

Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen

Bernd Scholz-Reiter, Thorsten Philipp, Christoph de Beer, Katja Windt, Michael Freitag

1 Einleitung

Derzeitige Prozesse der Planung und Steuerung müssen den Anforderungen durch die strukturelle Komplexität von Produktions- und Logistiksystemen, wie sie beispielsweise in vernetzten Materialflussstrukturen vorherrscht, sowie der vielfältigen dynamischen Einflüsse gewachsen sein. Zentrale Steuerungen schaffen es heute nicht, die Prozessfähigkeit der Produktions- und Logistiksysteme sicherzustellen. Neue Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie ermöglichen dagegen einen Paradigmenwechsel von zentraler konventioneller Planung und Steuerung hin zu einer dezentralen Steuerung durch intelligente logistische Objekte, sowie selbststeuernder logistischer Prozesse. Die Einführung solcher selbststeuernden Prozesse in produktionslogistischen Systemen ist ein viel versprechender Ansatz, um den gestiegenen Anforderungen in Bezug auf Dynamik und Komplexität zu begegnen und so die Erreichung logistischer Zielgrößen (hohe Termintreue, kurze Durchlaufzeiten) zu verbessern [1].

2 Definition und These

Innerhalb des Sonderforschungsbereichs 637 Selbststeuerung logistischer Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen wurde eine globale Definition der Selbststeuerung entwickelt. Diese lautet:

„Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nicht-deterministischen Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen. Ziel des Einsatzes von Selbststeuerung ist eine höhere Robustheit und positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte, flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität.“ [2]

Neben dieser interdisziplinären Definition wurde zudem eine ingenieurwissenschaftliche Definition entwickelt, die für die Betrachtung der Produktionslogistik zweckmäßig ist und folgendermaßen lautet:

„Selbststeuerung logistischer Prozesse ist gegeben, wenn das logistische Objekt Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst leistet.“ [3]

Zum Nachweis der verbesserten Bewältigung von Komplexität und Dynamik, im Sinne einer verbesserten Erreichung logistischer Zielgrößen durch den Einsatz von Selbststeuerung, ist zunächst deren Evaluation im Hinblick auf Komplexitätsbewältigung und Dynamikbeherrschung notwendig. Zu diesem Zweck wird zwischen struktureller und dynamischer Komplexität unterschieden. Letztere wird weiterhin in interne und externe dynamische Komplexität differenziert.

Der in den Definitionen zum Ausdruck gebrachte Paradigmenwechsel basiert auf der folgenden These:

Selbststeuerung bietet eine Möglichkeit, bei steigender struktureller Komplexität, steigender interner dynamischer Komplexität und steigender externer dynamischer Komplexität einen höheren Grad der logistischen Zielerreichung zu erwirken, im Vergleich zu zentral und fremdgesteuerten Systemen.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der logistischen Zielerreichung und der strukturellen Komplexität, die insgesamt in einer Überprüfung der These münden soll.

Zur Überprüfung der These wird der Ansatz verfolgt, die Auswirkungen von verschiedenen Selbststeuerungsmethoden auf die Erreichung der logistischen Zielgrößen bei einer steigenden strukturellen Komplexität zu messen. Hierzu ist es notwendig, einerseits den Zielerreichungsgrad der logistischen Zielgrößen zu operationalisieren, und andererseits Aussagen über den Grad der Komplexität eines betrachteten logistischen Systems zu treffen. Der logistische Zielerreichungsgrad beinhaltet in vektorieller Darstellung die logistischen Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand. Das Charakteristische an diesem Grad der logistischen Zielerreichung ist, dass die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen durch Gewichtungsfaktoren aufgegriffen werden. Um Aussagen zum Grad der Komplexität zu treffen, wird in einem systemtheoretischen Ansatz die strukturelle Komplexität eines Produktionssystems durch Elemente, Relationen und Prozesse innerhalb des Systems beschrieben. Beispielsweise sind eine hohe Anzahl von Arbeitsstationen mit vielfältigen Materialflüssen und eine hohe Anzahl unterschiedlicher Produkte, sowie verschiedenste Fertigungsprozesse Anzeichen für eine hohe strukturelle Komplexität. Die interne dynamische Komplexität beschreibt dynamische Veränderungen innerhalb des Systems, wie z.B. Störungen und Ausfälle von Maschinen oder Änderungen in der Materialflussstruktur. Hingegen beschreibt die externe dynamische Komplexität die Veränderungen der Parameter, die von außen auf das System wirken, wie z.B. Bedarfsschwankungen, Kundenänderungswünsche oder Lieferschwierigkeiten von Lieferanten. In der folgenden Abbildung 1 ist der generelle Aufbau dieses Beitrags dargestellt.

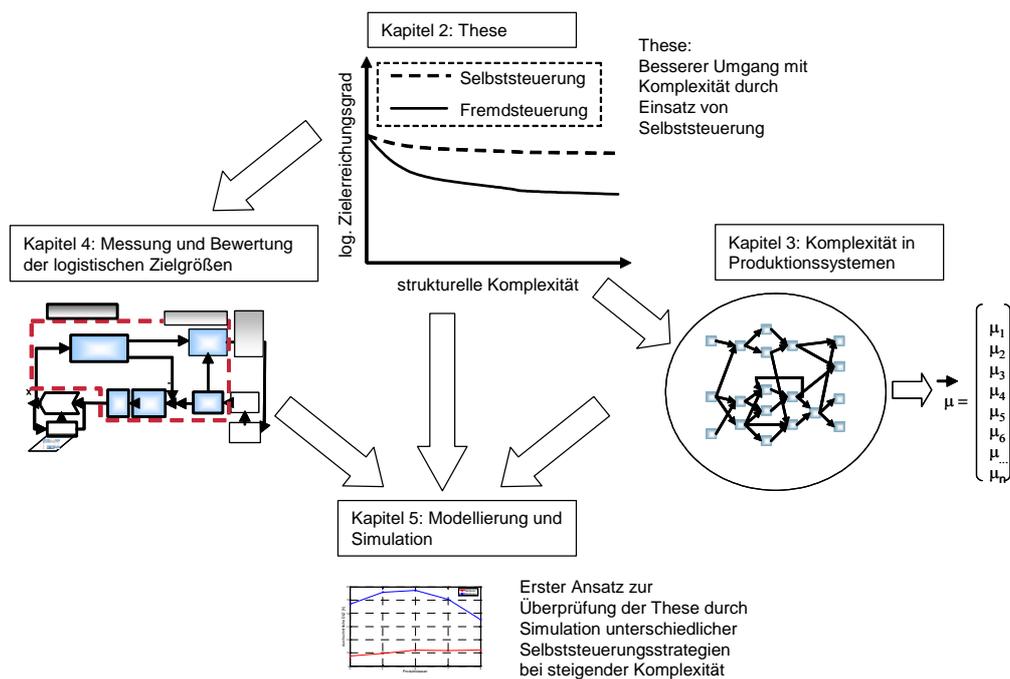


Abbildung 1: Aufbau des Beitrags

Aufbauend auf der zuvor aufgestellten These wird in Kapitel 3 die Komplexität von Produktionssystemen beschrieben. In diesem Zusammenhang wird eine Möglichkeit zur Operationalisierung aufgezeigt, welche am Beispiel der strukturellen Komplexität genauer betrachtet wird. Kapitel 4 beschreibt die Möglichkeiten der Bewertung von selbststeuernden Produktionssystemen in Form einer Messung des Zielerreichungsgrads durch einen vektoriellen Ansatz. Die Möglichkeiten zur Bewertung von selbststeuernden Systemen sowie die Operationalisierung der strukturellen Komplexität werden in Kapitel 5 aufgegriffen und mithilfe von ereignisdiskreten Modellen simuliert. Dabei werden 2

verschiedene Selbststeuerungsstrategien bei unterschiedlichen Komplexitätsniveaus untersucht, um die in Kapitel 2 aufgestellte These zu verifizieren.

3 Komplexität in Produktionssystemen

Der Begriff Komplexität wird im Allgemeinen sehr weitläufig verwendet. Komplexität bedeutet jedoch mehr, als das Probleme oder Strukturen in ihrem Aufbau kompliziert sind. In der Regel werden Systeme als komplex empfunden, die sich nicht mehr einfach beschreiben lassen. Scherer spricht in diesem Fall von subjektiver Komplexität. Des Weiteren wird in diesem Zusammenhang zwischen strukturbedingter Komplexität, resultierend aus den Eigenschaften der Elemente und ihren Verbindungen, und dynamischer Komplexität durch ein nichtlineares, dynamisches Verhalten der Systeme unterschieden [4]. Die Komplexität eines Systems kann zudem als das Zusammenspiel von Kompliziertheit und Dynamik verstanden werden [5].

