

Methoden der Nichtlinearen Dynamik zur Analyse und Steuerung von Produktionssystemen

Bernd Scholz-Reiter, Michael Freitag, Alf Schmieder, Universität Bremen und Kerstin Nathansen, Technische Universität Cottbus

Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter ist Direktor des BIBA und leitet das Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme an der Universität Bremen. Er ist Herausgeber der Zeitschriften *Industrie Management* und *PPS Management*.

Dipl.-Ing. Michael Freitag arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme der Universität Bremen.

Dipl.-Phys. Alf Schmieder arbeitete als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme der Universität Bremen.

Dipl.-Ing. Kerstin Nathansen arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Industrielle Informationstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Die zunehmende strukturelle und dynamische Komplexität heutiger Produktionssysteme führt vor dem Hintergrund hochdynamischer Beschaffungs- und Absatzmärkte häufig zu Problemen bei der Planung und Steuerung der Produktion. Hier können Methoden der Nichtlinearen Dynamik helfen, die dem Produktionsprozess zugrunde liegende Dynamik zu analysieren, um daraus Steuerungsstrategien abzuleiten, die das Produktionssystem beim Auftreten von Irregularitäten und chaotischen Phänomenen stabilisieren und den

Produktionsprozess optimieren. Es wird die Anwendbarkeit von Methoden der Nichtlinearen Dynamik zur Analyse und Steuerung von Produktionssystemen untersucht. Mit ihrer Hilfe sollen irreguläre und instabile Produktionszustände vermieden und damit Bestände und Durchlaufzeiten gesenkt werden.

Die Beherrschung der produktionslogistischen Zielgrößen niedrige Durchlaufzeiten, hohe Termintreue, hohe Kapazitätsauslastung bei niedrigen Beständen stellt angesichts wachsender Komplexität heutiger Produktionssysteme hohe Anforderungen an die Produktionsplanung und -steuerung.

Viele der üblichen Planungs- und Steuerungsmethoden erstellen meist deterministische Produktionspläne, die bei Produktionsstörungen wie Maschinenausfall oder Eilaufträgen schnell hinfällig werden. Als Folge derartiger uner-

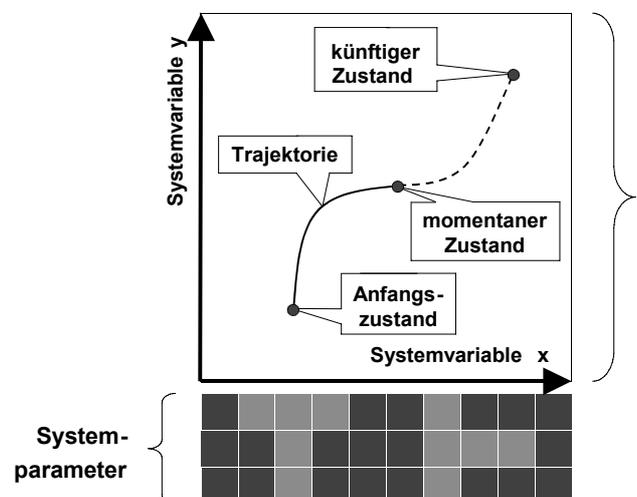
warteter Ereignisse wachsen die Diskrepanzen zwischen dem ursprünglichen Plan und dem aktuellen Zustand oft schnell an und führen zu häufigen Um- oder Neuplanungen.

Die strukturelle und dynamische Komplexität heutiger Produktionssysteme kann zu einer Selbstverstärkung kleiner Störungen und zu chaotischem Verhalten führen. Die Folge können z.B. starke, irreguläre Schwankungen von Zwischenlagerbeständen sein, die zu unerwünschten Zuständen wie Nullbestand und damit zu Leistungsverlusten an den betreffenden Arbeitssystemen führen können. Zu den langfristigen negativen Auswirkungen gehören erhöhte Bestände, erhöhte Durchlaufzeiten und wachsende Auftragsmengen mit Terminverzug.

