

# **Einfluss von zuverlässig prognostizierten Stillstandzeiten auf die simulationsbasierte Priorisierung von Maschinenstillständen in komplexen Produktionssystemen**

## ***Influence of Reliably Predicted Downtime on the Simulation-Based Prioritization of Machine Breakdown in Complex Production Systems***

Michael Hegemann, Daimler AG, Stuttgart (Germany),  
michael.hegemann@daimler.com

Stefan Nickel, Institut für Operations Research, Diskrete Optimierung und Logistik,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe (Germany),  
stefan.nickel@kit.edu

**Abstract:** In this paper, the advantages of considering downtimes provided by predictive maintenance systems when prioritizing machine breakdowns are demonstrated. A simulation-based optimization approach is presented, with which complex production systems can be modelled and the order of prioritization can be determined taking into account reliably predicted downtimes. The presented approach enables the production employees to react immediately to output-relevant machine breakdowns and to proactively reduce the effects of future downtimes.

## **1 Einleitung**

Produzierende Unternehmen sind durch die Globalisierung einer erhöhten Wettbewerbsintensität ausgesetzt (Pawellek 2016). Die Unternehmen reagieren darauf mit der zunehmenden Individualisierung ihrer Produkte, was zu einer steigenden Variantenvielfalt und damit zu einem größeren Produktportfolio führt. Gleichzeitig werden die Produktlebenszyklen immer kürzer (Hotz 2007). Infolge der steigenden Produktkomplexität nimmt ebenfalls der Komplexitätsgrad von Produktionssystemen stetig zu, wodurch ein wirtschaftlicher Betrieb dieser kapitalintensiven Systeme nur durch eine hohe Auslastung erreichbar ist (Gopalakrishnan und Skoogh 2018; Strunz 2012).

Während der Produktionszeit auftretende Maschinenstillstände, bedingt beispielsweise durch technische Störungen, führen bei stark ausgelasteten Produktionssystemen zu hohen Produktionsverlusten (Kröning und Denkena 2013). Wie Skoogh et al. (2011) feststellen, betreffen Stillstände dabei nicht nur die jeweiligen

Maschinen, sondern wirken sich auch auf weitere Produktionsressourcen des Produktionssystems aus. Zusätzlich verstärkt wird die Auswirkung von Stillständen durch die zunehmend geringere Anzahl an Beständen in Produktionssystemen infolge der Umsetzung von Organisationsstrukturen wie Lean Production und Just-in-Time-Produktion (Pawellek 2016).

Komplexe Produktionssysteme bestehen meistens aus mehreren Produktionsressourcen (z. B. Bearbeitungsmaschinen und Fördermittel). Wie Wedel (2016) ausführt, besteht dadurch die Möglichkeit, dass zeitgleich Stillstände an mehreren Ressourcen auftreten. Solange ausreichend zuständiges Personal zur Stillstandbehebung zur Verfügung steht, ist keine Bestimmung einer Priorisierungsreihenfolge erforderlich. Allerdings steht in der Praxis zur Behebung der Stillstände nur eine begrenzte Anzahl an Produktionsmitarbeitern zur Verfügung, sodass eine objektive Priorisierung der Stillstände nach ihrer jeweiligen Auswirkung auf das Produktionssystem wichtig ist. Durch dieses Vorgehen wird die Reaktionszeit auf die schwerwiegendsten Stillstände reduziert, sodass Produktionsverluste aufgrund von Wartezeiten nachhaltig minimiert werden.

Predictive Maintenance bzw. die zustandsorientierte, vorausschauende Instandhaltung ermöglicht als Bestandteil von Industrie 4.0 die Prognose von Maschinenstillständen (Zhai und Reinhart 2018). Durch die zunehmende Anzahl an Systemen zur Zustandsüberwachung und -diagnose ist es heute möglich, den aktuellen Zustand von Produktionsmaschinen durch moderne Anlagen- und Messtechnik präzise zu erfassen (VDI 1997). Auf Basis dieser Daten sollen mit Predictive Maintenance Systemen schließlich Instandhaltungsbedarfe und damit notwendige Stillstandzeiten vor dem plötzlichen Stillstand einer Maschine zuverlässig prognostiziert werden. Zukünftige Stillstände, die durch einen festen Stillstandeintrittszeitpunkt und eine feste Stillstanddauer, wobei der Eintrittszeitpunkt in der Zukunft liegt, charakterisiert sind, liegen dabei nicht nur im Rahmen von Predictive Maintenance vor. Auch durch geplante Stillstände, wie beispielsweise Stillstände aufgrund präventiver Instandhaltungsmaßnahmen oder durchzuführender Werkzeugwechsel, ergeben sich Informationen über zukünftige Stillstände.

