

Chaotischer Materialfluss nahe der Kapazitätsgrenze

Bernd Scholz-Reiter, Michael Freitag und Georg Middelberg,
Universität Bremen



Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter leitet das Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme an der Universität Bremen und ist Direktor des Bremer Instituts für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft. Er ist Herausgeber der Zeitschriften Industrie Management und PPS Management.



Dipl.-Ing. Michael Freitag ist Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen.



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

Materialflüsse sowohl innerhalb von als auch zwischen Betrieben weisen oft ein scheinbar irreguläres Verhalten auf, das sich u.a. in unvorhersagbaren – und dementsprechend kaum handhabbaren – Bestandschwankungen äußert, insbesondere bei hoher Auslastung der produktiven oder logistischen Kapazitäten. Dieser

Kontakt:

Universität Bremen
Fachgebiet Planung und Steuerung
produktionstechnischer Systeme
Hochschulring 20
D-28359 Bremen
Tel.: 0421 / 218-9793
Fax: 0421 / 218-5640
E-Mail: mid@biba.uni-bremen.de

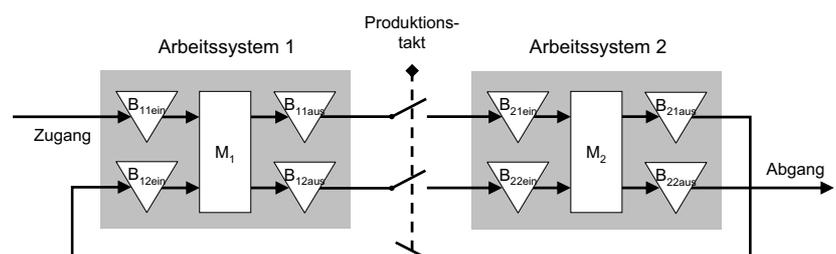
Sachverhalt wird i.A. mit der Empfindlichkeit gegenüber kleinen Störungen in Verbindung gebracht, mit denen in der Praxis immer zu rechnen ist. Deswegen wird häufig ein sehr hoher Aufwand betrieben, um sie auszuschließen. Hier stellt sich die Frage, ob es überhaupt an Störungen liegen muss, dass z.B. Bestandsentwicklungen kurzfristig kaum und langfristig praktisch überhaupt nicht vorhersagbar sind. In diesem Beitrag wird am Beispiel eines kleinen Produktionssystems mit Materialrückflüssen untersucht, inwiefern schon relativ einfache Netzwerke irreguläres Verhalten aufweisen können.

Eine gängige Beobachtung in Produktionsunternehmen ist, dass trotz hoch entwickelter PPS-Systeme und detaillierter Lieferantenverträge an einem Tag die zur Fertigung benötigten Teile fehlen, während sie sich wenige Tage zuvor noch in den Lagern getürmt haben und sich die Lage am folgenden Tag eher hoffen als schätzen lässt. Dieses Phänomen geht häufig einher mit einer sehr hohen Auslastung verschiedener Kapazitäten innerhalb des Unternehmens, bei den Zulieferern oder den dazwischen stehenden Logistikdienstleis-

stern. Mögliche Folgen sind neben einer allgemeinen Planungsunsicherheit und gelegentlichen Produktionsstillständen höhere mittlere und sehr viel höhere maximale Durchlaufzeiten als bei moderaten Bestandsschwankungen. Die Ursache wird meistens in kleinen Störungen gesehen, die zum Betriebsalltag gehören, aber nicht im Einzelnen vorhergesehen und dementsprechend auch nicht in der Planung berücksichtigt werden können.

