

Kausaler Zusammenhang von Komplexität und Dynamik in der Produktion

1 Einleitung

Um ihre Chancen am Markt zu verbessern, besinnen sich viele Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen und gehen deshalb Kooperationen mit Zulieferern und Distributoren ein. Dadurch entstehen zwischen vielen einzelnen unabhängigen Unternehmen starke Verflechtungen, aus denen Produktionsnetzwerke entstehen. Sie zeichnen sich durch eine ständig wachsende Komplexität aus und sind heutzutage mehr denn je gezwungen, sich schnell an sich dynamisch verändernde Märkte anzupassen. Diese und weitere Faktoren erschweren eine unternehmensübergreifende Produktionsplanung und -steuerung (PPS) dieser Netzwerke enorm. Die PPS stellt dabei verschiedene Methoden und Verfahren bereit, um die Wirtschaftlichkeit der Produktion zu „optimieren“ und sich dadurch im Wettbewerb behaupten zu können. Relevante Zielgrößen sind hier u. a. Termintreue, Durchlaufzeit, Qualität und Auslastung. All diese Größen beschreiben die wirtschaftliche Leistung bzw. die Konkurrenzfähigkeit eines Unternehmens.

Da die Komplexität und die Dynamik der Netzwerke eine so große Rolle für die einzelnen Unternehmen spielen, beschäftigen sich aktuelle Forschungsarbeiten mit der Thematik. Grundsätzlich lässt sich das Phänomen der Dynamik und der Komplexität aber nicht nur in Netzwerken finden sondern in fast jeglicher Art von Produktionssystemen. Im Einzelnen weist nicht nur das Netzwerk an sich eine hohe Dynamik auf, sondern es lässt sich in einzelnen Unternehmen oder sogar an einzelnen Produktionsstätten eine gewisse Dynamik identifizieren. Und auch der Komplexitätsbegriff ist nicht an die Existenz eines Netzwerkes gebunden. Sie tritt allein durch die Ablaufreihenfolge von Arbeitsschritten auf unterster Ebene auf.

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit Komplexität und Dynamik kausal zusammenhängen. Im Folgenden werden beide Begriffe einzeln erläutert, verschiedene Ansätze zu ihrer Messbarkeit vorgestellt und der entsprechende kausale Zusammenhang hergestellt. Es wird sich zeigen, dass ein kausaler Kreislauf aus Komplexität und Dynamik besteht: aus Dynamik entsteht Komplexität und aus Komplexität entsteht Dynamik.

2 Komplexität erzeugt Dynamik

Komplexität wird je nach Autor und Wissenschaftsgebiet unterschiedlich definiert und kann im Allgemeinen als „Vielschichtigkeit“ umschrieben werden. Eine weitere allgemeine Definition besagt, dass Komplexität verstanden werden kann als die Eigenschaft eines Systems oder Modells, die Beschreibungen seines Gesamtverhaltens in einer beliebigen Sprache zu erschweren, selbst wenn man vollständige Informationen über seine Einzelkomponenten und ihre Wechselwirkungen besitzt.

Bislang ist der Komplexitätsbegriff bereits in vielen Bereichen der Wissenschaft eingesetzt worden. In der Informatik zum Beispiel bezeichnet Komplexität ein Konzept zum Ressourcenverbrauch von Algorithmen, die so genannte algorithmische Tiefe. Die Informationstheorie dagegen verwendet den Begriff für den Informationsgehalt von Daten. In den Wirtschaftswissenschaften beschäftigt sich vor allem das Themengebiet Komplexitätsmanagement mit der Thematik. Relevant für die Produktion ist die Systemtheorie. Sie ist ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, das der Beschreibung und Erklärung komplexer Phänomene dient. Die Analyse von Strukturen und Funktionen soll häufig Vorhersagen über das Systemverhalten erlauben. Ulrich und Probst [Ulr88] untersuchten zu diesem Zweck die Anzahl der im System enthaltenen Elemente, ihre Vernetzung und die Anzahl unterschiedlicher Systemzustände. Laut Scherer [Sche98] sind Systeme im Allgemeinen nicht in einfacher Weise beschreibbar, was er als subjektive Komplexität interpretiert. Des Weiteren führt er eine Unterscheidung zwischen struktureller (Anzahl Elemente und deren Vernetzung) und dynamischer Komplexität (feedback-loops, dynamisches und nichtlineares Verhalten) ein. Allgemein beziehen sich diese Studien auf jegliche Art von Systemen. Aber die Theorie kann ohne weiteres auf Produktionssysteme angewendet werden.

In allen oben genannten Bereichen steht natürlich eine Quantifizierung der Komplexität im Vordergrund, um verschiedene Untersuchungsgegenstände vergleichbar zu machen. Dieses Vorhaben gestaltet sich in der Informationstheorie recht einfach. Nach Shannon [Sha49] kann die so genannte Entropie zur Quantifizierung des Informationsgehalts von Daten herangezogen werden. Sie ist ohne großen Aufwand zu berechnen und ist ein Maß für Redundanz der Daten, also deren Informationsgehalt. In ihrem Ursprung kann sie als Analogon zur physikalischen Bedeutung der Entropie angesehen werden, die nach Clausius und Boltzmann die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Fluktuationen eines Vielteilchen-Systems beschreibt. Sie ist in diesem Fall also ein Maß für die Unsicherheit, den exakten Zustand eines Systems zu kennen. Beispielsweise kann ein Behälter mit Gas durch seine Zustandsgrößen Temperatur, Druck und Volumen beschrieben werden. Diese Grö-

ßen sind einfach und präzise messbar. Aber es kann unmöglich der Ort und der Impuls jedes einzelnen Teilchens des Gases bestimmt werden. Es können also recht einfach makroskopische Größen quantifiziert werden, aber die mikroskopischen entziehen sich unserer Kenntnis.