In diesem Beitrag soll nun untersucht werden, inwiefern zuverlässig prognostizierte bzw. geplante zukünftige Stillstandzeiten die Priorisierung von Maschinenstillständen in komplexen Produktionssystemen beeinflussen. Nach einem kurzen Überblick über den Stand der Technik wird anhand eines – zwei Maschinen ein Puffer Systems – der Einfluss zukünftiger Stillstände nachvollziehbar aufgezeigt. Ferner wird ein Ansatz für ein simulationsbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt, mit dem zukünftige Stillstände bei der Bestimmung der Priorisierungsreihenfolge für komplexe Produktionssysteme berücksichtigt werden können, sodass die Auswirkungen zukünftiger Stillstände proaktiv vermindert werden können. Abschließend wird auf die Bestimmung der Simulationszeit als eine Maßnahme zur Reduzierung des Simulationsaufwandes eingegangen, wodurch die Zeit bis zur Entscheidungsfindung minimiert werden soll.

## **2 Stand der Technik**

In der Praxis wird für die Priorisierung anliegender Stillstände in der Regel ein subjektives Verfahren, basierend auf Expertenerfahrung, Expertenwissen oder Intuition, angewendet (Guo et al. 2013).

Wissenschaftliche Arbeiten in diesem Forschungsgebiet setzen sowohl analytische als auch simulationsbasierte Methoden zur Priorisierung ein. Neben der Anwendung von statischen Prioritätsregeln wie beispielweise First-Come-First-Serve (FCFS), Longest-Repair-Time (LRT) oder der Verknüpfung der Priorisierung mit einer statisch ermittelten Risikoprioritätszahl sind dies vor allem Methoden zur Engpassermittlung (Mosley et al. 1998; De Carlo et al. 2013). Dabei wird die Priorisierung der Maschinenstillstände anhand der Engpassreihenfolge durchgeführt. Li et al. (2009a) stellen eine Engpassmethode vor, die durch Verwendung von Zustandsaufzeichnungen der Blockier- und Wartezustände von Maschinen sowie der Pufferfüllstände die Bestimmung von Kurzzeit- wie auch Langzeit-Engpässen ermöglicht. In Li et al. (2009b) wird diese Engpassmethode aufgegriffen und für ein Entscheidungsunterstützungssystem verwendet, welches sowohl Maschinenstillstände priorisiert als auch präventive Instandhaltungsmaßnahmen steuert. Ein Vergleich der Priorisierungsreihenfolge basierend auf statischen sowie dynamisch bestimmten Engpässen führen Langer et al. (2009) durch. Wedel (2016) hat eine Priorisierungsmethode für Maschinenstillstände hergeleitet, die auf der Bestimmung von Echtzeit-Engpässen und Engpässen in naher Zukunft beruht.

Die meisten analytischen Ansätze spiegeln allerdings aufgrund ihrer zugrunde liegenden Annahmen die Gegebenheiten komplexer Produktionssysteme nicht ausreichend wider. Die Komplexität entsteht bei diesen Systemen nicht nur durch eine große Anzahl an Produktionsressourcen (z. B. Bearbeitungsmaschinen oder Förderstrecken) sowie durch mehrstufige Prozessketten und redundante Prozessstufen, sondern vor allem durch die zeitliche Abhängigkeit von Logistik-, Produktions- und Informationsprozessen (Dynamik) (Kröning 2013). Der Einsatz der ereignisdiskreten Simulation ermöglicht hier im Gegensatz zu statischen analytischen Methoden eine hinreichende Abbildung dieser Dynamik und damit der gesamten Komplexität von Produktionssystemen.