Dabei wird die Möglichkeit außer Acht gelassen, dass ein derartiges irreguläres Verhalten auch eine Folge der Materialflussstruktur in Verbindung mit hoher Auslastung sein kann, selbst wenn keine zufälligen Störungen vorliegen. Solche und ähnliche Phänomene werden in der nichtlinearen Dynamik (NLD) betrachtet. Das ist – kurz gesagt – die Lehre von der mathematischen Beschreibung der Dynamik von Systemen, bei deren Zustandsänderungen die Folge einer Summe von Ursachen nicht immer gleich der Summe der Einzelfolgen dieser Ursachen ist. Wenn die Dynamik eines Systems auch ohne stochastische Einflüsse auf Dauer irregulär ist, d.h. wenn weder regelmäßige Schwingungen noch die Annäherung an einen Grenzwert zu beobachten sind, so wird

Bild 1: Struktur des Produktionslinienmodells.



dort von chaotischem Verhalten bzw. von einem chaotischen System gesprochen. Ausführlich wird auf diese Thematik z.B. in [1] eingegangen.

In diesem Beitrag wird in Anlehnung an Methoden der nichtlinearen Dynamik anhand eines einfachen Modells untersucht, ob sich in einem Produktionssystem auch ohne Störungen, allein infolge der Materialflussstruktur, bei hoher Auslastung zumindest scheinbar chaotisches Verhalten einstellen kann. Als scheinbar chaotisch wird das gesuchte Verhalten bezeichnet, weil an dieser Stelle die Sicht des Verantwortlichen für das Produktionssystem im Mittelpunkt steht und deshalb nur endliche Produktionszeiträume betrachtet werden können, während asymptotisches oder periodisches Verhalten jenseits dieser Zeiträume nicht ausgeschlossen werden kann, aber auch nicht von praktischem Interesse ist.

Modellierung eines produktionslogistischen Systems mit Materialrückflüssen

Das Modell repräsentiert eine kurze Produktionslinie mit mehrfachem Materialdurchlauf. Die Linie besteht aus zwei Arbeitssystemen, d.h. Maschinen mit vorgeschalteten Puffern, in denen Halbzuge bei kontinuierlichem Zugang in hoher Stückzahl in mehreren Schritten bearbeitet werden. Dabei durchläuft das einzelne Werkstück zunächst beide Maschinen hintereinander zur Erstbearbei-

tung und dann noch einmal beide Maschinen hintereinander in einem Hauptbearbeitungsgang. Dementsprechend hat jedes Arbeitssystem zwei Eingangspuffer. Nach jedem Teilbearbeitungsschritt werden alle Werkstücke bis zum Ende eines Produktionstaktes in einem Ausgangspuffer zwischengelagert und zu Beginn des nächsten Taktes gesammelt an den Eingangspuffer für den nächsten Teilschritt übergeben (Bild 1). Derartige Bearbeitungsfolgen sind z.B. in der Halbleiterfertigung zu finden [2].

Schon für diese scheinbar übersichtliche Struktur sind verschiedene Parameter und Anfangsbedingungen festzulegen. Bei den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde folgender Parametersatz gewählt:

- Es wird die „Last Buffer - First Serve“-Regel angewandt, d.h. in jedem Arbeitstakt werden so lange Teile aus dem zweiten Puffer entnommen, der dem Hauptbearbeitungsgang zugeordnet ist, bis er leer ist. Erst dann werden in der verbleibenden Zeit des jeweiligen Arbeitstaktes Teile aus dem ersten Puffer entnommen und verarbeitet.
- Die Kapazitäten beider Maschinen sind innerhalb eines Bearbeitungsgangs gleich. Für den ersten Gang beträgt sie bei beiden Maschinen 30.000 Teile und für den zweiten Gang 15.000 Teile je Produktionstakt. Damit beträgt die Gesamtkapazität eines Arbeitssystems 10.000 Teile je Takt, da für jedes Teil zu-