Diese Tatsache ist mit einem Produktionssystem vergleichbar. Makroskopische Größen, wie mittlere Durchlaufzeit, Work-in-process (WIP) oder ähnliche sind ohne großen Aufwand zu bestimmen, aber es kann im Allgemeinen aufgrund der riesigen Informationsflut ähnlich wie bei obigem Beispiel nicht der Ort und der Prozessschritt jedes einzelnen Teils im Produktionssystem erfasst werden. Deshalb liegt es nahe, den Entropiebegriff auf Produktionssysteme zu übertragen. Dieser Schritt wurde bereits zum Beispiel von Frizelle und Woodcock [Fri95] gemacht. Sie definierten Gleichungen zur Quantifizierung von Komplexität auf Basis der Vielfalt und Unsicherheit von Informationen innerhalb des Systems.

Eine einzige Kennzahl kann aber nur selten allen Facetten der Komplexität gerecht werden. Deshalb zeigte Costa [Cos05] eine Möglichkeit auf, komplexe Netzwerke durch einen Merkmalsvektor zu charakterisieren. So sind auch verschiedene Systeme vergleichbar und ihre Komplexität kann auf einfache Weise quantifiziert werden. Allerdings wird bei diesem Ansatz nicht zwischen den unterschiedlichen Aspekten der Komplexität differenziert.

Dadurch wird klar, dass die Darstellung der Komplexität durch eine Zahl oder einen Vektor dem Ziel nicht gerecht wird. Vielmehr müssen die unterschiedlichen Aspekte der Komplexität einzeln in Betracht gezogen werden. Suh [Suh05] definiert zu diesem Zweck vier unterschiedliche Arten von Komplexität.

Als erstes wird zwischen zeitabhängiger und zeitunabhängiger Komplexität unterschieden. Die erstere beschreibt alle statischen Eigenschaften des Produktionssystems, die zu einem bestimmten Zeitpunkt auftreten und sich nicht ändern, während die zweite alle dynamischen Eigenschaften beschreibt, die sich im Verlauf der Zeit ändern können. Beide teilen sich wiederum ein weiteres Mal auf. So beinhaltet die zeitunabhängige Komplexität eine reale und eine imaginäre Komponente. Der Unterschied zwischen beiden lässt sich durch die genaue Kenntnis über das System erklären. Ein vollständig beschriebenes System kann durch seine Wirkungszusammenhänge, Bestandteile, seine räumliche und zeitliche Ausdehnung als komplex eingestuft werden. Diese wird dann als reale Komplexität bezeichnet. Hingegen entsteht die imaginäre Komplexität auf Grund von mangelndem Wissen oder Verständnis der genauen Beschreibung des Systems.

Die zeitabhängige Komplexität tritt auf, da zukünftige Ereignisse das System in unvorhersehbarer Weise beeinflussen können. Dies kann sich periodisch nach einem gewissen Zeitraum wiederholen, ohne dass das System dadurch instabil oder chaotisch auf einer längeren Zeitskala betrachtet reagiert (periodische Komplexität). Im Gegensatz dazu steht die kombinatorische Komplexität, die das eben erwähnte periodische Verhalten nicht an den Tag legt und so das System instabil oder chaotisch werden lassen kann. Der Name rührt daher, dass Entscheidungsprobleme meist kombinatorischer Art sind und die zukünftige Entwicklung des Systems ausschlaggebend von den Entscheidungen, zum Beispiel über Disposition oder Terminplanung abhängt.

Eine umfangreichere Darstellungsmöglichkeit verschiedener Aspekte der Komplexität ist eine Darstellung als Würfel [Phi06]. Dabei spiegeln seine drei Dimensionen die unterschiedlichen Komponenten wider: die zeitspezifische, die organisationale und die systemische. Bereits in der Definition von Suh wurden zeitunabhängige und zeitabhängige Gründe für Komplexität ausgemacht. An dieser Stelle kann aber die weitere Unterteilung beider nach verschiedenen Kriterien vernachlässigt werden. Denn durch eine genaue Untersuchung des Systems kann die imaginäre Komponente der Komplexität eliminiert werden, so dass die reine reale Komplexität übrig bleibt, die dann als zeitunabhängige Komponente wahrgenommen wird. Auch die kombinatorische Komplexität kann durch verschiedene Methoden als periodische ausgedrückt werden und verbleibt als zeitabhängige Komponente. Es wird also nur die dynamische, zeitabhängige und statische, zeitunabhängige Komponente der Komplexität betrachtet. Diese Unterscheidung wird aber der Diversität des Komplexitätsbegriffes in Produktionssystemen nicht gerecht. Deshalb wird die Dimension der zeitspezifischen Komponente durch zwei weitere, die organisationale und die systemische Komponente, auf drei Dimensionen erweitert. Die systemische Komponente bezieht sich auf externe und interne Faktoren des Systems, die durch die Systemgrenze voneinander getrennt werden. Informations- und Materialflüsse, Systemelemente und deren Beziehungen innerhalb des Systems bestimmen die interne Komplexität, während die externe Komplexität von den gleichen Bausteinen aber über die Systemgrenze hinaus definiert wird. Die organisationale Komponente umfasst sowohl die prozessspezifische Komplexität als auch die strukturelle. Dabei beschränkt sich erstere auf die Komplexität, die durch die Anzahl und Vielfältigkeit der Prozesse hervorgerufen wird. Die strukturelle Komplexität entsteht hingegen durch die Anzahl und Verbindung von Systemelementen. Eine Visualisierung der dreidimensionalen Darstellung mit einer Vektorquantifizierung der Komplexität ist in Abbildung 1 zu sehen.