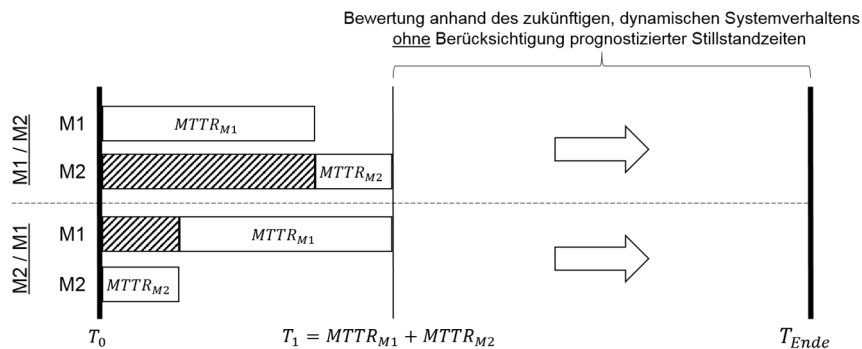
Einen simulationsbasierten Ansatz stellen Guner et al. (2015) vor. In dieser Arbeit werden die Maschinenstillstände sowohl anhand der zu Schichtbeginn simulationsbasiert bestimmten Engpässe als auch der Engpässe der letzten Schicht priorisiert. Yang et al. (2007) leiten einen Ansatz her, der Online-Daten des Produktionssystems, wie Maschinenzustände und Pufferfüllstände, verwendet und die Priorisierung von Maschinenstillständen über ein Reihenfolgenproblem löst.

Die Analyse wissenschaftlicher Ansätze zeigt, dass es bisher keine wissenschaftliche Arbeit gibt, die den Einfluss zukünftiger Stillstandzeiten auf die Priorisierungsreihenfolge von Maschinenstillständen untersucht.

### **3 Simulationsbasierter Ansatz zur Priorisierung von Maschinenstillständen**

Unter der Annahme, dass zeitlich parallel anliegende Stillstände nur sequentiell behoben werden können, haben Yang et al. (2007) in ihrer Arbeit eine Vorgehensweise vorgestellt, durch die die zu priorisierenden Stillstände in ein Reihenfolgenoptimierungsproblem transformiert werden können. Diese Formulierung als zu lösendes Reihenfolgenproblem soll im Folgenden aufgegriffen werden. In Abbildung 1 ist ein sich daraus ergebender Ansatz am Beispiel zweier zu priorisierender Maschinenstillstände M1 und M2 dargestellt. Als Reparaturdauer

werden die statistisch ermittelten „Mean Time To Repair“ (MTTR) Werte für die jeweiligen Maschinen angenommen, wobei bei entsprechender Datenlage stillstandspezifische MTTR Werte die Genauigkeit steigern können.



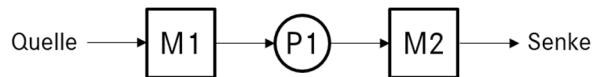
**Abbildung 1:** Simulationsbasierter Ansatz zur Priorisierung von Maschinenstillständen ohne Berücksichtigung zukünftiger Stillstandzeiten für ein zwei Maschinen ein Puffer System

Für die zu priorisierenden Stillstände an den Maschinen M1 und M2 ergeben sich

$$n! = 2! = 2 \quad (1)$$

(mit  $n$  = Anzahl anliegender Stillstände) mögliche Reihenfolgen. Bei der Reihenfolge M1/M2 wird zunächst der Stillstand der Maschine M1 behoben. Nach der Reparaturdauer  $MTTR_{M1}$  kann Maschine M1 wieder produzieren und der Stillstand an Maschine M2 wird behoben. Zum Zeitpunkt  $T_1$  sind folglich beide Maschinen repariert. Bei Reihenfolge M2/M1 hingegen wird zunächst der Stillstand an Maschine M2 behoben und danach erst der Stillstand an Maschine M1, wobei zum Zeitpunkt  $T_1$  ebenfalls beide Maschinen wieder produzieren. Die zu priorisierende Reihenfolge ergibt sich schließlich nach fortlaufender Simulation des Systemverhaltens ohne Betrachtung weiterer Stillstände durch den Vergleich der Ausbringungsmengen der jeweiligen Reihenfolgen zum Simulationsendzeitpunkt  $T_{Ende}$ , wobei die Priorisierungsreihenfolge der Reihenfolge mit dem größten Wert für die Ausbringungsmenge entspricht.