Ulrich/Probst [6] verstehen unter Komplexität eine Systemeigenschaft, deren Grad von der Anzahl der Systemelemente, von der Vielzahl der Beziehungen zwischen diesen Elementen sowie der Anzahl der möglichen Systemzustände abhängt. Im weiteren Verlauf dieses Beitrags wird zwischen der statischen, strukturellen Komplexität und der dynamischen Komplexität unterschieden. Dabei wird zusätzlich zwischen den Sichtweisen extern und intern unterschieden. Die interne Sichtweise betrachtet alle Einflussgrößen der Komplexität die innerhalb der Systemgrenze und folglich innerhalb des Produktionssystems auftreten, während die externe Sichtweise alle Einflussgrößen außerhalb des Systems berücksichtigt.

Eine große Herausforderung besteht in der Operationalisierung der Komplexität in Form eines quantifizierbaren Komplexitätsgrades. Einige Ansätze zur Messung der Komplexität verwenden die Messung der Entropie als Grundlage [7-13]. In thermodynamischen Systemen kann die Entropie als Grad für die Unordnung eines Systems angesehen werden. Shannon und Weaver entwickelten auf Basis der Gleichungen zur Entropiemessung in der Thermodynamik eine Gleichung zur Messung der Information [14]. Diese kann zur Komplexitätsmessung herangezogen werden, da hierdurch die notwendige Menge an Informationen bestimmt wird, welche den Zustand eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt. Je komplexer ein System ist, desto mehr Elemente und Relation sind enthalten und folglich sind mehr Informationen notwendig, um das System zu beschreiben. Diese Überlegungen übernahmen Frizelle und Woodcock und definierten Gleichungen zur Messung der Komplexität von Produktionssystemen basierend auf der Vielfalt und Unsicherheit von Informationen innerhalb des Systems [9]. Sie definieren die statische bzw. strukturelle Komplexität als erwartete Menge an Informationen, die notwendig ist, um den Zustand eines Systems zu beschreiben. Die dynamische Komplexität wird in diesem Zusammenhang als erwartete Menge an Informationen verstanden, die die Abweichung des Systems vom geplanten Zustand beschreibt.

Es wird schnell erkennbar, dass eine adäquate Operationalisierung der Komplexität nicht durch eine einzelne Messgröße machbar ist. Vielmehr müssen mehrere Komplexitätsfaktoren erfasst werden, die zwar untereinander abhängig sind, sich jedoch nicht vollkommen auf andere Faktoren reduzieren lassen [5]. Eine Vielzahl von Messgrößen zur Beschreibung der Komplexität wurde im Bereich der komplexen Netzwerke, z.B. bei der Betrachtung des Internets [15] oder biologischen Systemen [16] entwickelt. In diesem Zusammenhang zeigen Costa et al., dass ein komplexes Netzwerk durch einen Komplexitätsvektor beschrieben werden kann [17]. Dieser Ansatz wird im Folgenden für die Beschreibung der Komplexität von Produktionssystemen aufgegriffen. Die Gesamtkomplexität eines Produktionssystems lässt sich folglich durch einen Komplexitätsvektor darstellen. Zunächst werden die relevanten Messgrößen für den internen, strukturellen Komplexitätsvektor dargestellt, dessen Einfluss auf die Leistung produktionstechnischer Systeme in Simulationsstudien untersucht wird. Dieser entwickelte Vektor repräsentiert die strukturelle Komplexität eines Produktionssystems, wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist.

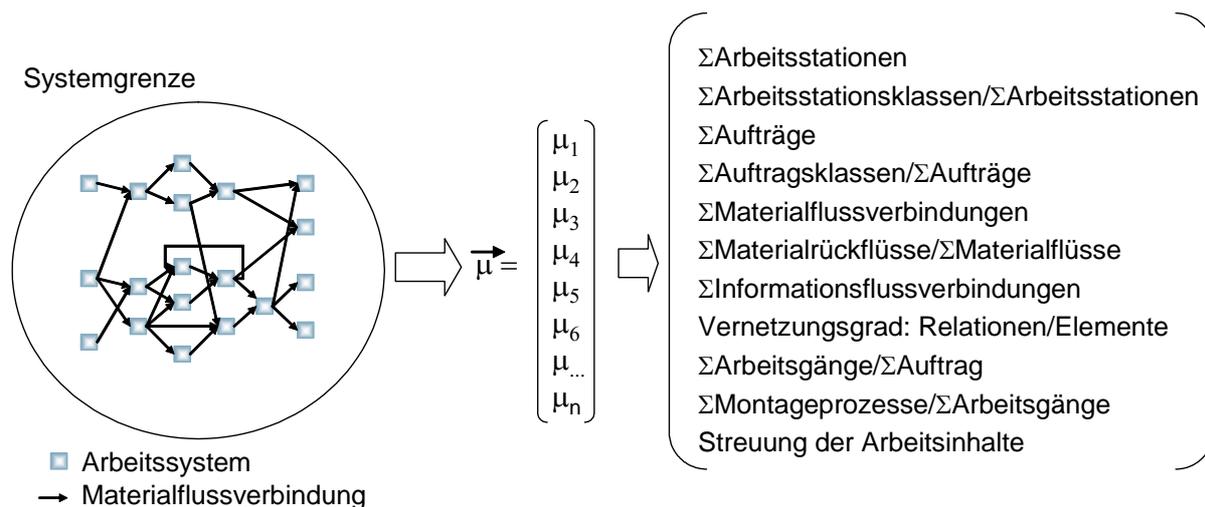


Abbildung 2: Struktureller Komplexitätsvektor für Produktionssysteme

Innerhalb dieses Vektors sind alle Größen messbar und folglich lässt sich ein solcher Vektor für jedes Produktionssystem aufstellen. Die Größen innerhalb dieses Vektors sind die Anzahl an Arbeitsstationen und die Anzahl unterschiedlicher Arbeitsstationen bezogen auf die Gesamtanzahl Arbeitsstationen, da eine hohe Varianz an Arbeitsstationen eine höhere Komplexität zur Folge hat. Gleiches gilt für die Anzahl unterschiedlicher Auftragsklassen bezogen auf die Gesamtanzahl Aufträge. In diesem Punkt und in der Gesamtanzahl der Aufträge werden alle Arten von Aufträgen innerhalb des Systems betrachtet (Kundenaufträge, Fertigungsaufträge, Montageaufträge). Eine hohe Anzahl an Produktvarianten wird folglich durch diese Größe berücksichtigt. Des Weiteren werden die Größen zur Beschreibung der Relationen dargestellt. Neben der Gesamtanzahl an Materialflussverbindungen werden die Anzahl der Materialrückflüsse aufgenommen, da Materialrückflüsse innerhalb eines Produktionssystems die strukturelle Komplexität erhöhen. In den hier betrachteten Systemen bezeichnet die Anzahl der Informationsflussverbindungen alle Arten des Austauschs von Daten zwischen Elementen und stellt folglich eine zählbare Größe dar. Zudem gehen der Vernetzungsgrad, also die Anzahl der Relationen bezogen auf die Anzahl aller Elemente, in den Komplexitätsvektor ein. Der Anteil an Montageprozessen spielt ebenso eine wichtige Rolle für die strukturelle Komplexität, da mehrere Elemente zeitgleich an einer Arbeitsstation vorliegen müssen und sich zudem die Elementidentifikation ändert. Prozessbezogenen Daten, wie die durchschnittliche Anzahl der Arbeitsgänge je Auftrag und die Streuung der Arbeitsinhalte haben ebenfalls Auswirkungen auf die Komplexität des Systems. Die Streuung der Arbeitsinhalte bezieht sich dabei sowohl auf die arbeitsvorgangsbezogenen Arbeitsinhalte an einem Arbeitssystem als auch auf die Arbeitsinhalte innerhalb eines Auftrags. Zunächst handelt es sich bei diesem Vektor um einen Ansatz zur Messung der unterschiedlichen Komplexitätsarten in produktionslogistischen Systemen, der in weiteren Forschungsarbeiten genauer spezifiziert werden muss. Mit Hilfe dieser vektoriiellen Herangehensweise ist es zudem möglich, zwei Systeme miteinander zu vergleichen und ein $\Delta\mu$ zu ermitteln, welches den Komplexitätsunterschied der beiden Systeme darstellt. Auf diese Art und Weise lässt sich die Komplexität von Produktionssystemen operationalisieren und folglich die Auswirkungen geänderter Komplexitätsniveaus untersuchen. Im weiteren Verlauf dieses Beitrags werden im Wesentlichen die Komplexitätskomponenten „Anzahl Arbeitsstationen“ und „Anzahl Auftragsklassen“ variiert. Durch Interdependenzen werden zudem weitere Komponenten beeinflusst.