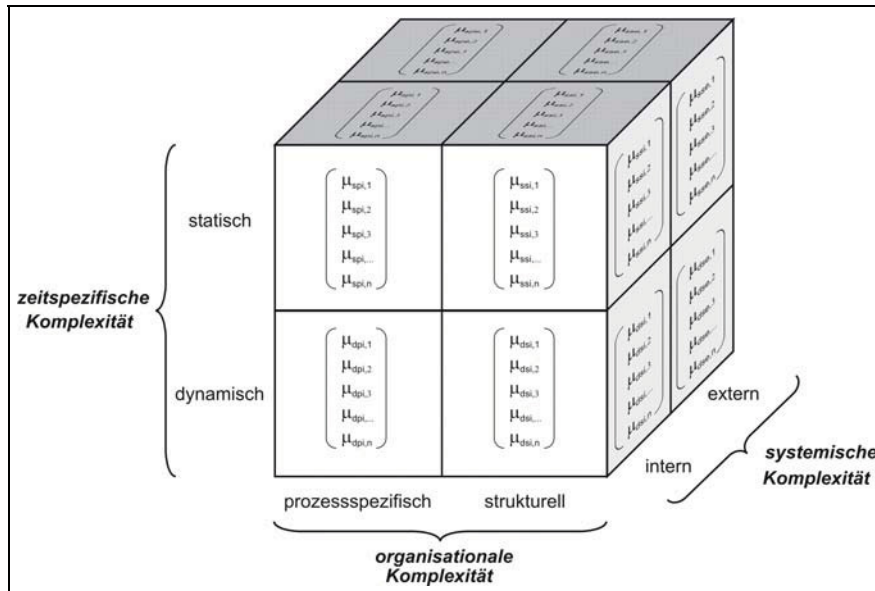


Abbildung 1
Darstellung der Quantifizierung der Komplexität mit Hilfe eines Würfels [Phi06].

Wichtigste Neuerung ist hierbei, dass nicht die Gesamtheit der Komplexität durch eine einzige Zahl ausgedrückt wird, sondern vielmehr komponentenspezifisch eine Kennzahl oder ein Vektor bestimmt wird. Das bedeutet letztendlich, dass zusätzlich zur Quantifizierung der Komplexität auch ihre Lokalisierung innerhalb eines dreidimensionalen Raumes möglich wird. Die Koordinaten dieses Raumes bestimmen dann die Zugehörigkeit der untersuchten Komplexität zu den oben genannten Klassen.

Mit diesem Hilfsmittel kann nun der kausale Zusammenhang zwischen Komplexität und Dynamik untersucht werden. Dabei kann die zeitspezifische Komplexität ohne Einschränkung der Allgemeinheit vernachlässigt werden, weil sie selbst aus der Dynamik hervorgeht (vgl. Abb. 1). Die weiteren Aspekte der Komplexität und deren dynamische Auswirkungen auf das System werden im Folgenden beleuchtet. Die systemischen Komponenten, die durch die Systemgrenze voneinander separiert werden, führen zu zwei unterschiedlich behandelbaren Szenarien. Die externe Komplexität beschreibt die verschiedenen unternehmensübergreifenden Prozesse und Strukturen und ist somit eine Charakterisierung von Produktionsnetzwerken. In unterschiedlichen Veröffentlichungen wurden in solchen Netzwerken bereits dynamische Aspekte festgestellt. Als Beispiele sollen

an dieser Stelle irreguläre Wirtschaftszyklen [Hel04] und der so genannte Bullwhip-Effekt [Lee97] genannt sein. Ersteres beschreibt das Auftreten von nichtperiodischen Oszillationen in einem kontinuierlichen Flussmodell von Produktionsnetzwerken. Dabei hängt die Dynamik des Systems extrem von der Topologie des Netzwerks, aber auch von Parametern wie Preis- oder Bestellpolitik ab. Dadurch wird deutlich, dass durch die strukturelle Komplexität des Netzwerks eine gewisse Dynamik induziert wird.