Der vorgestellte Ansatz soll nachfolgend an einem nachvollziehbaren Beispielsystem, bestehend aus zwei Maschinen und einem Puffer, verdeutlicht werden (s. Abb. 2).



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung eines zwei Maschinen ein Puffer Systems

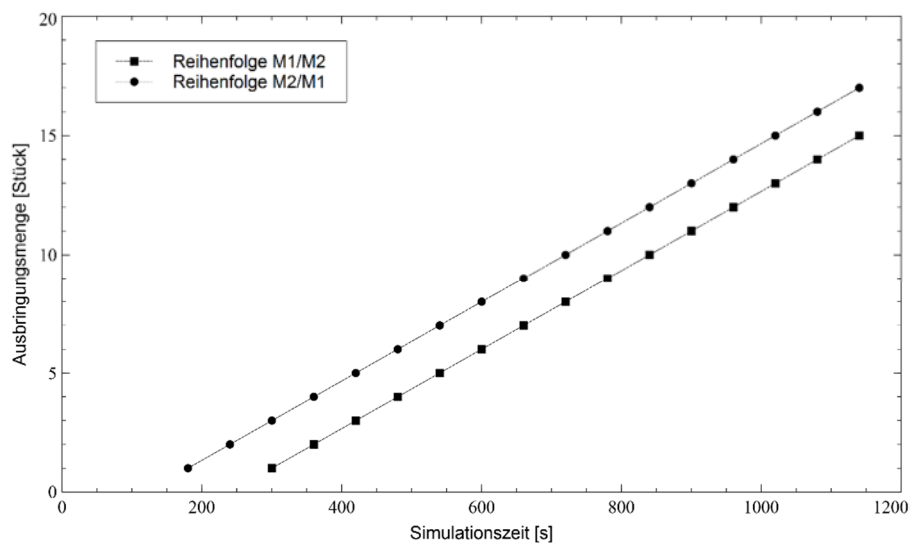
Zum Zeitpunkt  $T_0$  (vgl. Abb. 1) sind beide Maschinen M1 und M2 leer und der Puffer P1 hat den initialen Pufferfüllstand  $P1_0$  und die Pufferkapazität  $P1_{max}$ . Es wird ferner angenommen, dass M1 immer mit Teilen versorgt wird, d.h. nie auf Teile warten muss

und M2 fortlaufend Teile in die Senke abführen kann, d.h. nie blockiert ist. Die für dieses Beispiel verwendeten Werte sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

**Tabelle 1:** Verwendete Werte für das zwei Maschinen ein Puffer System

	M1	P1	M2
Bearbeitungszeit	60 s	-	60 s
MTTR	120 s	-	120 s
$P_0$	-	5 Stück	-
$P_{max}$	-	10 Stück	-

Unter Verwendung des Simulationsprogramms Plant Simulation wurde der beschriebene Ansatz implementiert und die beiden möglichen Behebungsreihenfolgen entsprechend simuliert. Der Simulationenzeitpunkt wurde mit  $T_{Ende} = 1140$  s angenommen. In Abbildung 3 ist die kumulierte Ausbringungsmenge über der Simulationszeit für die beiden Reihenfolgen dargestellt. Nach  $T_{Ende}$  beträgt die Ausbringungsmenge mit Reihenfolge M1/M2 15 Stück und mit M2/M1 17 Stück. Aufgrund der höheren Ausbringungsmenge zum Vergleichszeitpunkt  $T_{Ende}$  ist der Stillstand an Maschine M2 höher zu priorisieren als der Stillstand an Maschine M1.