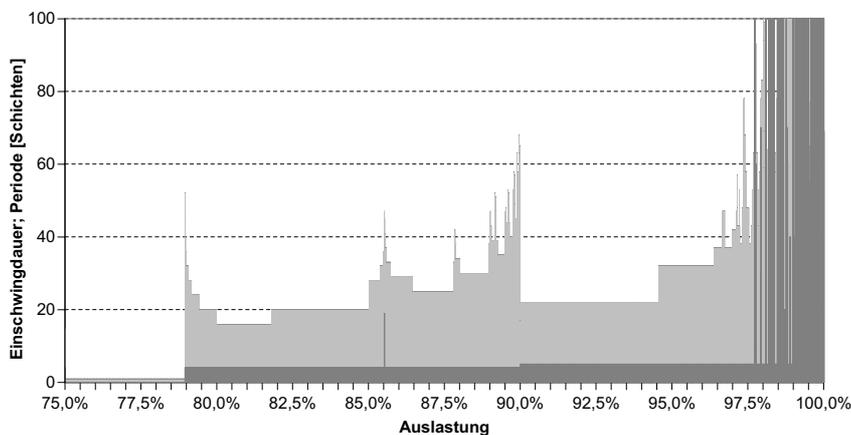
nächst 1/30.000 und dann 1/15.000 eines Taktes benötigt wird, was in der Summe 1/10.000 eines Taktes beträgt. Diese großen Zahlen wurden gewählt, um bei ganzzahliger Rechnung eine hohe Auflösung der Auslastung zu ermöglichen.

- Die Anfangsbestände wurden so gewählt, dass sie zusammen mit den Materialzugängen der ersten Schritte oberhalb der Taktkapazitäten der nachfolgenden Maschinen liegen.

Zufällige Einflüsse wie z.B. Zugangsschwankungen oder Störungen werden zunächst ausgeschlossen. Auch werden Umrüst- und andere Verteilzeiten vernachlässigt, um in Verbindung mit der Wahl der Kapazitäten in jedem Produktionstakt ganzzahlige Restkapazitäten zur Abarbeitung der ersten Puffer beider Arbeitssysteme zu erhalten, weil sonst eine weitergehende Fallunterscheidung nötig würde.

Diese Abstraktionen sind nötig, um die reine Dynamik der Produktionslinie erfassen zu können. Allerdings soll hier der Anteil dieser Dynamik am tatsächlich beobachteten Verhalten derartiger Anlagen geprüft werden. Deshalb beschränken sich die Einzeluntersuchungen für jede Zugangsrate zunächst auf 1.000 Produktionstakte. Damit orientieren sie sich bezüglich des Zeithorizonts größenordnungsmäßig an den Serienlaufzeiten realer Produktionslinien. Als Produktionstakt wird hier eine Schicht angenommen, sodass diese 1.000 Produktionstakte je nachdem, ob in einer oder in drei Schichten und ob an Wochenenden gearbeitet wird oder nicht, einem Produktionszeitraum von etwa einem bis zu vier Jahren entsprechen.

Bild 2: Periodendauer (dunkel) und Einschwingdauer (hell) in Abhängigkeit von der Auslastung.



Untersuchungen

Mit den beschriebenen Parametern und Anfangsbedingungen wird die Zugangsrate in den Untersuchungen variiert, weil die Auslastung der Produktionslinie zur Zugangsrate proportional ist und weil nach dem Einfluss der Auslastung auf das Verhalten der Produktionslinie gefragt wird. Dadurch sollen drei Fragen geklärt werden:

- Wie hoch ist die maximale Auslastung, bei der so wenig Arbeit in die Produktionslinie eingelastet wird,

dass neben dem Zugang auch noch bestehende Bestände abgearbeitet werden können und nach einer Anlaufphase die Pufferbestände nie höher sind als der Zugang in einer Schicht?

- Ab welcher Zugangsrate ist das System überlastet, so dass sich die Bestände unweigerlich immer weiter aufbauen?
- Gibt es dazwischen einen Übergangsbereich in Form einer einzelnen Zugangsrate oder einer Bandbreite von Raten, in dem die Bestände zwar nach oben hin begrenzt sind, aber nicht in jeder Schicht vollständig abgebaut werden, und wie verhält sich das System in diesem Bereich?

Stellvertretend für das Systemverhalten werden die Schwankungen des als $B_{11\text{ein}}$ bezeichneten Bestands im ersten Puffer betrachtet. Damit ist der Puffer gemeint, der zum ersten Bearbeitungsgang an der ersten Maschine gehört.