4 Messung und Bewertung der logistischen Zielgrößen

4.1 Regelkreis der Selbststeuerung

Ausgangspunkt zur Messung und Bewertung selbststeuernder logistischer Prozesse ist ein Regelungstechnischer Ansatz aus Sicht der logistischen Objekte.

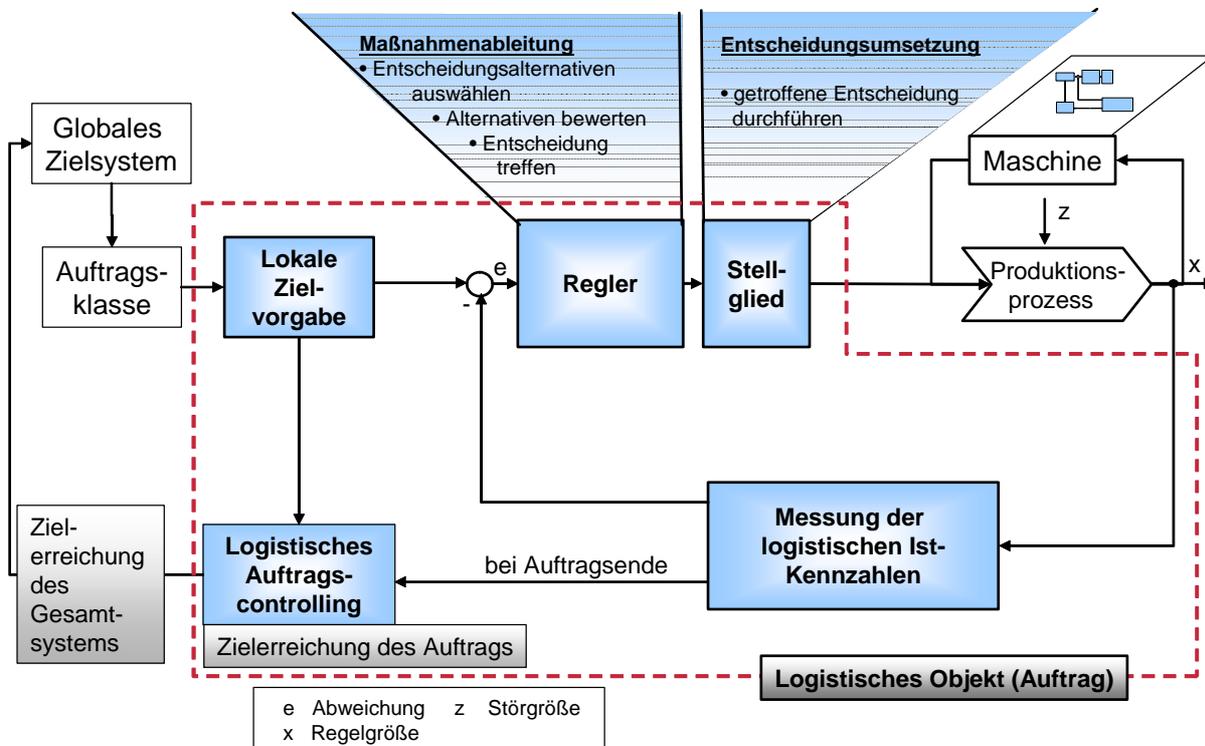


Abbildung 3: Regelkreis der Selbststeuerung

Der zu regelnde Prozess ist in diesem Fall der Produktionsprozess. An diesem Prozess sind sowohl ein Auftrag als auch eine Ressource beteiligt. Ausgehend von einem globalen Zielsystem werden Zielgrößen für unterschiedliche Objektklassen abgeleitet. Dieses ermöglicht aus Auftragsicht beispielsweise eine Unterscheidung in Kunden- und Lageraufträge mit jeweils unterschiedlichen Zielgewichtungen für die Termintreue und Durchlaufzeit des einzelnen Auftrags. Aus den Zielen der Objektklassen ergeben sich lokale Zielvorgaben für einzelne logistische Objekte. Diese lokalen Zielvorgaben dienen als Führungsgröße für den regelungstechnischen Ansatz zur Selbststeuerung. Etwaige Änderungen innerhalb des Produktionsprozesses können durch die Rückkopplung und gleichzeitige Ermittlung der relevanten logistischen Kennzahlen zeitnah erfasst werden und geeignete Maßnahmen in Form einer Bewertung von Alternativen getroffen werden. Innerhalb des Reglers werden die Abweichungen des Produktionsprozesses von den lokalen Vorgabewerten ausgewertet. Auf dieser Basis werden mögliche Entscheidungsalternativen als Reaktion auf eine Prozessabweichung berücksichtigt. Alle möglichen Entscheidungsalternativen werden hinsichtlich ihrer prognostizierten logistischen Zielerreichung auf Basis der lokalen Zielvorgaben bewertet. Diese erste Stufe des Bewertungsmodells liefert die Grundlage für die Auswahl von möglichen Alternativen für den weiteren Verlauf des Auftrags durch die Produktion. Die auf Basis der Bewertung getroffene Entscheidung wird anschließend durch die Stellgröße umgesetzt. Dieses kann beispielsweise der Transport auf eine andere Maschine sein, falls zuvor die Entscheidung getroffen wurde, dass ein Wechsel der Produktionsanlage einen höheren Beitrag zum Zielerreichungsgrad des logistischen Objekts bringt. Am Ende eines Auftrags werden die ermittelten logistischen Kenngrößen mit den vorgegebenen logistischen Kenngrößen verglichen (Soll-Ist-Vergleich) und auf dieser Basis der Zielerreichungsgrad des einzelnen

logistischen Objekts ermittelt. Dieses stellt die zweite Stufe des Bewertungssystems dar. Durch eine Betrachtung aller im Produktionssystem befindlichen logistischen Objekte und gegebenenfalls einer Gewichtung dieser Objekte, welche beispielsweise eine höhere Bedeutung von Engpassmaschinen oder wichtigen Kundenaufträgen ermöglicht, besteht die Möglichkeit den Zielerreichungsgrad des Gesamtsystems zu ermitteln. Diese Betrachtung des Gesamtsystems stellt die dritte Stufe des Bewertungssystems dar. Mittels dieser dezentralen Regelung einzelner logistischer Objekte wird die Möglichkeit gegeben zeitnah auf eventuelle Änderungen oder Störungen zu reagieren und folglich die Performance des Gesamtsystems über die Messung des logistischen Zielerreichungsgrads zu erhöhen.

4.2 Vektorieller Ansatz zur Messung der logistischen Zielerreichungsgrade

Die konkrete Messung der Zielerreichungsgrade und der Alternativenbewertung geschieht mittels eines vektoriellen Ansatzes. Als Basis dienen Zielvektoren \vec{z} mit den logistischen Zielgrößen in der folgenden Form:

$$\vec{z} = \begin{bmatrix} \text{Termintreue} \\ \text{Durchlaufzeit} \\ \text{Auslastung} \\ \text{Bestand} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dieses Format des Vektors gilt sowohl für die Vorgabevektoren, als auch für die Vektoren mit den tatsächlichen Ist-Werten bei der Entscheidungsbewertung oder bei der Ermittlung der Kennzahlen zur Bewertung einzelner logistischer Objekte. Für die Gewichtung der einzelnen logistischen Zielgrößen werden Gewichtungsvektoren eingeführt. Die Vorgabevektoren beinhalten die Sollwerte der einzelnen Ziele eines logistischen Objekts. Durch einen Vergleich des Vorgabevektors \vec{z}_{soll} mit den tatsächlichen Werten aus dem Ist-Vektor \vec{z}_{ist} des logistischen Objekts lässt sich der dadurch erhaltene Vektor $D\vec{z}_{soll-ist}$ in einen Vektor \vec{e} mit den Zielerreichungsgraden transformieren:

$$\vec{z}_{soll} - \vec{z}_{ist} = D\vec{z}_{soll-ist} \Rightarrow \vec{e} = \begin{bmatrix} e_{\text{Termintreue}} [\%] \\ e_{\text{Durchlaufzeit}} [\%] \\ e_{\text{Auslastung}} [\%] \\ e_{\text{Bestand}} [\%] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

mit $e_{\text{Termintreue}}$, $e_{\text{Durchlaufzeit}}$, $e_{\text{Auslastung}}$ und e_{Bestand} als Zielerreichungsgrade der einzelnen logistischen Zielgrößen des Objekts in [%].