Der Bullwhip-Effekt beschreibt ein ähnliches Szenario, dass in Lieferketten mit mehr als zwei Knoten kleine Veränderungen in der Kundennachfrage am Ende der Kette zu starken Oszillationen im Bestand und in der Produktionsrate entlang der gesamten Lieferkette führen können. Allerdings wird dies nicht anhand eines Modells gezeigt, sondern durch Untersuchungen an Unternehmen. Als Ergebnis haben Lee et al. [Lee97] für dieses Phänomen vier Hauptgründe ausgemacht: Falsche oder schlechte Vorhersage der Nachfrage, Bestellungen zusammenfassung, Preisfluktuationen, spekulative Bestellung bei Niedrigbeständen. All diese Gründe können innerhalb des Würfelmodells der Komplexität als Vektorkomponenten in der prozessspezifischen, internen oder externen Komplexität wieder gefunden werden.

Die interne Komplexität hingegen beschreibt unternehmensinterne Prozesse und Strukturen, also beispielsweise Fertigungsanweisungen, Kommunikationswege oder das Fabriklayout. Durch historisch gewachsene Strukturen und Prozesse, also nicht analytisch oder wissenschaftlich ermittelte Optimierungen, kann die Komplexität der Produktion durchaus zu einer erhöhten internen Dynamik führen. So kann es im Zuge von Erweiterungen und Vergrößerungen des Maschinenparks dazu kommen, dass diese nicht mehr optimal angeordnet sind und somit zwischen ihnen Material unnötig weit transportiert werden muss, was einer erhöhten Dynamik gleich kommt. Außerdem tragen informationsverarbeitende Prozesse durch nicht optimale Taktung, also zu lange Aktualisierungszyklen, dazu bei, dass eine nicht optimale Produktionsplanung und -steuerung zu Ineffizienzen und höherer Dynamik führt. Es zeigt sich also in unterschiedlichen Ausprägungen, dass in der Produktion die Komplexität als eine kausale Ursache der Dynamik angesehen werden kann.

3 Dynamik erzeugt Komplexität

Um die Bidirektionalität der Kausalbeziehung zwischen Dynamik und Komplexität herzustellen, ist nun zu zeigen, dass nicht nur die Komplexität in Produktionssystemen zu Dynamik führt, sondern ebenfalls der umgekehrte Fall, dass aus Dynamik Komplexität

folgt, auftritt. Dazu ist es vorab notwendig, die Dynamik zu charakterisieren, um erwünschte und nicht erwünschte bzw. beherrschbare und nicht beherrschbare Effekte zu trennen.

Im Allgemeinen wird von Dynamik gesprochen, wenn ein System oder ein Prozess Veränderungen unterliegt. In einem Produktionssystem bedeutet dies, dass beispielsweise Bestände schwanken, Durchlauf- oder Prozesszeiten variieren. Aber auch Maschinenstandorte oder Prozessschritte können sich ändern. Ein erstes Kriterium ist die Unterscheidung zwischen nicht-deterministischer und deterministischer Dynamik. Im ersten Fall liegt dem Verhalten des Systems kein deterministisches Gesetz zugrunde, es kann also aus dem aktuellen Zustand nicht auf den folgenden Zustand geschlossen werden. Diese Systeme sind im Allgemeinen stochastischer Natur und sind mit den Gesetzen und Methoden der Statistik gut zu beschreiben. Genaue Vorhersagen über das zukünftige Systemverhalten können aber nicht getroffen werden, sondern vielmehr nur statistische Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Ereignisses aufgezeigt werden.

Der interessantere Fall, dass dem Prozess eine deterministische Dynamik zugrunde liegt, ist bereits aus der Physik, im Speziellen aus der Theorie der dynamischen Systeme, bekannt. Hier wurden bereits vielfältige Arbeiten zur Klassifizierung derartiger Systeme geleistet. So lässt sich die Dynamik durch unterschiedliche Kennzahlen charakterisieren, deren korrekte Interpretation eine Aufteilung in unterschiedliche Dynamikformen ermöglicht. Die wohl am weitesten verbreiteten und bekanntesten Methoden sind die Berechnung des Leistungsspektrums und der Autokorrelation. Beides sind lineare Methoden und geben Hilfestellungen zur Erkennung von Periodizitäten in einem Signal. Aus der nichtlinearen Zeitreihenanalyse sind zum Beispiel das Phasenraumportrait, die Lyapunov-exponenten und die Dimensionsbestimmung bekannt. Um diese Begriffe erklären zu können, sind einige Grundlagen notwendig. Der Zustand eines beobachteten Systems wird eindeutig durch einen Satz von Beobachtungswerten, den Variablen oder Observablen, beschrieben. Sie spannen einen Zustandsraum auf, den so genannten Phasenraum. Ein Punkt hierin definiert dann den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt – es können einfach die Koordinaten abgelesen werden, die mit den Beobachtungswerten identifiziert werden. Der zeitliche Verlauf hingegen wird durch eine Hintereinanderreihung von Punkten, also einer Kurve beschrieben, die so genannte Trajektorie. Innerhalb dieses Phasenraums kann es nun Bereiche geben, die benachbarte Trajektorien anziehen, so genannte Attraktoren.