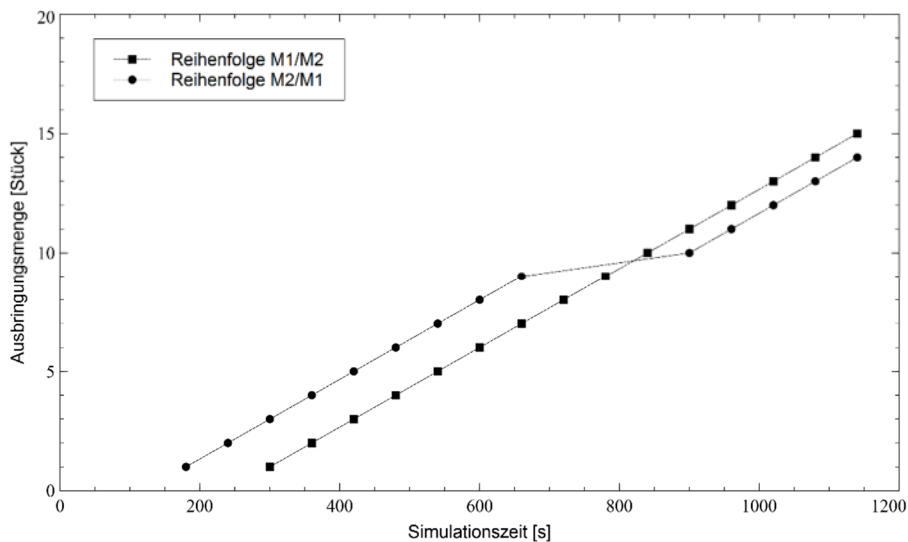


**Abbildung 3:** Simulationsergebnisse ohne Berücksichtigung zukünftiger Stillstände

#### 4 Einfluss zukünftiger Stillstandzeiten auf die Priorisierungsreihenfolge

Yang et al. (2007) berücksichtigen bei der Simulation ab dem Zeitpunkt  $T_1$  weder stochastisch verteilte noch geplante zukünftige Stillstände. Allerdings sind, wie in Kapitel 1 beschrieben, durch Systeme zur Zustandsüberwachung und -diagnose zunehmend Instandhaltungsbedarfe und damit notwendige Stillstandzeiten vor dem plötzlichen Stillstand einer Maschine bekannt. Damit stellt sich die Frage, ob zuverlässig prognostizierte bzw. geplante zukünftige Stillstände eine Auswirkung auf die Priorisierungsreihenfolge der zum Zeitpunkt  $T_0$  zu priorisierenden Stillstände haben?

Zur Verdeutlichung wird das bereits in Kapitel 3 eingeführte 2 Maschinen 1 Puffer System verwendet. Alle Parameter werden beibehalten, wobei zusätzlich Maschine M1 nach 500 s Simulationszeit für einen Zeitraum von 300 s stillstehen wird. Die kumulierte Ausbringungsmenge über der Simulationszeit ist für beide Behebungsreihenfolgen in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Simulationsergebnisse mit Berücksichtigung zukünftiger Stillstände

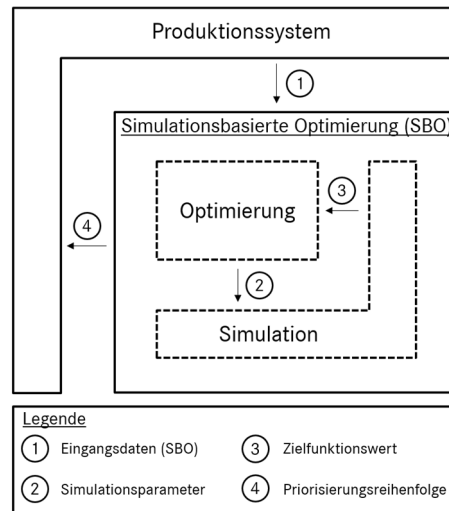
Die Ausbringungsmenge nach  $T_{Ende}$  beträgt mit Reihenfolge M1/M2 15 Stück und mit M2/M1 14 Stück. Aufgrund der höheren Ausbringungsmenge ist hier der Stillstand an Maschine M1 höher zu priorisieren als der Stillstand an Maschine M2. Durch Berücksichtigung des zukünftigen Stillstands an M1 ergibt sich folglich eine andere Priorisierungsreihenfolge als ohne Berücksichtigung (vgl. Abb. 3). Die höhere Ausbringungsmenge mit Reihenfolge M1/M2 kommt dadurch zu Stande, dass sich bei dieser Reihenfolge zum Stillstandeintritt des zukünftigen Stillstandes an Maschine M1 mehr Werkstücke als bei der Reihenfolge M2/M1 zwischen der Maschine M1 und der Senke befinden, sodass während des zukünftigen Stillstandes folglich mehr Werkstücke produziert werden können.