Die Ermittlung der Zielerreichungsgrade der einzelnen Ziele erfolgt durch den Soll-Ist-Vergleich der jeweiligen Zielgröße und der Berücksichtigung einer vorgegebenen Verteilung, wie sie in Abbildung 4 am Beispiel der Durchlaufzeitabweichung dargestellt ist.

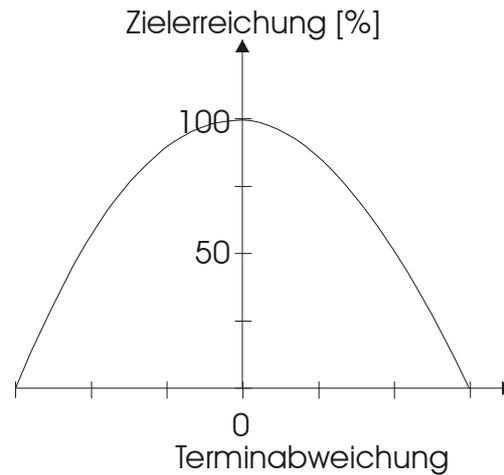


Abbildung 4: Ermittlung der Zielerreichung

Durch Verteilungen in dieser Art lassen sich die Zielerreichungsgrade aus der Differenz zwischen Vorgabevektor und Ist-Vektor direkt im Diagramm ablesen. Die einzelnen Zielerreichungsgrade werden in einem nächsten Schritt zu einem Zielerreichungsgrad des einzelnen Objekts aggregiert. Dieses geschieht durch die Einführung eines Gewichtungsvektors \vec{g} für das jeweilige logistische Objekt. Dadurch wird die Möglichkeit gegeben, über das Skalarprodukt von Gewichtungsvektor \vec{g} und Zielerreichungsgradvektor \vec{e} eine Größe für den Zielerreichungsgrad e_{obj} eines logistischen Objekts in [%] zu ermitteln:

$$\vec{e} \cdot \vec{g} = \begin{bmatrix} e_{\text{Termin-treue}} [\%] \\ e_{\text{Durchlaufzeit}} [\%] \\ e_{\text{Auslastung}} [\%] \\ e_{\text{Bestand}} [\%] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{\text{Termin-treue}} \\ g_{\text{Durchlaufzeit}} \\ g_{\text{Auslastung}} \\ g_{\text{Bestand}} \end{bmatrix} = e_{obj} [\%]. \quad (3)$$

Wichtig ist in diesem Fall, dass die Summe aller γ_i innerhalb des Gewichtungsvektors genau 1 ergibt, um einen sinnvollen Zielerreichungsgrad zu ermitteln. Folglich beschreibt diese Gleichung die zweite Stufe des Bewertungssystems. Für die dritte Stufe des Bewertungssystems ist es notwendig, die einzelnen Zielerreichungsgrade zu einem Gesamtzielerreichungsgrad zu aggregieren. Aus diesem Grund gibt es wiederum Gewichtungsfaktoren χ_i für jedes einzelne Objekt, welche die Auswirkung der einzelnen Einheit auf das Gesamtsystem beschreiben. Auf diese Art und Weise ist es zudem möglich, Ressourcenklassen oder Auftragsklassen gesondert zu betrachten. Der Zielerreichungsgrad des Gesamtsystems e_{ges} ergibt sich folglich aus

$$e_{ges} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot e_{obj}}{\sum_{i=1}^n c_i}, \quad (4)$$

mit n als Anzahl aller sich innerhalb der Systemgrenzen befindlichen logistischen Objekte und χ als Gewichtungsfaktor des logistischen Objekts. Durch diese Berechnung lassen sich folglich logistische Zielerreichungsgrade von Produktionssystemen ermitteln. Zudem lässt sich durch die vektorielle Betrachtung der Komplexität von Produktionssystemen die Komplexität operationalisieren und folglich ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen herstellen. Die zu Anfang gestellte These, dass Selbststeuerung besser mit Komplexität umzugehen vermag, kann nun durch Simulation verifiziert werden.

5 Modellierung und Simulation

Im Folgenden soll die zu Anfang gestellte These durch Simulationen verifiziert werden. In einem ersten Schritt wird der Zielerreichungsgrad, am Beispiel der Durchlaufzeit, bei steigender struktureller Komplexität, für unterschiedliche Selbststeuerungsmethoden untersucht. Daraus folgt, dass bei Operationalisierung der Selbststeuerung anhand der Zielerreichungsvektoren, hier am Beispiel der Zielgröße Durchlaufzeit, die logistischen Objekte den folgenden Gewichtungsvektor benutzen:

$$\bar{g} = \begin{bmatrix} g_{\text{Terminreue}} \\ g_{\text{Durchlaufzeit}} \\ g_{\text{Auslastung}} \\ g_{\text{Bestand}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Um den Zielerreichungsgrad bei steigender struktureller Komplexität zu untersuchen, muss das Simulationsmodell auf der einen Seite in der Lage sein unterschiedliche aber vergleichbare Komplexitätslevel darzustellen und auf der anderen Seite die Möglichkeit bieten, selbststeuernde Prozesse abzubilden. Zu diesem Zweck wurde ein abstraktes produktionslogistisches Modell entworfen, nämlich die Abbildung einer Fertigung in Matrixform. Das Modell besteht aus matrixförmig angeordneten Fertigungsstationen, wobei aufeinander folgende Arbeitsgänge untereinander angeordnet sind. Auf jeder Bearbeitungsstufe stehen mehrere parallele Arbeitsstationen zur Verfügung, so dass bei Überlastung an einer Arbeitsstation, unter Inkaufnahme von Rüstzeiten bzw. höheren Bearbeitungszeiten, ein Ausweichen auf parallele Fertigungsstationen möglich ist. Die Entscheidung zum Wechsel auf eine parallele Fertigungsstation, wird autonom vom logistischen Objekt selber, anhand der Zielerreichungsvektoren und vorher definierten Entscheidungsregeln getroffen.

Abbildung 5 zeigt das produktionslogistische Modell der Fertigung in Matrixform. Die Aufträge für die unterschiedlichen Produkte gelangen an der Quelle in die Fertigung und durchlaufen dann das Modell anhand ihres Produktionsplans, auf den für sie vorgesehenen Fertigungsstationen. Dabei gibt es auf jeder Stufe genau eine Station, die, was die Bearbeitungszeit betrifft, die optimale ist. Außerdem gibt es parallele Fertigungsstationen, die auch geeignet sind um den jeweiligen Bearbeitungsschritt auszuführen. Jedoch muss beim Ausweichen auf parallele Fertigungsstationen eine höhere Mindestdurchlaufzeit in Kauf genommen werden. Sei es durch Transportzeiten, Rüstzeiten, die für jedes Teil anfallen, oder durch die Tatsache, dass die Fertigungsstationen unterschiedlich spezialisiert sind und daher nur für einen Arbeitsschritt die minimale Zeit benötigen und für Alternativarbeiten, die nur selten ausgeführt werden, länger benötigen.

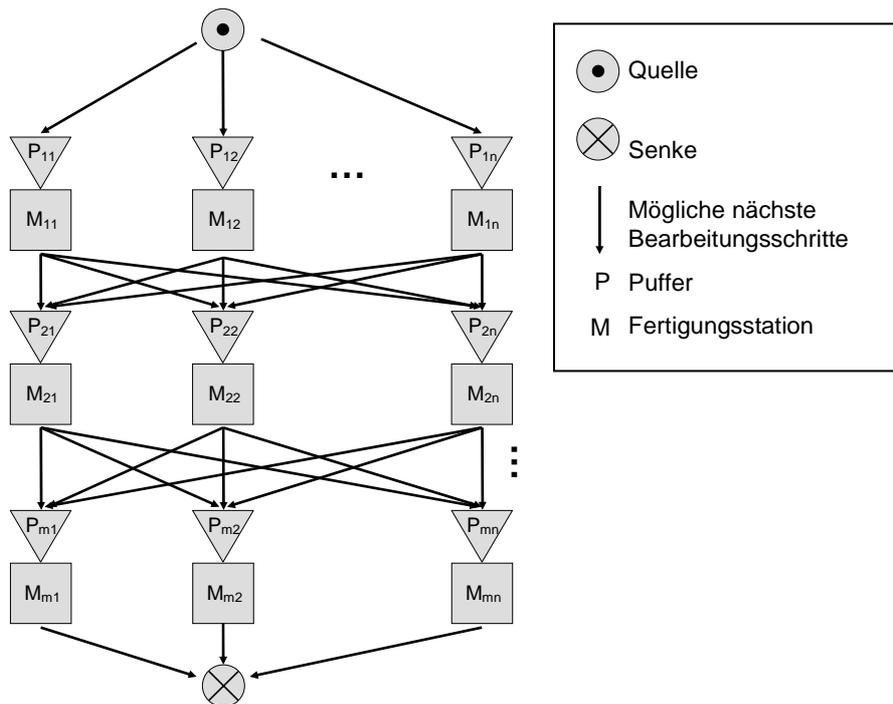


Abbildung 5: Matrixdarstellung des produktionslogistischen Szenarios

5.1 Selbststeuerungsmethoden

In vorherigen Arbeiten der Autoren wurden bereits zwei Selbststeuerungsmethoden erarbeitet, deren Performance hier verglichen wird. Bei der ersten Methode wird die Entscheidung anhand aktueller Informationen über die Warteschlangenlängen vor den Fertigungsstationen getroffen. D.h., dass ein Teil beim Verlassen einer Fertigungsstation zunächst durch Kommunikation mit den Puffern deren Füllstände bzw. die Länge der Warteschlangen vor den nächsten Stationen abfragt und vergleicht. Die Entscheidung auf welcher Fertigungsstation jetzt der folgende Arbeitsschritt ausgeführt werden soll, wird jetzt so getroffen, dass die zu erwartende Wartezeit minimiert wird. D.h. das Teil wählt den Puffer mit der geringsten Wartezeit [18,19].