Durch die oben genannte Dimensionsbestimmung wird der Freiheitsgrad einer Bewegung oder eines gesamten Systems quantifiziert und kann auf verschiedene Arten berech-

net werden. Die Lyapunovexponenten sind ein Maß für die Konvergenz bzw. Divergenz benachbarter Trajektorien in den einzelnen Freiheitsgraden. So beschreibt ein negativer Lyapunovexponent, dass benachbarte Trajektorien in der betrachteten Raumdimension auf einem Attraktor zusammenlaufen; ein positiver Exponent beschreibt, dass sich diese Trajektorien exponentiell voneinander entfernen; und ein Wert von Null zeigt, dass ein kritisches Verhalten vorliegt. Die Visualisierung der Dynamik kann durch ein Phasenraumportrait geschehen. Dabei wird in der Regel eine Trajektorie des Systems in einem Koordinatensystem dargestellt. Dabei können unterschiedliche Attraktortypen auftreten, die ausführlich in [Arg04] beschrieben werden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Typen und deren Kennzahlen ist in Abbildung 2 zu sehen.

Ein Problem all dieser Methoden ist, dass eine Differenzierung zwischen stochastischer und chaotischer Dynamik nicht trivial ist. Beide können ähnliche Kennzahlen aufweisen, aber vollkommen unterschiedlichen Grundlagen unterliegen. Außerdem fällt ins Gewicht: je größer das System, also je mehr Variablen, desto höher-dimensional der Zustandsraum und umfangreicher die Dynamik.

Phasen-Portrait	Zeit-Verlauf	Leistungs-Spektrum	Auto-Korrelation	Lyapunov-Exponenten	Dimension (z.B. D_c)
				- - -	0
				0 - -	1
				0 0 -	2
				+ 0 -	$2 < D_c < 3$

Abbildung 2
 Verschiedene Attraktoren und deren Kennzahlen (aus [Arg04]).

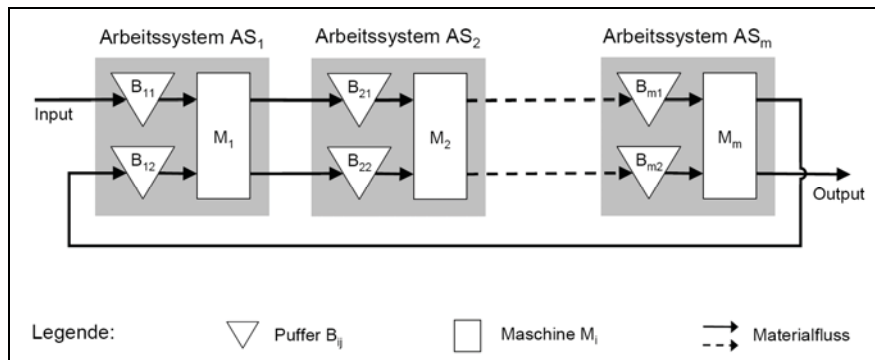


Abbildung 3
 Schematische Abbildung des betrachteten Modells [Fre05].

Diese Methoden und Klassifizierungswerkzeuge haben aber nicht nur theoretischen Wert, sondern können auch in der Produktionstechnik eingesetzt werden. So zeigen sich in einem einfachen Modell aus zwei Arbeitssystemen mit Materialrückfluss bereits deutlich dynamische Effekte (für eine ausführliche Darstellung sei auf [Fre05] verwiesen).

Dieses Modell besteht aus zwei Arbeitssystemen ($AS_1 + AS_2$) mit je einer Produktionseinheit. Die Arbeitsinhalte gelangen in den ersten Puffer (b_{11}) des ersten Arbeitssystems, werden bearbeitet und zu Beginn einer neuen Arbeitsschicht in das nachgelagerte System (AS_2) transportiert. Das heißt, dass die Bearbeitung als kontinuierlicher Fluss approximiert und der Transport zwischen den Arbeitssystemen zeitdiskretisiert wird. Im zweiten System gelangen sie in den ersten Puffer (b_{21}), werden bearbeitet und in den zweiten Puffer des ersten Systems (b_{12}) transportiert. Da jedes Arbeitssystem nur eine Produktionseinheit besitzt, muss an dieser Stelle die Entscheidung getroffen werden, welcher Puffer zu erst bedient werden soll. Hier kommt die „Last-Buffer-First-Serve-Regel“ zum Einsatz. Das bedeutet, dass als erstes der Puffer mit den am weitesten bearbeiteten Teilen, hier also der zweite, geleert wird. Danach werden die Teile in den zweiten Puffer des zweiten Systems transportiert und hier ebenfalls nach erwähnter Last-Buffer-First-Serve-Regel bearbeitet. Es werden also die Arbeitsinhalte der Puffer b_{22} denen der Puffer b_{11} vorgezogen.