Mit dem Auftreten derartiger Irregularitäten und chaotischen Phänomene muss gerechnet werden, da die Variablen eines Produktionssystems nichtli-

Kontakt:
 Universität Bremen
 Fachgebiet 20
 Postfach 33 05 60
 D-28335 Bremen
 Tel.: 0421 / 218-9790
 Fax: 0421 / 218-5640
 E-Mail: fmt@biba.uni-bremen.de

Bild 1: Dynamisches System im Zustandsraum.



neare Abhängigkeiten aufweisen. So steigt z.B. mit wachsenden Beständen die Auftragsdurchlaufzeit nichtlinear an. Weitere Ursachen für die komplexe Dynamik eines Produktionssystems sind die diskontinuierliche Art der Auftragsbearbeitung, Rückkopplungen im Teilfluss sowie zeitliche Verzögerungen im Informationsfluss.

Für die Produktionssteuerung bei irregulären Zuständen oder chaotischen Dynamiken sind Steuerungsmethoden erforderlich, die Instabilitäten handhaben und mit hohen Empfindlichkeiten des Systems gegenüber Parameteränderungen umgehen können. Hier können Steuerungsmethoden der Nichtlinearen Dynamik helfen, geeignete Steuerungsstrategien für komplexe, dynamische Produktionssysteme abzuleiten.

Das Produktionssystem als dynamisches System

Ein dynamisches System ist ein System, dessen zeitliche Entwicklung durch innere Systemgrößen und Einflüsse seiner Umgebung bestimmt wird. Diese Definition ist auch auf Produktionssysteme anwendbar. So hat ein Produktionssystem eine Menge von Systemparametern (z.B. Kapazitäten, Prioritätsregeln) und Systemvariablen (z.B. Pufferbestände, Work-in-process), die sein Verhalten bestimmen und beeinflussen [1]. Das Verhalten eines Produktionssystems folgt seiner ihm innewohnenden Dynamik, welche durch die Systemparameter beeinflusst werden kann. Aus dieser Dynamik resultiert die zeitliche Abhängigkeit der Systemvariablen. Die Systemvariablen spannen den Zustandsraum des Produktionssystems auf. Die zeitliche Entwicklung des Systemzustands wird durch Trajektorien in diesem Zustandsraum repräsentiert (Bild 1), die unter bestimmten Bedingungen auf einen Attraktor zulaufen. Die Untersuchung der geometrischen Struktur des Attraktors liefert Hinweise über das dynamische Verhalten des Systems und ist Basis für deren Steuerung.

In der Nichtlinearen Dynamik werden dynamische Systeme gewöhnlich durch Differentialgleichungen beschrieben. Hierzu müssen die Parameter und Variablen des Systems vollstän-

dig bekannt sein. Das ist bei Produktionssystemen meist nicht der Fall. Nur sehr einfache, überschaubare Produktionseinheiten lassen sich analytisch modellieren.

Es ist jedoch möglich, auch ohne explizite Kenntnis der Systemgleichungen die Dynamik eines Produktionssystems zu analysieren. Dazu ist es ausreichend, wenige oder sogar nur eine Systemvariable in ihrem zeitlichen Verlauf zu messen. Aus dieser skalaren Zeitreihe lässt sich ein niedrig-dimensionaler Zustandsraum rekonstruieren, der qualitativ äquivalent zum vollständigen Zustandsraum des Systems ist [2]. Bei geeigneter Wahl der Systemvariable sowie richtiger Rekonstruktion des Zustandsraums erfasst dieser die Dynamik des gesamten Produktionssystems. Die Trajektorien im rekonstruierten Zustandsraum bilden nun die Basis für viele Methoden der nichtlinearen Zeitreihenanalyse, von denen einige im Folgenden vorgestellt werden.

Analyse der dynamischen Systemeigenschaften

Das dynamische Verhalten komplexer Produktionssysteme, die sich nicht vollständig analytisch beschreiben lassen, kann durch Erfassung einiger Systemvariablen und deren Änderungen in ihrem zeitlichen Verlauf beobachtet werden (Bild 2, Spalte 1). Als relativ gut zugängliche Systemvariablen bieten sich die Bestände in den Puffern vor den einzelnen Arbeitssystemen an.

Für die Anwendung von Analysemethoden der Nichtlinearen Dynamik werden die gemessenen Zeitreihen in einen rekonstruierten Zustandsraum eingebettet (Bild 2, Spalte 2). Diese so genannte Attraktorrekonstruktion kann mithilfe der Zeitverzögerungsmethode oder mittels Singulärwertzerlegung durchgeführt werden [2]. Mithilfe von Attraktorrekonstruktionen sind Vorhersagen über das Systemverhalten möglich, so z.B. eine langfristige Abschätzung der Bestandsentwicklung oder zumindest eine Eingrenzung der Systemzustände im Zustandsraum und evtl. die Angabe stabiler Inseln im System. Um das Systemverhalten in Abhängigkeit von der Parameterwahl zu bestimmen,

ist die Attraktorrekonstruktion für verschiedene ausgewählte Parameterkonstellationen des Systems zu ermitteln.