Bei der zweiten Methode wird die Entscheidung anhand von an den Fertigungsstationen vorgehaltenen Informationen über die Wartezeiten bei früher bearbeiteten Produkten getroffen. Während also beim ersten Ansatz Informationen über zukünftig zu erwartende Wartezeiten zugrunde gelegt werden, verwendet die zweite Methode Informationen über vergangene Ereignisse [20].

Anhand dieser beiden Selbststeuerungsstrategien, soll der Umgang mit steigender struktureller interner Komplexität untersucht werden. Zwei Simulationsparameter werden zu diesem Zweck ceteris paribus variiert. Zum einen wird die Anzahl an Fertigungsstationen sukzessive erhöht, d.h. die Größe der Matrixfertigung wird von 3x3 bis 9x9 variiert. Dabei bleibt die relative Zahl der unterschiedlichen Auftragsklassen erhalten, d.h. die Anzahl der parallelen Linien ist gleich der Anzahl unterschiedlicher Produktklassen. Zum anderen wird die Anzahl der Fertigungsstationen konstant bei 4x4 gehalten und die Anzahl der Produktklassen wird erhöht; von vier unterschiedlichen Produkten bis auf acht Produkte, die im System gefertigt werden können. Dabei sind die Produktionspläne der acht Produktklassen zufällig verteilt.

5.2 Beschreibung der Parameter

Die Bearbeitungszeit für die unterschiedlichen Produktklassen ist auf jeder Bearbeitungsstufe zwei Stunden. Dies gilt jedoch nur für die für diesen

Bearbeitungsschritt laut Arbeitsplan vorgesehenen Fertigungsstationen. Wechselt das Teil selbstständig auf eine parallele Station, so muss für diesen Vorgang mit einer erhöhten Bearbeitungszeit gerechnet werden. Die Zeiten, die für das Bearbeiten auf einer parallelen Station anfallen sind abhängig von der Anzahl an Ausweichmöglichkeiten, also der Anzahl an parallelen Fertigungsstationen. Je mehr Möglichkeiten zum Ausweichen zur Verfügung stehen, desto geringer ist die Erhöhung der Bearbeitungszeit. Die zu addierende Bearbeitungszeit t_b ergibt sich durch die gleichmäßige Verteilung einer Stunde auf die N parallelen Stationen:

$$t_b = \frac{1h}{N} \quad (6)$$

Als Simulationsperiode wird ein Monat, also dreißig Tage gewählt. Während eines Monats schwankt der Auftragseingang für ein Produkt zwischen Überlast und Unterlast, liegt aber im Mittel bei 80% Auslastung für eine einzelne Fertigungsstation, das heißt es entstehen periodisch Über- und Unterbelastungen, die durch die parallel zur Verfügung stehenden Stationen aufgefangen werden können.

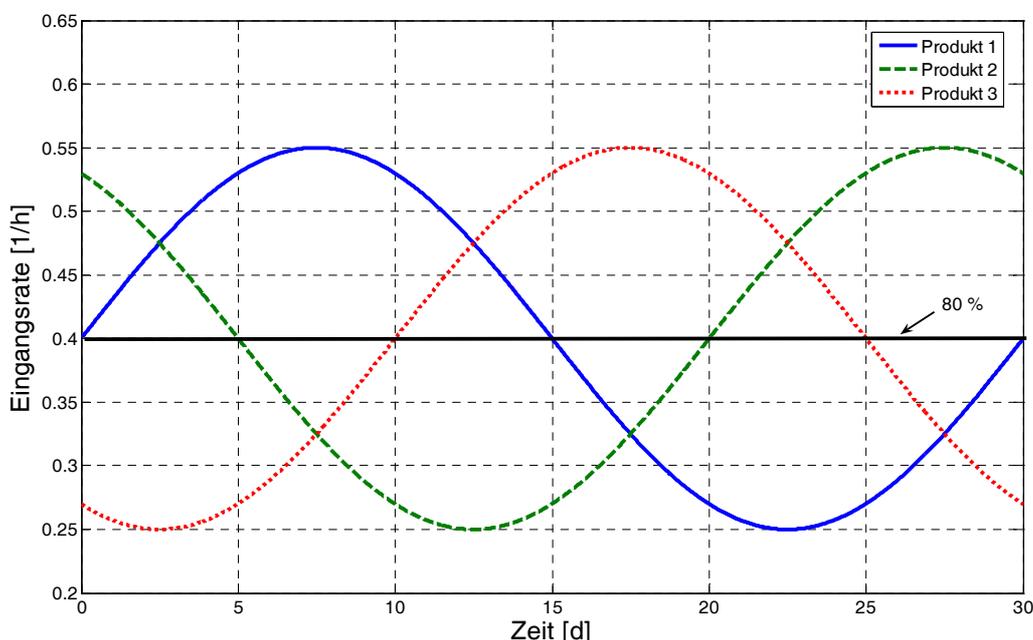


Abbildung 6: Auftragseingang für drei Produktklassen

Abbildung 6 zeigt den Auftragseingang für drei Produkte für eine Simulationsperiode. Ändert sich die Zahl der Produktklassen, so wird die Phasenverschiebung für die Auftragseingänge angepasst. Bei den unterschiedlichen Simulationen sind die Auftragseingangskurven jeweils äquidistant verschoben, so dass sich die Phasenverschiebung φ als Quotient aus Periodenlänge T und Anzahl der Produktklassen K ergibt:

$$\varphi = \frac{T}{K} \quad (7)$$

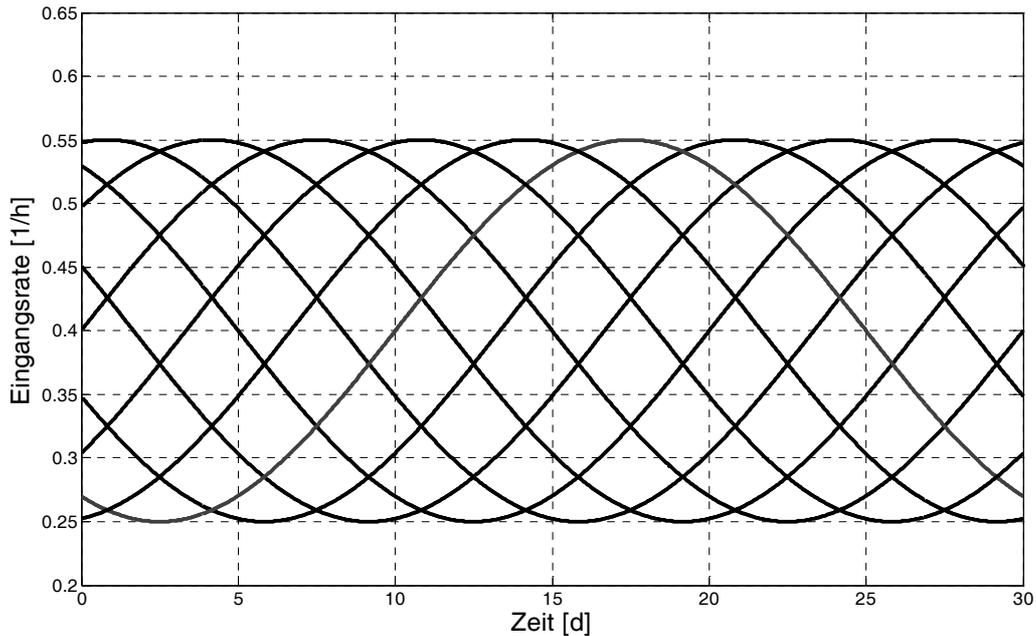


Abbildung 7: Auftragseingang für neun Produktklassen

Abbildung 7 zeigt den Auftragseingang für neun Produkte für eine Simulationsperiode. Je mehr Auftragsklassen es also gibt, desto geringer ist die Phasenverschiebung zwischen den Auftragseingangskurven.