Die Zugangsrate wird beginnend bei 6.000 Stück pro Schicht, was einer Auslastung der Produktionslinie von 60 %

entspricht, in Schritten von einem Stück pro Schicht erhöht. Es zeigt sich, dass zunächst bei allen Raten der Bestand am ersten Puffer nach einer kurzen Anlaufphase in jeder Schicht vollständig abgearbeitet wird – außer bei einer Rate von genau 75 %. Dort oszilliert er nach der Einschwingphase mit einer Periodenlänge von fünf Schichten, wobei das Maximum jeweils zu Schichtbeginn mit 22.500 Stück beim dreifachen Wert des Zugangs liegt. Auf dieses Phänomen wird weiter unten noch eingegangen.

Der gesuchte Übergangsbereich beginnt bei 78,95 % Auslastung. Ab diesem Wert wird nicht mehr der gesamte Zugang in jeder Schicht abgearbeitet, sondern der Bestand am ersten Puffer bei Schichtende schwankt wiederkehrend mit einer Periodenlänge von vier Schichten; im Folgenden wird dies auch als Periode-4-Verhalten bezeichnet. Die Einschwingphase dauert hier 52 Schichten. Bei steigender Zugangsrate verkürzt sie sich überraschenderweise zunächst stufenweise, steigt aber später tendenziell, jedoch nicht monoton wieder an.

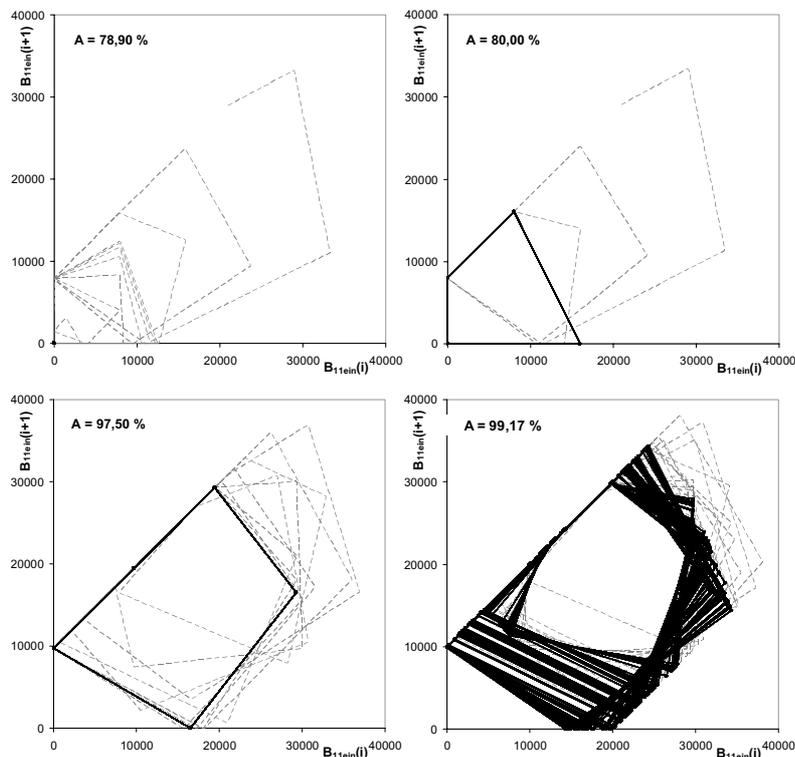
Bei Auslastungen ab 90 % erhöht sich die Schwankungsperiode auf fünf Schichten, und die Einschwingdauer fällt auf 17 Schichten und nimmt dann ähnlich wie zuvor mit steigender Zugangsrate zunächst stufenweise und monoton, aber dann immer schneller, jedoch nicht mehr monoton zu.

Ab knapp 98 % Auslastung treten sehr lange Perioden auf, die z.T. Hunderte von Schichten betragen können. Diese langen Perioden werden mit zunehmender Auslastung immer häufiger. Die Einschwingdauer entwickelt sich ähnlich. Teilweise werden überhaupt keine Wiederholungen im Bestandsverlauf mehr sichtbar.