Um zukünftige Stillstandzeiten bei der Priorisierung von Maschinenstillständen zu berücksichtigen, wird der in Kapitel 3 beschriebene Ansatz erweitert. Dazu wird das vorliegende Optimierungsproblem als Online-Optimierungsproblem mit Lookahead aufgefasst, welches mittels simulationsbasierter Optimierung gelöst werden kann. Im Gegensatz zur Offline-Optimierung, bei der zu Beginn alle Eingabedaten bekannt sind, werden bei der Online-Optimierung die Eingabedaten sequentiell bekannt gegeben, d.h. bei einer Online-Optimierung müssen Entscheidungen unmittelbar und ohne Wissen über zukünftige Ereignisse getroffen werden (Dunke et al. 2014). Bei einer Online-Optimierung mit Lookahead ist nun eine Teilmenge der zukünftigen Eingabedaten bekannt, sodass mehr Informationen für die Entscheidung bereitstehen. Somit kann die Online-Optimierung mit Lookahead zwischen den Extrema der klassischen Offline-Optimierung und der reinen Online-Optimierung eingeordnet werden (Dunke und Nickel 2016). Bei der Priorisierung von Maschinenstillständen können in diesem Kontext die zuverlässig prognostizierten Stillstandzeiten als Lookahead klassifiziert werden. Die Formulierung als Reihenfolgenoptimierungsproblem ergibt sich mit der zu maximierenden Zielgröße „Ausbringungsmenge“ wie folgt

$$\text{Max} \rightarrow \text{Ausbringungsmenge} = \max_{k=1}^L A(\text{Seq}_k) \quad (2)$$

wobei  $L$  die Anzahl möglicher Priorisierungsreihenfolgen (vgl. Formel 1) und  $A(\text{Seq}_k)$  die Ausbringungsmenge der Reihenfolge  $k$  zum Vergleichszeitpunkt  $T_{\text{Ende}}$  sind.

Da sich die Zielfunktion komplexer Produktionssysteme meistens nicht in geschlossener Form darstellen lässt, erfolgt die Bestimmung des Zielfunktionswertes für jede Reihenfolge mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation. Damit ergibt sich nach der VDI Richtlinie 3633 ein simulationsbasiertes Optimierungssystem, bei dem die Simulation in die Optimierung integriert ist (VDI 2016). Dieses System, in dem die dominierende Komponente die Optimierung ist, welche auf das Simulationsmodell als Zielfunktion zurückgreift und als Ergebnis einen Zielfunktionswert zurückgegeben bekommt, ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Für das Anfangsbeispiel ergibt sich nun folgender Ablauf. Zur Ermittlung der Priorisierungsreihenfolge wird für jede mögliche Reihenfolgensequenz (hier: M1/M2 sowie M2/M1) ein Simulationslauf durchgeführt, in dem ausgehend vom aktuellen Systemzustand des Produktionssystems, d.h. den aktuellen Maschinenzuständen sowie den aktuellen Pufferfüllständen (Online-Daten), zum Zeitpunkt  $T_0$  die entsprechende Stillstandbehebungsreihenfolge abgebildet wird. Mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation wird dann bewertet, wie sich die Behebungsreihenfolge unter Berücksichtigung des zukünftigen, dynamischen Verhaltens, eingeschlossen aller zum Zeitpunkt  $T_0$  bekannten, zuverlässig prognostizierbaren Stillstände, auf die Zielgröße Ausbringungsmenge auswirkt. Zum für jeden Simulationslauf gleichen Zeitpunkt  $T_{\text{Ende}}$  werden die bis dahin ermittelten Werte für die Ausbringungsmenge an der Senke des Simulationsmodells gespeichert und nach der Simulation aller Reihenfolgensequenzen verglichen. Die Priorisierungsreihenfolge ergibt sich schließlich entsprechend der Reihenfolgensequenz mit der höchsten Ausbringungsmenge.