5.3 Simulation

Abbildung 8 zeigt den Einfluss der Systemkomplexität, hier der strukturellen internen Komplexität, auf die mittlere Durchlaufzeit der Teile. Die Durchlaufzeit wird gemessen als Differenz zwischen dem Zeitpunkt der Auftragsfreigabe, und damit Eintritt in die Fertigung an der Quelle, und Fertigstellungszeitpunkt, also verlassen des Modells an der Senke. Abgebildet ist der Durchschnitt über die Durchlaufzeiten aller Teile und aller Produktklassen für die zwei unterschiedlichen Selbststeuerungsmethoden. Zum Vergleich ist die minimale Durchlaufzeit gezeigt. Sie ist eine lineare Funktion der Systemgröße, da mit steigender Systemgröße auch mehrere Produktionsschritte in horizontaler Richtung durchlaufen werden müssen. Es ist festzustellen, dass die steigende Systemgröße keinen Einfluss auf die mittlere Durchlaufzeit bei Methode 1 hat, da sie annähernd parallel zu der minimalen Durchlaufzeit verläuft. Selbststeuerungsmethode 2 hingegen wird bei steigender Netzwerkgröße zunehmend ineffektiver und die mittlere Durchlaufzeit scheint exponentiell zu steigen.

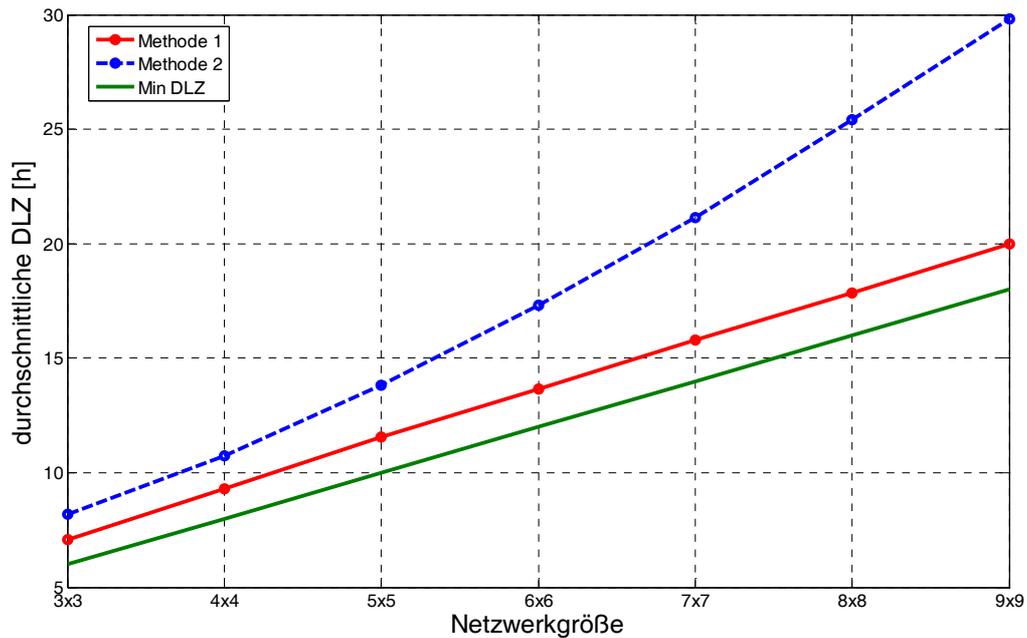


Abbildung 8: Mittlere Durchlaufzeit in Abhängigkeit der strukturellen Komplexität

Das zeigt sich nicht nur im Mittel, sondern auch in der Standardabweichung der Durchlaufzeit. Abbildung 9 zeigt die Standardabweichung vom Mittelwert. Hier sinkt die Standardabweichung sogar mit zunehmender Größe bei Methode 1. Bei Methode 2 wird deutlich, dass mit zunehmender Komplexität auch die Streuung der Durchlaufzeit exponentiell ansteigt.

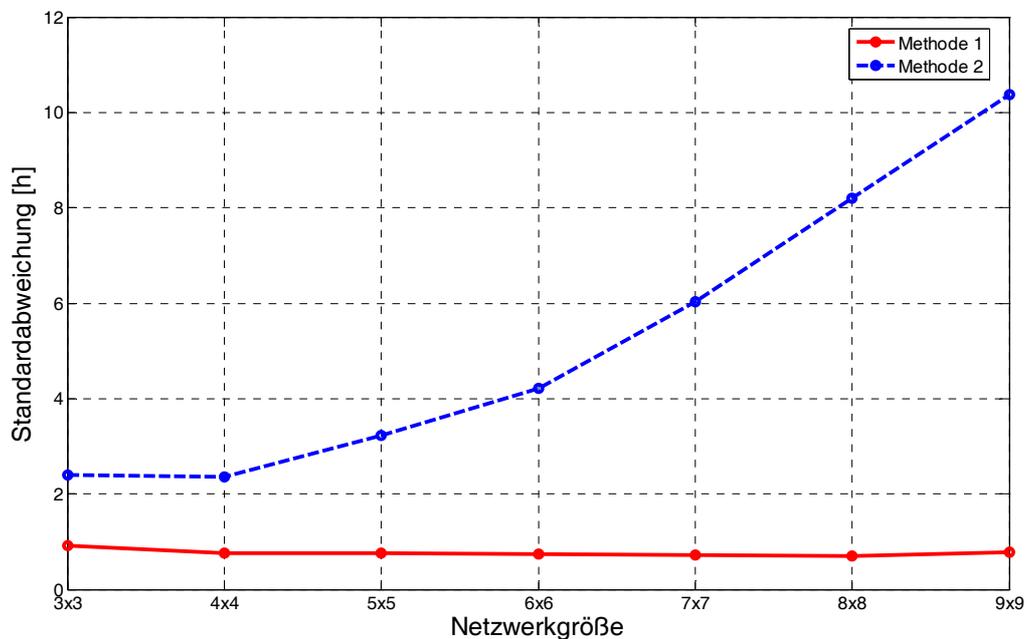


Abbildung 9: Standardabweichung der Durchlaufzeit in Abhängigkeit der Netzwerkgröße

Die Informationen über Mittelwert und Streuung der Durchlaufzeit sind die entscheidenden Kennzahlen für die Prognostizierbarkeit der Durchlaufzeit und damit wichtig für die Einhaltung der Liefertermine. Abbildung 10 zeigt für die beiden

unterschiedlichen Selbststeuerungsmethoden den Anteil an Produkten, die innerhalb einer gewissen Toleranzgrenze, in diesem Fall 120 % der minimalen Durchlaufzeit fertig gestellt werden. Es ist festzustellen, dass dieser Anteil für Methode 1 mit zunehmender Systemgröße ansteigt, während für Methode 2 dieser Anteil immer geringer wird. Dies folgt unmittelbar aus den Daten zum Mittelwert und zur Standardabweichung der Durchlaufzeiten. Für Methode 1 sind sowohl Mittelwert in Bezug auf die minimale Durchlaufzeit, als auch die Standardabweichung konstant. Daher fallen immer mehr Durchlaufzeiten in den Bereich des Toleranzrahmens von 120%, da dieser zusammen mit der minimalen Durchlaufzeit anwächst. Analog folgt das Abnehmen des Zielerreichungsgrades für Methode 2 aus dem Verlauf der mittleren Durchlaufzeit, sowie der anwachsenden Streuung.

In einem zweiten Schritt wird die Anzahl der Fertigungsstationen konstant bei 4x4 gehalten und die Anzahl der Produktklassen wird erhöht von vier unterschiedlichen Produkten bis auf acht Produkte, die im System gefertigt werden können. Dabei sind die Produktionspläne der acht Produktklassen zufällig verteilt. Der Mittelwert der oszillierenden Produkteingangskurven wird hierbei sukzessive verringert, damit die mittlere Gesamtbelastung des Systems erhalten bleibt.