Da sich dieses System durch eine Vielzahl an Observablen auszeichnet, wird der Einfachheit halber nur die zeitliche Entwicklung des ersten Puffers betrachtet. Dies ist aber legitim, da sich selbst aus der Beobachtung einer Variablen die Dynamik des gesamten Systems rekonstruieren lässt. Beispielhaft soll hier das Phasenraumportrait des Puffers b_{11} des Modells dargestellt werden. Dazu wurden Simulationen des Modells durchgeführt,

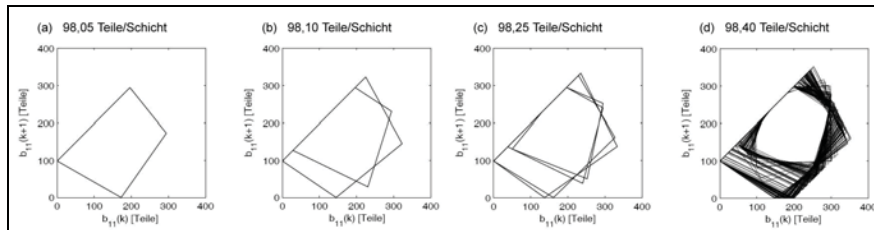


Abbildung 4
Periodenverdopplungen und Chaos im vorgestellten Modell [Fre05].

wobei alle Parameter konstant gehalten wurden bis auf die Eingangsrate des ersten Puffers im ersten Arbeitssystem. Dieser eine Parameter unterlag nur geringen Änderungen, aber wie in Abbildung 4 zu sehen ist, haben diese geringen Abweichungen starken Einfluss auf die Dynamik des Systems. So ist in Abbildung 4a ein periodisches Verhalten zu erkennen: Nach vier Zeitschritten erreicht das System wieder seinen Ausgangszustand. Hingegen verdoppelt sich die Anzahl der Zeitschritte in Abbildung 4b auf acht und in Abbildung 4c auf 16. Im letzten dargestellten Bild (Abbildung 4d) ist keine Periodizität mehr zu erkennen, so dass von einem chaotischen Verhalten gesprochen werden kann.

Dieses Periodenverdopplungsverhalten kann in vielen Modellen in der nichtlinearen Dynamik wieder gefunden werden und ist auch allgemein als „Weg ins Chaos“ bekannt.

Es zeigt sich also, dass Dynamiken auftreten können, die nicht oder kaum beherrschbar sind. So führt die Beherrschung von stochastischen, also nicht-deterministischen Prozessen zu einer statistischen Behandlung, die nur Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Ereignisses oder Schätzwerte für relevante Größen liefern kann. Es muss also immer mit Ungenauigkeiten gerechnet werden, was den gesamten Produktionsprozess und vor allem dessen Planung und Steuerung anfällig für Probleme macht. Um alle Eventualitäten berücksichtigen zu können, muss dadurch ein komplexes Planungs- und Steuerungswesen installiert werden. Ähnlich verhält es sich beim Auftreten von deterministischem Chaos. Hier existiert zwar eine Reihe von Regelungs- und Steuerungsmethoden, doch kann ihre Anwendung durchaus als komplex eingestuft werden. So muss die Dynamik vorangehend gründlich analysiert werden und dann eine adäquate Methode gefunden werden. Dieses Unterfangen kann sehr aufwendig sein, da es kein einfaches Rezept gibt, diese spezielle Methode zu finden. Es ist also zunächst nötig, das System und seine Dynamik zu modellieren. Anschließend muss dann aus einem Pool von mög-

lichen Methoden die richtige gefunden und deren Parameter zusätzlich noch angepasst werden. Dieses Verfahren ist normalerweise bei Veränderung der Dynamik zu wiederholen, denn grundsätzlich muss eine Steuerung bei veränderten Bedingungen nicht weiterhin gute Resultate erzielen. Somit wird deutlich, dass Dynamik zu einer Erhöhung der prozessspezifischen Komplexität führt.

Die Dynamik kann, wie bereits erwähnt, beispielsweise in Form von Bestands- und Bedarfsschwankungen auftreten. Durch eine Verstärkung dieser Dynamik kann sich ein produzierendes Gewerbe gezwungen sehen, seine Puffer und Lager anzupassen und gegebenenfalls auszubauen, um durch genügend hohe Sicherheitsbestände die Dynamik auszugleichen. Eine weitere Möglichkeit, dem zu begegnen, ist eine Erhöhung der Flexibilität der Produktion. Das kann sich in Form flexibler Auslastung von Maschinen so ausdrücken, dass Maschinen bei Bedarf zum Beispiel umgerüstet werden oder sich die Verteilung der Arbeitsinhalte auf unterschiedliche Maschinen flexibel an deren Auslastung orientiert. Dadurch entstehen neue Transportwege zwischen verschiedenen Arbeitsstationen, um die Erhöhung der Flexibilität zu erreichen. Beide Beispiele zeigen, dass die Beherrschung der Dynamik ebenfalls zu einer Erhöhung der strukturellen Komplexität führt.

Die auffälligste Beziehung zwischen Komplexität und Dynamik ist aber schon bei Betrachtung des Komplexitätswürfels in Abbildung 1 zu erkennen. Eine der drei Komponenten der Komplexität selbst besitzt eine dynamische Komponente. Es besteht also ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen der Dynamik eines Systems und seiner Komplexität, denn die Messungen der Dynamik oder dynamischer Einflussfaktoren spezifizieren einen Teil der Komplexität selbst. Dies stimmt mit bisherigen Veröffentlichungen zu dem Thema überein, denn viele Autoren nutzten den Ansatz, dass grundsätzlich ein Auftreten von Komplexität durch dynamische Veränderungen beschrieben werden kann (z. B. [Sche98, Suh05]). Es besteht also in dieser Richtung nicht nur ein kausaler Zusammenhang zwischen Dynamik und Komplexität, sondern vielmehr ist die Dynamik ein fester Bestandteil.

