.; Jammernegg, W.: *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. München: Pearson Studium, 2006.
- [Paw07] Pawellek, G.: *Produktionslogistik*. München: Hanser, 2007.
- [REF85] REFA Bundesverband e.V.: *Methodenlehre der Planung und Steuerung*. 4. Auflage, München: Hanser, 1985.
- [Sch92] Schneeweiß, C.: *Konzepte der Prozess- und Modellgestaltung*. Berlin: Springer Verlag, 1992.
- [Sch01] Scholl, A.: *Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen – Konzepte und Methoden – experimentelle Untersuchungen*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001.
- [Sch04] Schwartz, A.: *Störungsmanagement in Produktionssystemen*, Aachen: Shaker, 2004.
- [Win06] Windt, K.: *Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik*. Selbstorganisation - Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft, Köln: Verlag Böhlau, 2006.
- [Zel98] Zelewski, S.: *Multi-Agenten-Systeme – ein innovativer Ansatz zur Realisierung dezentraler PPS-Systeme*. Innovationen in der Produktionswirtschaft – Produkte, Prozesse, Planung und Steuerung, München, 1998, S.133-166.

---

**Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani** ist Lehrstuhlinhaberin des Lehrstuhls für Produktionsorganisation und Logistik an der Universität Rostock.

**Björn Erichsen, M.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik an der Universität Rostock.

Adresse:  
Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik, Universität Rostock, Richard-Wagner-Str. 31, 18119 Rostock, Deutschland  
Tel: +49 381 498-9250, Fax: +49 381 498-9252  
E-Mail: lpl@uni-rostock.de