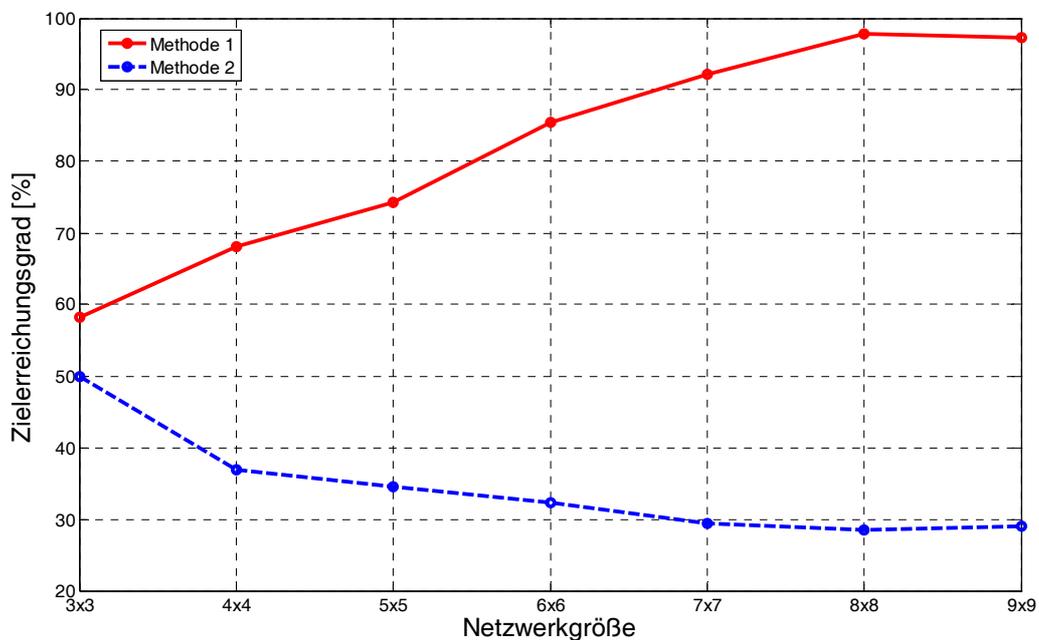


Abbildung 10: Zielerreichungsgrad (Anteil der Produkte innerhalb 120% der minimalen Durchlaufzeit) in Abhängigkeit der Netzwerkgröße

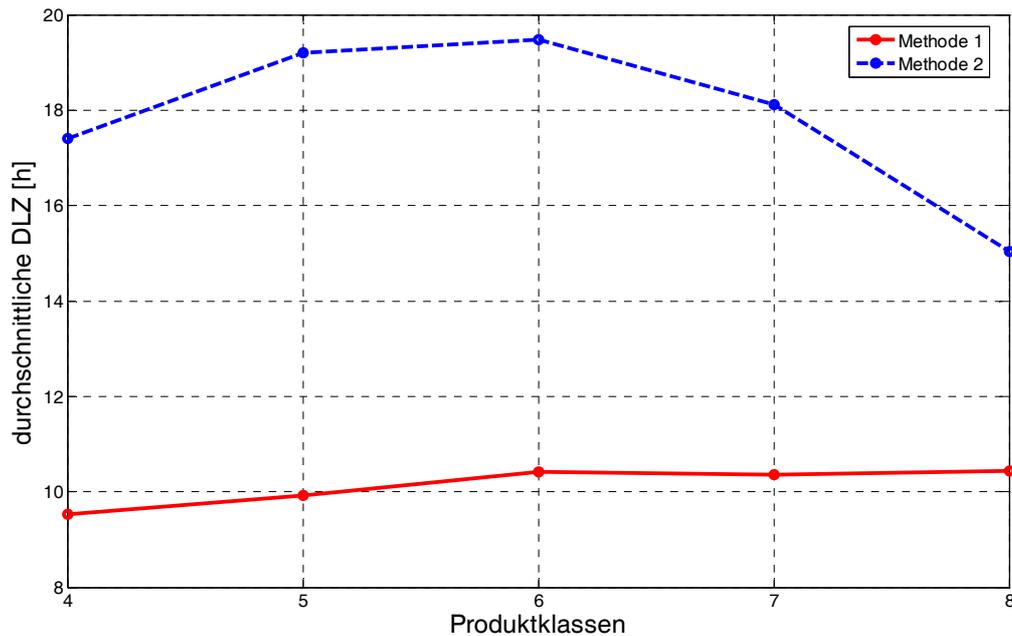


Abbildung 11: Mittlere Durchlaufzeit in Abhängigkeit der Zahl der Produktklassen

Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Durchlaufzeit von der Anzahl der unterschiedlichen Produktklassen. Bei 4, 5 und 6 Produkten deutet sich ein ähnlicher Verlauf wie bei der Untersuchung des Einflusses der Netzwerkgröße an. Doch bei weiterer Erhöhung der Produktklassenzahl zeigt sich, dass die Durchlaufzeit bei Methode 2 wieder geringer wird, während die von Methode 1 konstant bleibt. Auch die Standardabweichung verhält sich entsprechend, wie Abbildung 12 zu entnehmen ist. Es scheint also so zu sein, dass die Performance von Methode 2 mit steigender Produktklassenzahl immer besser wird. Dies bestätigt sich auch bei Betrachtung des Zielerreichungsgrades, der in Abbildung 13 dargestellt ist. Bei Methode 1 steigt der Zielerreichungsgrad leicht an, während er für Methode 2 abfällt.

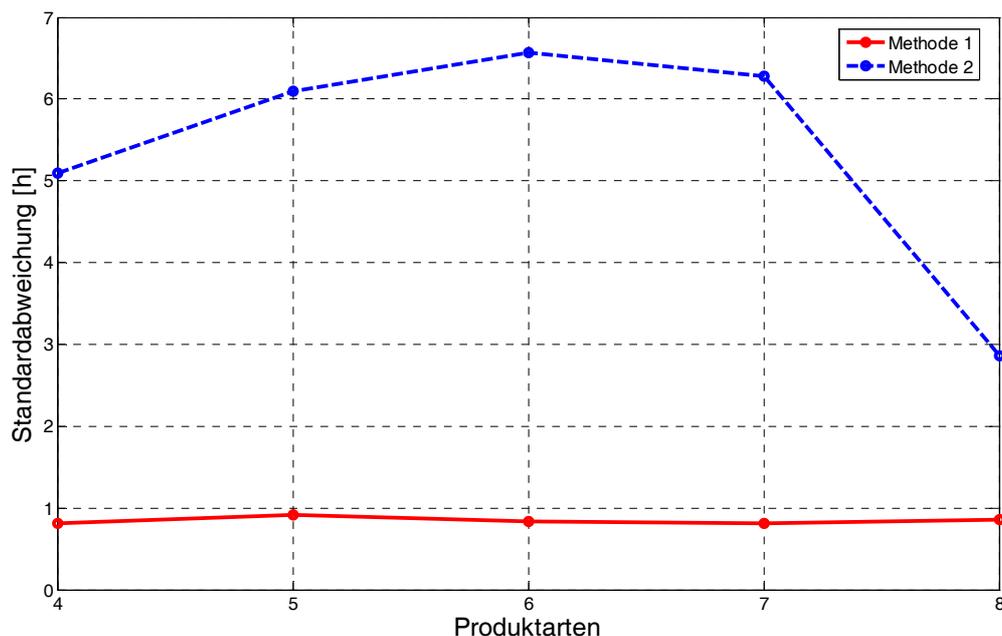


Abbildung 12: Standardabweichung der Durchlaufzeit in Abhängigkeit der Anzahl der Produktklassen

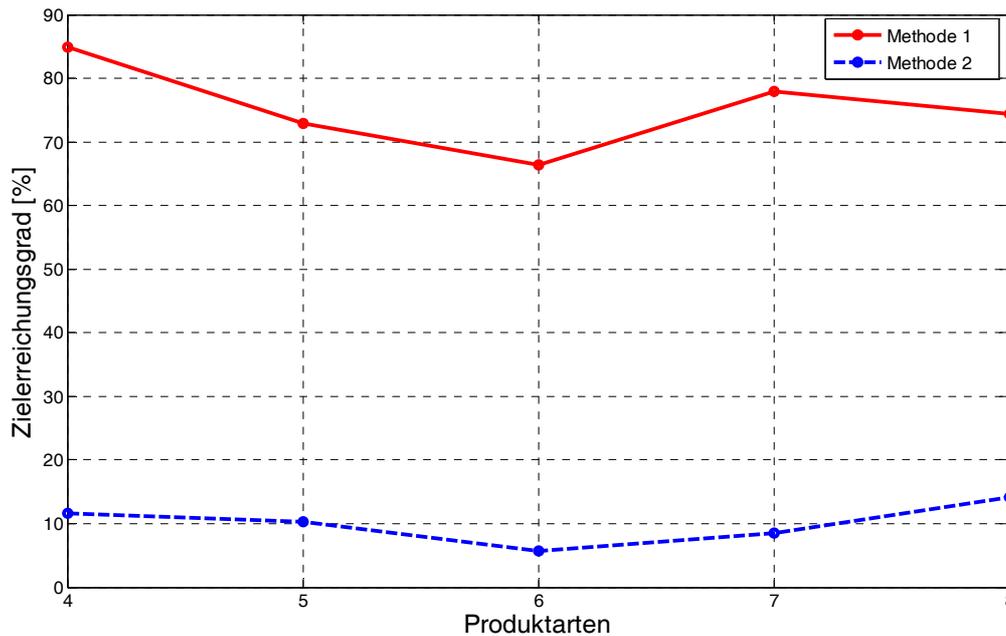


Abbildung 13: Zielerreichungsgrad (Anteil der Produkte innerhalb 120% der minimalen Durchlaufzeit) in Abhängigkeit der Anzahl der Produktklassen