Eine genauere Einordnung dieser Phänomene in den Komplexitätswürfel zeigt, dass sich die Dynamik einerseits in systeminterne und -externe Bestandteile aufteilen lässt. Dabei spielt die Systemgrenze eine entscheidende Rolle, denn während die interne Komplexität eine Produktionsstätte und deren Dynamik beschreibt, führt die externe Komplexität zur Beschreibung von Netzwerken und dem Zusammenspiel der kooperierenden Unternehmen. Andererseits spielt die Dynamik in der organisationalen Sicht eine ebenfalls gewichtige Rolle. Hierbei lassen sich dynamische Effekte sowohl in der Prozesssicht als auch in der Struktursicht erkennen. Dass Prozesse, sowohl intern als auch extern, auf sich verändernde Umweltbedingungen angepasst werden, ist selbstverständlich. Ebenso rea-

giert auch die strukturelle Komponente auf Dynamik, so dass beispielsweise die Topologie der Netzwerke sich ändert oder aber unternehmensintern zum Beispiel das Fabriklayout den veränderten Bedingungen angepasst wird.

Abschließend lässt sich feststellen, dass sowohl die Komplexität zu Dynamik führt, als auch die Dynamik zu Komplexität. Es ist also ein sich selbst verstärkender Kreislauf gegeben, wenn keine adäquaten Gegenmaßnahmen getroffen werden.

4 Lösungen und Ausblick

Um die Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems insgesamt sicherzustellen, ist auch darauf zu achten, die Produktionsplanung und -steuerung effektiv arbeiten zu lassen und den Arbeitsaufwand dafür in Grenzen zu halten. Denn ein zu hoher Planungsaufwand verbraucht nur unnötige Ressourcen. Deshalb ist es von großer Wichtigkeit, den beschriebenen kausalen Kreislauf zwischen Dynamik und Komplexität zu durchbrechen. Dazu muss entweder der Einfluss der Dynamik auf die Komplexität oder umgekehrt der Einfluss der Komplexität auf die Dynamik reduziert werden. Auf den ersten Blick läuft das auf zwei klassische Möglichkeiten hinaus: entweder die Dynamik zu beherrschen oder die Komplexität zu verringern.

Gängige Methoden zur nachträglichen Beherrschung der Dynamik sind Ansätze aus der Steuerungs- und Regelungstheorie. Die Theorien sind in ihren spezifischen Fachrichtungen recht ausgereift und werden vielfach bereits in der Produktion erprobt bzw. angewendet. Es besteht hier aber weiterhin Forschungsbedarf. Ein anderer viel versprechender Ansatz ist die Anwendung von Methoden der Synchronisationstheorie [Scho04a].

Die interne Komplexität zu verringern, muss an dieser Stelle leider nicht immer zum Ziel führen. Die nichtlineare Dynamik zeigt, dass selbst einfachste Systeme bei falscher Parameterwahl chaotisches Verhalten zeigen können (z. B. Duffing-Oszillator [Arg94]), was ebenfalls in Modellen einfacher Produktionssysteme beobachtet wurde [Kat00]. Es kommt also nicht nur darauf an, wie hoch die Komplexität einzuschätzen ist, sondern auch in welchem Raumbereich des Komplexitätswürfels sie auftritt und unter welchen Bedingungen (also mit welchen Parametern) das System arbeitet. So sollte in Zusammenhang mit einer Komplexitätsverminderung eine umfangreiche Analyse der dynamischen Eigenschaften einhergehen, um das Produktionssystem zu optimieren.

Mit der externen Komplexität, die zu einer Dynamik innerhalb von Netzwerken führt, beschäftigt sich die so genannte „Complexity Science“ (z. B. [Hey06]). Die lokalen Regeln

innerhalb eines Knotens sind festgelegt und auch recht simpel. Allerdings führen sie im Allgemeinen zu global nicht vorhersagbarem Verhalten. Auch diesem Phänomen kann mit den klassischen Ansätzen nicht begegnet werden.

Es zeigt sich also, dass die klassischen Konzepte zwar in den jeweiligen Theorien gute Ergebnisse erzielen, diese aber nur teilweise in die Produktion übertragbar sind. Aber es existieren bereits Konzepte, die zur Lösung dieser Probleme herangezogen werden können. Dazu gehören unter anderem die Selbststeuerung, Multi-Agenten-Systeme (MAS) und Selbstorganisation.

Die Selbststeuerung [Fre04, Scho04b] beschäftigt sich mit der dezentralen Entscheidungsfindung in Prozessen. Es findet also keine zentrale Produktionsplanung und -steuerung statt, sondern auf unterster Ebene besitzen die Objekte, wie Maschinen oder Produkte, eine gewisse Intelligenz und Informationen, um selbständig Entscheidungen zu treffen. Dadurch soll das System robuster werden gegenüber Störungen und in der Lage sein, Dynamik und Komplexität flexibel zu bewältigen. Man spricht hier auch von positiver Emergenz.

Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, sind die so genannten autonomen Agenten (auch MAS). Dies sind in der Regel Systeme aus mehreren gleichartigen oder unterschiedlich spezialisierten handelnden Einheiten, die in Zusammenarbeit ein Problem lösen. In der Regel werden sie durch Softwareprogramme dargestellt. In Produktionsnetzwerken können diese die unternehmensübergreifende Produktionsplanung und -steuerung übernehmen [Scho03].

Aus dem Bereich der Selbstorganisation lässt sich beispielsweise ein Prinzip verwenden, nach dem Ameisenkolonien Probleme lösen. Dabei kommt ein pheromon-basierter Ansatz zum Tragen. Wird eine Ameisenstraße durch ein Hindernis blockiert, so werden die Tiere zufällig neue Wege suchen. Dabei setzt sich grundsätzlich nach einiger Zeit der optimale durch. Dieses Verfahren ist eine weitere Möglichkeit, die Produktion innovativ zu „optimieren“ und Dynamik und Komplexität zu beherrschen [Scho04c].

Es hat sich also gezeigt, dass Komplexität und Dynamik einen kausalen Kreislauf bilden, der mit den klassischen Methoden nur schwer durchbrochen werden kann. Vielmehr muss der Fokus bei der Erforschung neuer Methoden in der „Complexity Science“ und der nichtlinearen Dynamik gesucht werden. So gelten die vorgestellten Ansätze wie Selbststeuerung, Autonome Agenten oder Selbstorganisation durchaus als viel versprechend für die Steuerung der Produktion.

Literatur

- [Arg04] Argyris, J., Faust, G. & M. Haase: Die Erforschung des Chaos: Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure, Braunschweig: Vieweg, 1994.
- [Cos05] Costa, L., Rodrigues, F. A., Travesio, G. & P. R. Villas Boas: Characterization of complex networks: A survey of measurements. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0505185>, 2005.
- [Fre04] Freitag, M., Scholz-Reiter, B. & O. Herzog: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industrie Management* 20 (2004) 1, S. 23–27.
- [Fre05] Freitag, M.: Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. In: Scholz-Reiter, B. (Hg.), *Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik*, Band 3, Berlin: GITO-Verlag, 2005.
- [Fri95] Frizelle, G. & E. Woodcock: Measuring Complexity as an aid to develop operational strategy. In: *International Journal of Operations and Production Management* 15 (1995) 5, S. 26–39.
- [Hel04] Helbing, D., Lämmer, S., Witt, U. & T. Brenner: Network-induced oscillatory behavior in material flow networks and irregular business cycles. In: *Physical Review E* 70 (2004), 056118.
- [Hey06] Heylighen, F., Cilliers, P. & C. Gershenson: Complexity and Philosophy. <http://arxiv.org/abs/cs/0604072>, 2006.
- [Kat00] Katzorke, I. & A. Pikovski: Chaos and Complexity in a Simple Model of Production Dynamics. In: *Discrete Dynamics in Nature and Society* 5 (2000), S. 179.
- [Lee97] Lee, H. L., Padmanabhan, V. & S. Whang: The Bullwhip Effect in Supply Chains. In: *Sloan Management Review* 38 (1997), S. 93–102.
- [Phi06] Philipp, T., Böse, F. & K. Windt: Autonomously Controlled Processes – Characterisation of Complex Production Systems. In: *Proceedings of the 3rd International CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology, Setubal, Portugal, 2006*, CD-ROM.
- [Sche98] Scherer, E.: The Reality of Shop Floor Control – Approaches to Systems Innovation. In: Scherer, E. (Hg.), *Shop Floor Control – A Systems Perspective*, Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [Scho03] Scholz-Reiter, B. & H. Höhns: Integrated software agents: enabling technology for collaborative E-logistics and E-business. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, London, 2003, S. 517–525.
- [Scho04a] Scholz-Reiter, B. & G. Middelberg: Synchronisation vs. Linkage in Supply Chains: Opportunities and Problems of a Systems Theoretical Approach. In: *CIRP Proceedings*,

- International Conference On Competitive Manufacturing, COMA '04, Progress in Innovative Manufacturing, 2004, S. 427–432.
- [Scho04b] Scholz-Reiter, B., Windt, K. & M. Freitag: Autonomous Logistic Processes – New Demands and First Approaches. In: Proceedings of the 37th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 2004, S. 357–362.
- [Scho04c] Scholz-Reiter, B., Jagalski, T., Peters, K., Wenning, B.-L., Freitag, M., Timm-Giel, A. & C. de Beer: Strategies of Social Insects and other Bio-Inspired Algorithms for Logistics: State of the Art and New Perspectives. In: Timm, I. J. et al. (Hg.), Proc. of the Workshop on Applied Artificial Intelligence and Logistics at the 27th German Conference on Artificial Intelligence (KI2004), 2004, S. 17–20.
- [Sha46] Shannon, C. E.: A mathematical theory of communication. In: The Bell System Technical Journal 27 (1948), S. 379–423 und S. 623–656.
- [Suh05] Suh, N. P.: Complexity in engineering. In: 2005 CIRP General Assembly; Manufacturing Technology, CIRP Annals, vol. 54, no. 2, 2005, S. 581–598.
- [Ulr88] Ulrich, H. & G. Probst: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln, Bern, Stuttgart: Haupt, 1988.