Hat man einen Attraktor erfolgreich rekonstruiert, so lässt sich dessen Dimension berechnen. Die Dimension charakterisiert die Geometrie eines Attraktors und ist als die Dimension seiner Oberfläche zu verstehen. Ein stationärer Vorgang, dargestellt durch einen Fixpunkt im Zustandsraum, hat die Dimension Null, ein periodischer Vorgang stellt im Zustandsraum eine geschlossene Linie mit der geometrischen Dimension 1 dar, während die Trajektorien eines quasiperiodischen Vorgangs die Oberfläche eines Torus bedecken und entsprechend die Dimension 2 haben. Chaotische Attraktoren stellen jedoch keine geschlossene Punktmenge mehr dar, sondern sind eine offene Ansammlung von Punkten mit diffiziler Struktur. Die Verteilung bzw. Dichte dieser Punkte im Zustandsraum ergibt die fraktale Struktur eines chaotischen Attraktors, ausgedrückt durch eine nicht-ganzzahlige Dimension (Bild 2, Spalte 3).

Während also periodische und quasiperiodische Attraktoren ganzzahlige Dimensionen aufweisen, sind chaotische Attraktoren durch nicht-ganzzahlige, fraktale Dimensionen gekennzeichnet. Damit ist die fraktale Dimension ein notwendiges Kriterium für die Existenz deterministischen Chaos. Allerdings ist es kein hinreichendes Kriterium, kann aber als Hinweis auf Chaos interpretiert werden.

Die Stabilität eines Systems gegenüber Änderungen der Anfangsbedingungen und der Parameter ist eine wichtige Information für die Ableitung geeigneter Steuerungsstrategien. Als Maß für die Stabilität eines Systems dienen die Lyapunov-Exponenten (Bild 2, Spalte 4). Der Lyapunov-Exponent gibt für jede Dimension des Zustandsraums an, wie stark die Trajektorien auseinanderlaufen, wie schnell sich benachbarte Punkte in einem Fluss voneinander entfernen und somit, wie schnell die Wirkungen kleiner Störungen wachsen. Ist der Lyapunov-Exponent positiv, so entfernen sich zunächst benachbarte Trajektorien exponentiell, das System ist chaotisch. Ein negativer Lyapunov-Exponent bedeutet, dass sich das System

in einem stabilen Zustand befindet, ein Wert gleich Null, dass das System grenzstabil ist.

Durch Integration der positiven Lyapunov-Exponenten über den Zustandsraum unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsdichte wird die Kolmogorov-Entropie berechnet (Bild 2, Spalte 5). Sie beschreibt das Systemverhalten als Ganzes und ist das wichtigste Maß, mit dem eine chaotische Bewegung in einem beliebig-dimensionalen Zustandsraum quantitativ beschrieben werden kann [3]. Aus ihrem Wert größer oder gleich Null kann abgelesen werden, ob sich ein System zum gegebenen Zeitpunkt stabil oder chaotisch verhält (Bild 2, Spalte 6).

Steuerungsmethoden

Irregularitäten und chaotische Phänomene können - unerkannt und ungesteuert - zu unerwünschten Zuständen führen und Leistungsverluste mit sich bringen. Bei großer Empfindlichkeit des Systems gegenüber Änderungen führen die Reaktionen und Entscheidungen des Produktionsmanagements dann unter Umständen zu unerwarteten Ergebnissen oder zu einer Verschlechterung der Situation, da deren Auswirkungen mit den üblichen Mitteln und Erfahrungen nicht abgeschätzt werden können.

Die im Bereich der Nichtlinearen Dynamik entwickelten Methoden zur Steuerung chaotischer Systeme sind im Gegensatz zu herkömmlichen Steuerungsmethoden in der Lage, die großen Empfindlichkeiten dieser Systeme zu handhaben. Einige von ihnen nutzen sogar diese Empfindlichkeit aus, um durch kleine Steuereingriffe ein anderes, meist periodisches Systemverhalten zu erreichen. Bei der Steuerung geht es in der Regel darum, mehr oder weniger stabile Gleichgewichtszustände zu erreichen. Aber auch bestimmte chaotische Trajektorien können angesteuert werden, um das System in einen gewünschten Attraktorbereich zu bewegen.