5.4 Auswertung

Bei der Erhöhung der strukturellen Komplexität durch Erhöhung der Anzahl der Fertigungsstationen zeigt sich, dass Methode 1 eine konstante Zielerreichung trotz ansteigender Komplexität ermöglicht. Methode 2 hingegen zeigt ein Ansteigen sowohl der mittleren Durchlaufzeit als auch der Streuung und daraus resultierend eine schlechtere Zielerreichungsgrad bei steigender Komplexität. Dies ist auch dadurch begründet, dass bei steigender Anzahl an Fertigungsstationen auch die Möglichkeit zur parallelen Bearbeitung erleichtert wird. Da Methode 2 ein trägeres Verhalten als Methode 1 zeigt und zu geringerem Ausweichen auf parallelen Stationen neigt, nutzt sie die zunehmenden Wechsellmöglichkeiten auf parallele Stationen nicht aus.

Bei der Erhöhung der Produktklassen ändert sich auch der Auftragseingang, da für jedes neue Produkt der Mittelwert des Produkteingangs für alle anderen Produktklassen verringert werden muss. Eine immer höhere Zahl an Produktklassen erhöht die gleichmäßige Auslastung aller Fertigungsstationen und verringert so das Potential und die Notwendigkeit zum Wechsel auf parallele Stationen, so dass die trägere Methode 2 eine verbesserte Performance bei steigender Produktzahl zeigt.

Der Unterschied zwischen den beiden Methoden ist im Wesentlichen der Charakter der verwendeten Informationen. Methode 1 verwendet Informationen über zukünftige Wartezeiten, während Methode 2 Informationen über vergangene Prozesse verwendet. Da bei Methode 2 zusätzlich noch ein Mittelwert über die vergangenen Wartezeiten gebildet wird, ist diese Methode träger im Reagieren auf veränderte Systemzustände. Daraus resultieren ein trägeres Verhalten und eine geringere Zahl an Wechseln auf parallelen Stationen.

Resultat ist hier also, dass bei einer hohen Anzahl an Fertigungsstationen, die möglichst gleichmäßig belastet werden sollen, Methode 1 eine konstante Performance bei steigender Komplexität zeigt. Methode 2 zeigt hier einen sinkenden Zielerreichungsgrad. Bei vielen unterschiedlichen Produktklassen scheint dagegen Methode 2 eine Alternative darzustellen. Insbesondere dann, wenn man den Trend extrapoliert, scheint bei weiter ansteigender Produktzahl Methode 2 einen besseren Zielerreichungsgrad erreichen zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieses Beitrags wurde die These aufgestellt, dass Selbststeuerung eine Möglichkeit ist, trotz steigender Komplexität, einen besseren Grad der logistischen Zielerreichung, verglichen mit zentral und fremdgesteuerten Systemen, zu erreichen. Um diese These zu überprüfen, wurde in einem ersten Schritt der Zielerreichungsgrad verschiedener Selbststeuerungsmethoden bei steigender struktureller Komplexität untersucht. Dabei konnten für die beiden Methoden unterschiedliche Trends festgestellt werden.

Methode 1 zeigt eine konstante Performance bei steigender Systemgröße. Systeme in dieser Größenordnung können zwar auch von zentralen Systemen beherrscht werden, wenn man jedoch den Trend bei steigender Systemgröße extrapoliert, so wird es eine kritische Größe geben, an dem die konstante Performance der Selbststeuerungsmethode 1 einem zentralen Planungs- und Steuerungssystem überlegen ist.

Methode 2 zeigt ein trägeres Systemverhalten und scheint insbesondere dann eine Alternative darzustellen, wenn es nicht gewünscht ist, dass permanente Wechsel auf parallele Stationen stattfinden, etwa aus Kostengründen, oder wenn es aufgrund des Auftragseingangs nicht möglich ist auf parallele Stationen auszuweichen.

Dabei wurde die Qualität und Verlässlichkeit der verwendeten Informationen bisher nicht berücksichtigt. Es ist anzunehmen, dass die Informationen über zukünftige Ereignisse mit einem größeren Fehler behaftet sind als Informationen über vergangene Ereignisse. Dies könnte die Performance der Methode 2 noch deutlich verbessern und ist Gegenstand weiterführender Arbeiten.

Ebenso wird in zukünftigen Arbeiten der Vergleich mit realen, fremdgesteuerten Systemen weiter in den Vordergrund rücken, da in diesem Beitrag ein vielversprechender Trend zum Umgang mit steigender Komplexität festgestellt werden konnte.

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 "Selbststeuerung logistischer Prozesse" unterstützt.

Literaturverzeichnis

- [1] Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: Industrie Management, 20(2004)1, GITO, Berlin, 2004, S. 23-27.
- [2] Hülsmann, M.; Windt, K.: Autonomous Control – Development of a terminological system. Vorgesehen zur Publikation 2006.
- [3] Windt, K.; Böse, F.; Philipp, T.: Criteria and Application of Autonomous Cooperating Logistic Processes. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Research – Advances in Manufacturing Technology and Management, Gao, J.X.; Baxter, D.I.; Sackett, P.J. (eds.), Cranfield, 2005.
- [4] Scherer, E.: The Reality of Shop Floor Control – Approaches to Systems Innovation. In: Scherer, E. (ed.): Shop Floor Control – A Systems Perspective. Springer Verlag, Berlin u.a., 1998.
- [5] Schuh, G.: Produktkomplexität managen. Carl Hanser Verlag, München, 2005.
- [6] Ulrich, H.; Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Bern/Stuttgart, Haupt, 1988.
- [7] Deshmukh, A.; Talavage, J.; Barash, M.: Complexity in manufacturing systems. Part 1: analysis of static complexity. IIE Trans 1998;30:645–55.
- [8] Frizelle, G.: The management of complexity in manufacturing. London: Business Intelligence; 1998.

- [9] Frizelle, G.; Woodcock, E.: Measuring complexity as an aid to develop operational strategy. *International Journal of Operations and Production Management*, 1995; 15(5). S. 26–39.
- [10] Sivadasan, S.; Efstathiou, J.; Shirazi, R.; Alvez, J.; Frizelle, G.; Calinescu, A.: Information complexity as a determining factor in the evolution of supply chain. *Proceedings of the International Workshop on Emergent Synthesis*, 1999.
- [11] Jones, A.; Reeker, L.; Deshmukh, AV.: On information and performance of complex manufacturing systems. *Proceedings of the Manufacturing Complexity Network Conference*, April 2002.
- [12] Karp, Abr.: Improving shop floor control: an entropy model approach. *International Journal of Production Research* 1994;30(4). S. 923–938.
- [13] Gellmann, M.; Lloyd, S.: Information measures, effective complexity, and total information. *Complexity* 1996;1(1). S. 44–52.
- [14] Shannon, CE.; Weaver, W.: *The mathematical theory of communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press; 1949.
- [15] Amara, L.; Ottino, J.: Complex networks *European Physical Journal B*, May 14, 2004.
- [16] Barabasi, A.; Oltvai, Z.: Network biology: understanding the cells functional organization. *Nature*, 5, 2004. S. 101–113.
- [17] Costa, L.; Rodrigues, F.; Travieso, G.; Villas Boas, P.: Characterization of complex networks: A survey of measurements cond-mat/0505185, 2005.
- [18] Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; de Beer, Ch.; Jagalski, Th.: Modelling and analysis of autonomous shop floor control. In: *Proceedings of the 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*. Florianopolis, Brazil, 2005, CD-ROM.
- [19] Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; de Beer, Ch.; Jagalski, Th.: Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches. In: *Annals of the CIRP* 55(2005)1, pp. 413-417.
- [20] Armbruster, D.; de Beer, C.; Freitag, M.; Jagalski, T.; Ringhofer, C.: Autonomous control of production networks using a pheromone approach. In *Physica A: Special Issue on Information and Material Flows in Complex Networks*. Im Druck.