Bei der maximalen Auslastung, d.h. bei einer Zugangsrate von 10.000 Stück pro Schicht, beträgt die Periodendauer jedoch nur 69 Schichten, und die Periodizität besteht von Anfang an ohne Einschwingzeit. Es sei vorweggenommen, dass dies nur für die oben beschriebenen Parameter und Anfangsbedingungen gilt.

Die Entwicklung der Periodendauer und der Einschwingdauer in Abhängigkeit von der Zugangsrate ist in Bild 2 dargestellt.

Bild 3: Poincaré-Abbildungen des Bestands $B_{11\text{ein}}$ im ersten Puffer für verschiedene Auslastungen A .



Darstellung des Systemverhaltens

Um die Auswirkungen steigender Auslastung auf das Systemverhalten zu verdeutlichen, soll seine Regelmäßigkeit bzw. Unregelmäßigkeit bei einzelnen Auslastungen grafisch dargestellt werden. Eine bewährte Methode der nicht-linearen Dynamik dazu ist die so genannte Poincaré-Abbildung [1].

Darin wird in Abhängigkeit vom Wert einer Zustandsgröße zu einem bestimmten Erfassungszeitpunkt der Wert derselben Größe bei der jeweils nachfolgenden Erfassung in einer Ebene abgebildet. D.h. die horizontale Lage des i -ten Punktes in dieser Ebene entspricht dem Wert der betrachteten Größe zum i -ten Erfassungszeitpunkt, und seine vertikale Lage dem Wert zum $(i+1)$ -ten Erfassungszeitpunkt. Bei konstanten Werten entsteht so nur ein Punkt auf der Winkelhalbierenden der Ebene, bei periodischen Zustandsänderungen eine endliche Anzahl von Punkten beiderseits der

Winkelhalbierenden. Zur Verdeutlichung der Abfolge der Wertepaare können aufeinanderfolgende Punkte durch Linien miteinander verbunden werden.

Dadurch lässt sich ein periodisches Verhalten selbst bei langen Perioden vielfach auf den ersten Blick an einem geschlossenen Linienzug erkennen, was bei einem einfachen Auftragen der Werte über einer Zeitachse oft nicht möglich ist. Eine endliche Einschwingphase ist daran zu erkennen, dass der Linienzug bei ebenfalls abzählbar vielen Eckpunkten einen offenen Anfang hat und in den geschlossenen Zug übergeht.

Die Erfassungszeitpunkte für die Poincaré-Abbildung werden nicht willkürlich, sondern anhand der Systemdynamik bzw. eines sie beeinflussenden Takts gewählt. Im Falle der betrachteten Produktionslinie wird das System durch die schichtweise Einlastung von Halbzeugen angeregt, sodass dieser Takt zur Erfassung verwendet werden kann.

Bild 3 zeigt die Poincaré-Abbildungen für verschiedene Auslastungen. Dabei wird jeweils die Einschwingphase durch den grau gestrichelten und die Periode durch den schwarzen Linienzug dargestellt. Die linke obere Abbildung stellt den Verlauf für eine Auslastung dar, bei der nach einer Übergangsphase alle Bestände bzw. Zugänge in jeder Schicht abgebaut werden. Das ist daran zu erkennen, dass sich der Linienzug ausgehend von einem Startwert auf den Nullpunkt zusammenzieht. Im Bild oben rechts ist zu sehen, wie sich bei einer Auslastung von 80 % nach einer kurzen Einschwingzeit ein Periode-4-Verhalten einstellt, bei dem der erste Puffer jeweils in zwei aufeinander folgenden Schichten komplett geleert wird. Unten links wird gezeigt, wie sich bei einer Auslastung von 97,5 % ebenfalls ein übersichtlicher geschlossener Linienzug ausbildet.

Unten rechts ist ein Fall dargestellt, in dem sich ein scheinbar chaotisches Verhalten anschaulich im optischen Eindruck des Linienzuges widerspiegelt: Bei einer Auslastung von 99,17 % liegt die Einschwingzeit bei 259 Schichten und die Periode bei 370 Schichten, sodass eine Regelmäßigkeit erst zum Ende des Betrachtungszeitraums erkennbar wird.