Einige Methoden zur Steuerung chaotischer Systeme sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Hübler et al. bewiesen Ende der 80er Jahre, dass sich deterministisches Chaos steuern lässt. Mittels des Verfahrens der resonanten Stimulation ließen sie ein chaotisches System eine vorgegebene Solldynamik ausführen [4]. Voraussetzung für diese Art der Steuerung ist die Kenntnis der Systemgleichungen. Die Steuerkräfte werden im Voraus berechnet, bei genauer Modellierung ist dann keine weitere Systembeobachtung erforderlich. Die Zieldynamik ist in der Regel relativ stabil, sodass weitere Eingriffe nur zum Ausgleichen von Ungenau-

igkeiten erforderlich sind. Mittels der resonanten Stimulation kann ein chaotisches System in ein nicht-chaotisches umgewandelt werden, wobei allerdings die Nähe zur chaotischen Dynamik erhalten bleibt.

Der Vorteil bei der Anwendung der resonanten Stimulation besteht insbesondere in der vergleichsweise geringen Häufigkeit der Eingriffe. Das setzt jedoch ein genaues analytisches Modell des zu steuernden Systems voraus, was im Falle einer Produktionssteuerung nur für sehr einfache, überschaubare Produktionseinheiten möglich ist.

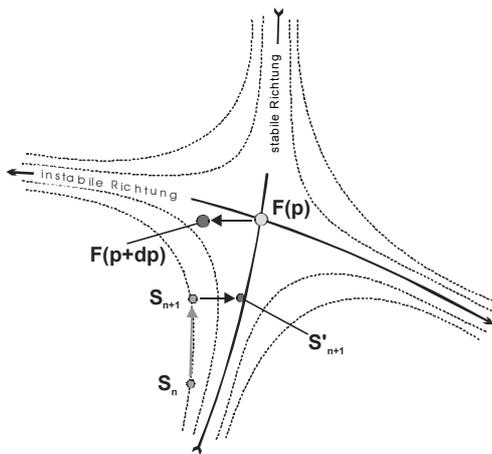
Ott, Grebogi und Yorke entwickelten 1990 die nach ihnen benannte OGY-Methode [5]. Für die Anwendung dieser Steuerungsmethode ist kein analytisches Modell notwendig, die Kenntnis lokaler Systemeigenschaften reicht aus. Alle für die Steuerung relevanten Größen können aus den gemessenen Zeitreihen weniger oder einer einzigen Systemvariablen gewonnen werden. Bei der OGY-Methode werden unter Ausnutzung der Systemdynamik durch kleine Parameteränderungen periodische Bahnen innerhalb des chaotischen Attraktors angefahren (Bild 3). Da diese Bahnen instabil sind, werden sie ohne weitere Eingriffe schnell wieder verlassen. Demzufolge sind die ständige Beobachtung des Systems und wiederholte Steuerungsaktionen erforderlich.

Für die OGY-Methode wurden inzwischen zahlreiche Modifikationen entwickelt, über die in [6] ein kurzer Überblick gegeben wird. Die für die Produktionssteuerung interessierenden Steuerungsparameter werden in [1] identifiziert und diskutiert.

Eine alternative Methode zum Stabilisieren instabiler Bahnen innerhalb des Attraktors eines chaotischen Systems wurde von Pyragas vorgeschlagen [8]. Die Steuerung erfolgt durch ein zeitkontinuierliches Feedback. Vorteil dieser Methode ist der geringe Aufwand bei der Realisierung im Experiment, da man die periodischen Bahnen und ihre Eigenschaften nicht im Voraus kennen muss. Das Steuersignal kann aus einer Zeitreihe einer Systemvariablen ohne aufwändige Analysen berechnet werden, es muss jedoch kontinuierlich angewendet werden, sodass diese Steuer-

Bild 2: Nichtlineare Zeitreihenanalyse.