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des Systems zur simulationsbasierten Optimierung der Priorisierungsreihenfolge von Maschinenstillständen

## 5 Bestimmung der Simulationszeit als Maßnahme zur Reduzierung des Simulationsaufwandes

Der vorgestellte erweiterte Ansatz soll für ein Entscheidungsunterstützungssystem im operativen Betrieb verwendet werden, welches die Produktionsmitarbeiter in komplexen Produktionssystemen dabei unterstützt, auf ausbringungsrelevante Stillstände umgehend zu reagieren und die Auswirkung zukünftiger Stillstände proaktiv zu vermindern. Da die Simulationskomponente in solchen Systemen häufig den zeitlichen Engpass bei der Entscheidungsfindung darstellt, werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit Maßnahmen entwickelt, um den Simulationsaufwand so gering wie möglich zu halten. Eine wichtige Maßnahme in diesem Zusammenhang ist die richtige Bestimmung des Simulationsendzeitpunktes  $T_{Ende}$ . Yang et al. (2007) legen die Simulationszeit ohne weitere Betrachtung analog einer Schichtlänge mit 8 Stunden fest. Allerdings führt eine zu lange Simulationszeit zu einem Anstieg der Rechenzeit und damit zu einem größeren Zeitraum bis zur Entscheidungsfindung. Eine zu kurz gewählte Simulationszeit kann hingegen dazu führen, dass die Behebungsreihenfolgen abhängige Änderungen in der Ausbringungsmenge unvollständig erfassen und es somit zu einer falschen Entscheidung kommt.

In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass der Unterschied in der Ausbringungsmenge der jeweiligen Behebungsreihenfolge ab dem Zeitpunkt  $T = 900$  s konstant bleibt. Eine genauere Analyse ergab, dass dies der Zeitpunkt ist, an dem das erste produzierte Teil von M1 nach dem zukünftigen Stillstand an der Senke ankommt, wobei sich nach dem Ende des zukünftigen Stillstandes bei  $T = 800$  s nach Maschine M1 bis zur Senke keine Teile mehr im System befinden. Der Simulationsendzeitpunkt ergibt sich somit für ein zwei Maschinen ein Puffer System unter den genannten Annahmen als Summe der Restbearbeitungszeit der Maschine M1 unmittelbar nach Ende des zukünftigen Stillstandes, der Bearbeitungszeit ( $BZ$ ) der Maschine M2 und dem Zeitpunkt des Stillstandendes ( $t_{Ende\ Stillstand}$ ) zu:



$$T_{Ende} = BZ_{M1}(t = t_{Ende\ Stillstand}) + BZ_{M2} + t_{Ende\ Stillstand}. \quad (3)$$

Obwohl die exakte Restbearbeitungszeit der Maschine M1 unbekannt ist, wird sich diese jedoch zwischen den Extremwerten 0 s und der vollen Bearbeitungszeit der Maschine M1 befinden. Somit kann die Restbearbeitungszeit unter einem geringen Rechenzeitverlust im Vergleich zur Verwendung des exakten Werts mit der vollen Bearbeitungszeit der Maschine M1 abgeschätzt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass zuverlässig prognostizierte bzw. geplante zukünftige Stillstände die Priorisierung von anliegenden Maschinenstillständen grundlegend beeinflussen können. Vor diesem Hintergrund wurde ein Ansatz für ein operatives, simulationsbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt, mit dem durch die Verwendung der ereignisdiskreten Simulation zum einen die Komplexität moderner Produktionssysteme abgebildet und zum anderen die Priorisierungsreihenfolge unter Berücksichtigung zukünftiger Stillstandzeiten beurteilt werden können. Darüber hinaus wurde als Maßnahme zur Reduzierung der Zeit für die Entscheidungsfindung aufgezeigt, wie die Simulationszeit so bestimmt werden kann, dass diese möglichst kurz ist, um die Zeit bis zur Entscheidungsfindung zu reduzieren, aber trotzdem ausreichend lang genug, um für sämtliche Behebungsreihenfolgen abhängige Ausbringungsunterschiede erfassen zu können.

Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit sollen neben der geeigneten Wahl der Simulationszeit weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Rechenzeit hergeleitet und für komplexe Produktionssysteme verallgemeinert werden. So zeigte sich bereits, dass der Einfluss zukünftiger Stillstände in größeren Produktionssystemen von der räumlichen sowie der zeitlichen Lage der Stillstände abhängt. Dies wird weiter untersucht, sodass die daraus gewonnenen Erkenntnisse zur Reduzierung der Entscheidungsfindungszeit durch die Reduzierung der Anzahl benötigter Simulationsläufe wie auch der Simulationszeit je Simulationslauf beitragen können. Ferner soll untersucht werden, wie robust die ohne stochastische Einflüsse getroffenen Priorisierungsentscheidungen im Hinblick auf die in der Realität auftretenden stochastischen Schwankungen, beispielsweise bei den Stillstandbehebungsdauern (MTTR-Werte) sowie bei den Bearbeitungszeiten, sind. Abschließend wird das simulationsbasierte Entscheidungsunterstützungssystem an einer agilen Kurbelgehäusefertigungslinie der Daimler AG pilotiert.

## Literatur

- De Carlo, F.; Tucci, M.; Borgia, O.: Conception of a prototype to validate a maintenance expert system. *International Journal of engineering and Technology* 5 (2013) 5, S. 4273-4281.
- Dunke, F.; Nickel, S.: A general modeling approach to online optimization with lookahead. *Omega* 63 (2016), S. 134-153.
- Dunke, F.; Necil, J.; Nickel, S.: Online-Optimierung und Simulation in der Logistik. In: Lübbecke, M.; Weiler, A.; Werners, B.: *Zukunftsperspektiven des Operations Research*. Wiesbaden. Springer Gabler: 2014, S. 33-47.

- Gopalakrishnan, M; Skoogh, A.: Machine criticality based maintenance prioritization: Identifying productivity improvement potential. *International Journal of Productivity and Performance Management* 67 (2018) 4, S. 654-672.
- Guner, H.; Chinnam, R.; Murat, A.: Simulation platform for anticipative plant-level maintenance decision support system. *International Journal of Production Research* 54 (2015) 6, S. 1-19.
- Guo, W.; Jin, J.; Hu, S.: Allocation of maintenance resources in mixed model assembly systems. *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2013) 3, S. 473-479.
- Hotz, I.: Simulationsbasierte Frühwarnsysteme zur Unterstützung der operativen Produktionssteuerung und -planung in der Automobilindustrie. Dissertation, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität 2007.
- Kröning, S; Denkena, B.: Dynamic scheduling of maintenance measures in complex production systems. *Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 4, S. 292-300.
- Langer, R.; Li, J.; Biller, S.; Chang, Q.; Huang, N; Xiao, G.: Simulation study of a bottleneck-based dispatching policy for a maintenance workforce. *International Journal of Production Research* 48 (2009) 6, S. 1745-1763.
- Li, L.; Chang, Q.; Ni, J.: Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 47 (2009a) 18, S. 5019-5036.
- Li, L.; Ambani, S.; Ni, J.: Plant-level maintenance decision support system for throughput improvement. *International Journal of Production Research* 47 (2009b) 24, S. 7047-7061.
- Mosley, S.; Teyner, T.; Uzsoy, R.: Maintenance scheduling and staffing policies in a wafer fabrication facility. *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing* 11 (1998) 2, S. 316-323.
- Pawellek, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer 2016.
- Skoogh, A.; Johansson, B.; Hanson, L.: Data requirements and representation for simulation of energy consumption in production systems. In: *Proceedings of the 44<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems, Madison (USA), 31.05. - 03.06.2011.*
- Strunz, M.: Instandhaltung – Grundlagen, Strategien, Werkstätten. Berlin Heidelberg: Springer 2012.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2888: Zustandsorientierte Instandhaltung. Berlin: Beuth 1997.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 12 Simulation und Optimierung. Berlin: Beuth 2016.
- Wedel, M.: Effektive Priorisierung bei reaktiven Instandhaltungsmaßnahmen zur Steigerung der Ausbringung von komplexen Transferstraßen am Beispiel der Automobilindustrie. Aachen: Shaker 2016.
- Yang, Z.; Chang, Q.; Djurdjanovic, D.; Ni, J; Lee, J.: Maintenance priority assignment utilizing on-line production information. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129 (2007) 2, S. 435-446.
- Zhai, S.; Reinhart, G.: Predictive Maintenance als Wegbereiter für die instandhaltungsgerechte Produktionssteuerung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 113 (2018) 5, S. 298-301.