Stochastische Einflüsse

Die Systemdynamik weist bei Auslastungen von genau 75 % und genau 100 % deutliche Abweichungen gegenüber ähnlichen Auslastungen auf. Bei einer Auslastung von 75 % oszilliert der Bestand am ersten Puffer mit einer Periodenlänge von vier Schichten und verhält sich damit ungünstiger als bei allen anderen Auslastungen in dem Bereich, bei denen dieser Bestand in jeder Schicht komplett abgebaut wird. Dagegen liegt bei einer Auslastung von 100 % eine gut erkennbare Regelmäßigkeit des Verhaltens vor, die bei den nächstkleineren Auslastungen nicht zu finden ist. Dass es sich deshalb bei ersterer nicht um eine zu meidende bzw. bei letzterer nicht um eine besonders erstrebenswerte Auslastung handelt, zeigt sich dadurch, dass diese Abweichungen verschwinden, sobald zusätzlich kleine stochastische Einflüsse eingeführt werden.

Wenn die Zugangsrate nicht konstant, sondern nur im Mittelwert bei 7.500 Stück pro Schicht liegt und innerhalb einer bestimmten Bandbreite stochastisch um diesen Wert schwankt, dann wird auch bei dieser Auslastung nach einer Anlaufphase der Bestand am ersten Puffer in jeder Schicht verbraucht. Dieser Effekt wird schon von der kleinsten möglichen Bandbreite bewirkt, also einer stochastischen Schwankung des Zugangs um höchstens ein Stück nach oben oder unten.

Bei einer Auslastung von 100 % zeigt sich eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen der Anfangsbedingungen. Wenn z.B. der Anfangsbestand im ersten Puffer der zweiten Maschine in Schritten von einem Stück variiert wird, dann vergrößern sich sowohl die Einschwingzeit als auch die Periodendauer teilweise derart, dass nicht einmal in der gesamten Serienlaufzeit eine Periodizität sichtbar wird. Mit dieser extremen Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen ist auch bei dieser Auslastung eine Eigenschaft chaotischer Dynamik vorhanden.

Fazit

An dem hier verwendeten einfachen Modell konnte gezeigt werden, dass

Produktionssysteme bei hoher Auslastung von sich aus ein scheinbar chaotisches Verhalten entwickeln können. Irreguläre Dynamik kann demnach auch dort auftreten, wo alle Störungen ausgeschlossen sind. Aber gerade dazu wird in der Praxis bisweilen ein enormer Aufwand getrieben. Jetzt stellt sich nicht nur die Frage, ob der Nutzen in Form einer entsprechend höheren möglichen Auslastung in einem sinnvollen Verhältnis zu diesem Aufwand steht, sondern auch, ob der Nutzen überhaupt existiert.

Literatur

- [1] Agyris, J., Faust, G., Haase, M.: Die Erforschung des Chaos. Braunschweig Wiesbaden 1994.
- [2] Freitag, M.: Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. Im Druck.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des von der Volkswagen-Stiftung geförderten Programms „Untersuchungen nichtlinear-dynamischer Effekte in produktionstechnischen Systemen“.

Schlüsselwörter:

Chaos, Nichtlineare Dynamik, Auslastung, Kapazitätsgrenze

Chaotic Material Flow Close to the Capacity Limit

Very often material flows within or between companies seem to behave in an irregular manner, which can cause inventory levels to become unpredictable and poorly manageable. This behaviour can especially be observed at high utilisation ratios of means of production or logistics. Commonly, it is assumed to be caused by small disturbances, which can never be completely excluded in practice. For that reason often large efforts are made to minimise disturbances, but the question arises, if it always has to be disturbances that make predictions of e.g. inventory levels difficult for the near future and practically impossible in the long run.

Using a small, but re-entrant manufacturing system, this article presents investigations on how even relatively simple networks can develop irregular dynamics.

Keywords:

chaos, nonlinear dynamics, utilisation, capacity limit