Zeitreihe	Attraktor	Dimension	Lyapunov-Exponenten	Kolmogorov-Entropie	Systemverhalten
		0	- - -	0	stabil
		1	0 - -	0	periodisch
		2	0 0 -	0	quasi-periodisch
		2,06	+ 0 -	+	chaotisch
		∞	+ ... + - ... -	∞	stochastisch



$F(p)$ - instabiler Fixpunkt
 $F(p+dp)$ - instabiler Fixpunkt nach Parameteränderung
 S_n - Statuspunkt
 S_{n+1} - Statuspunkt nach einer Iteration ohne Eingriff
 S'_{n+1} - Statuspunkt nach einer Iteration ohne Eingriff

Bild 3: Prinzip der OGY-Steuerung [7].

methode nicht ohne grundlegende Modifikationen im Produktionsablauf angewendet werden kann.

Zusammenfassung

Heutige Produktionssysteme sind hinsichtlich ihrer Dynamik nichtlinear und zunehmend komplex. Sie können Irregularitäten und Instabilitäten aufweisen, die die Vorhersagbarkeit und Steuerbarkeit des Systems einschränken und mit konventionellen Methoden nicht beherrscht werden können.

Es wurden Anwendungspotenziale von Methoden der Nichtlinearen Dynamik für die Analyse und Steuerung von Produktionssystemen vorgestellt. Methoden der nichtlinearen Zeitreihenanalyse ermöglichen ein qualitatives Verständnis der Dynamik komplexer Produktionssysteme. Dies dient als Grundlage zur Ableitung geeigneter Steuerungsstrategien, wobei Steuerungsmethoden der Nichtlinearen Dynamik von Nutzen sein können.

Wenn es gelingt, die Produktion auch unter chaotischen Verhältnissen bei hoher Empfindlichkeit des Systems gegenüber Störungen und anderen Parame-

teränderungen zu steuern, können negative Effekte einer chaotischen Dynamik wie Leistungsverluste, erhöhte Bestände oder lange Durchlaufzeiten vermieden werden.

Literatur

- [1] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., Schmieder, A.: Modelling and Control of Production Systems based on Nonlinear Dynamics Theory. In: CIRP Annals 51 (2002) 1, S. 375-378.
- [2] Kantz, H., Schreiber, T.: Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge 1997.
- [3] Schuster, H.G.: Deterministisches Chaos. Weinheim 1994.
- [4] Hübler, A.: Adaptive Control of Chaotic Systems. In: Helv. Physical Acta 61/1989, S. 343-346.
- [5] Ott, E., Grebogi, C., Yorke, J.A.: Controlling Chaos. In: Physical Review Letters 64/1990, S. 1196-1199.
- [6] Scholz-Reiter, B., Kleiner, M., Nathansen, K., Proske, G.: Chaos Control in Production Systems. In: Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics. Berlin 1997, Vol. 5, S. 701-706.
- [7] Shinbrot, T.: Chaos: Unpredictable Yet Controllable? In: Nonlinear Science Today 3 (1993) 2, S. 1-8.
- [8] Vieira, M., Lichtenberg, A.J.: Controlling Chaos using Nonlinear Feedback with Delay. In: Physical Review E 54 (1996) 2, S. 1200-1207.

Schlüsselwörter:

Nichtlineare Dynamik, Produktionssysteme, Analyse, Steuerung

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts "Modellierung und Steuerung der Produktion mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik", das unter der Leitung von Professor B. Scholz-Reiter am Lehrstuhl Industrielle Informationstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und am Fachgebiet Planung und Steuerung Produktionstechnischer Systeme an der Universität Bremen unter der Leitung von Professor A. Pikovsky am Lehrstuhl für statistische Physik und Chaostheorie der Universität Potsdam bearbeitet wurde. Dieses Projekt wurde von der Volkswagen Stiftung unter dem Kennzeichen I/77366 gefördert.

Methods of Nonlinear Dynamics for Analysis and Control of Production Systems

The growing structural and dynamic complexity of today's production systems frequently leads to problems in the planning and control of production when viewed against the backdrop of highly dynamic supply and sales markets. The Nonlinear Dynamics Theory can provide methods to analyse the fundamental dynamics of production processes from which control methods to stabilise the production system are derived, thus optimising the production process in the case of irregularities and chaotic phenomenon.

This article investigates the application of these methods of Nonlinear Dynamics for the analysis and control of production systems. This may help avoid irregular and unstable production states and reduce inventory and lead times as well.

Keywords:

Nonlinear Dynamics, production systems, analysis, control