

**PPS (Produktionsplanung/-steuerung), Automatisierung, Simulation**

# Systemdynamik-Ansätze zur Optimierung der PPS\*

**Nutzen und Anwendung in der Halbleiterindustrie**

**D. Bauer, A. Schlereth, T. Bauernhansl**

*Die Fertigung in der Halbleiterindustrie ist geprägt durch eine Vielfalt und Vielzahl von Elementen sowie eine Dynamik und Unsicherheit in deren Verhalten. Die Produktionsplanung und -steuerung hat die Aufgabe, das Produktionsprogramm unter Berücksichtigung dieser Komplexität dennoch möglichst wirtschaftlich zu realisieren. Vielversprechende Ansätze aus der Systemdynamik wurden bisher kaum berücksichtigt, deren Nutzen sowie Anwendung in diesem Beitrag aufgezeigt werden.*

**System dynamics-based approaches for the optimization of production planning and control: benefits and application in the semiconductor industry**

*Manufacturing in the semiconductor industry is characterized by a variety and multitude of elements as well as dynamics and uncertainty in their behavior. The task of production planning and control is to implement the production program as economically as possible while taking this complexity into account. So far, promising approaches from the field of system dynamics have hardly been considered, and their benefits and applications are shown in this article.*

## 1 Motivation

Die stetige Komplexitätszunahme der Märkte stellt produzierende Unternehmen sowie deren Wertschöpfungsnetzwerke zunehmend vor neue Herausforderungen [1]. Gleichzeitig ist die Halbleiterindustrie auch durch eine hohe Komplexität in der Fertigung geprägt [2]. Die Komplexität der Wertschöpfungsnetzwerke und der Fertigung ist charakterisiert durch die Vielfalt und Vielzahl der Elemente sowie die Dynamik und Unsicherheit in deren Interaktion. Komplexe System sind deshalb nicht beherrschbar, sondern lediglich beeinflussbar [1].

Dennis Bauer, M. Sc., Andreas Schlereth, M. Sc.  
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung  
 IPA, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
 Tel. +49 (0)711 / 970-1355  
 dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

### Dank

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts „Power Semiconductor and Electronics Manufacturing 4.0“ (SemI40) unter der Förder-Nr. 692466 durchgeführt. Das Projekt wird durch Österreich, Deutschland, Italien, Frankreich, Portugal und Electronic Component Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU) kofinanziert.

\* Bei den mit einem Stern gekennzeichneten Beiträgen handelt es sich um Fachaufsätze, die von Experten auf diesem Gebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben wurden (peer-reviewed).

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) hat die Aufgabe, dieses komplexe Zusammenspiel aus Wertschöpfungsnetzwerk und Produktion laufend zu beeinflussen, indem regelmäßig ein Produktionsprogramm geplant und trotz unvermeidlicher Störungen möglichst wirtschaftlich umgesetzt wird [3]. Der Produktionssteuerung kommt eine besondere Bedeutung zu, da ein Produktionsplan nur dann zum Erfolg führt, wenn dieser von der Steuerung auch umgesetzt werden kann [4]. Mit steigender Komplexität und Dynamik der Produktion und des Unternehmensumfelds wächst deshalb die Bedeutung einer akkuraten und zuverlässigen PPS zukünftig weiter [5].

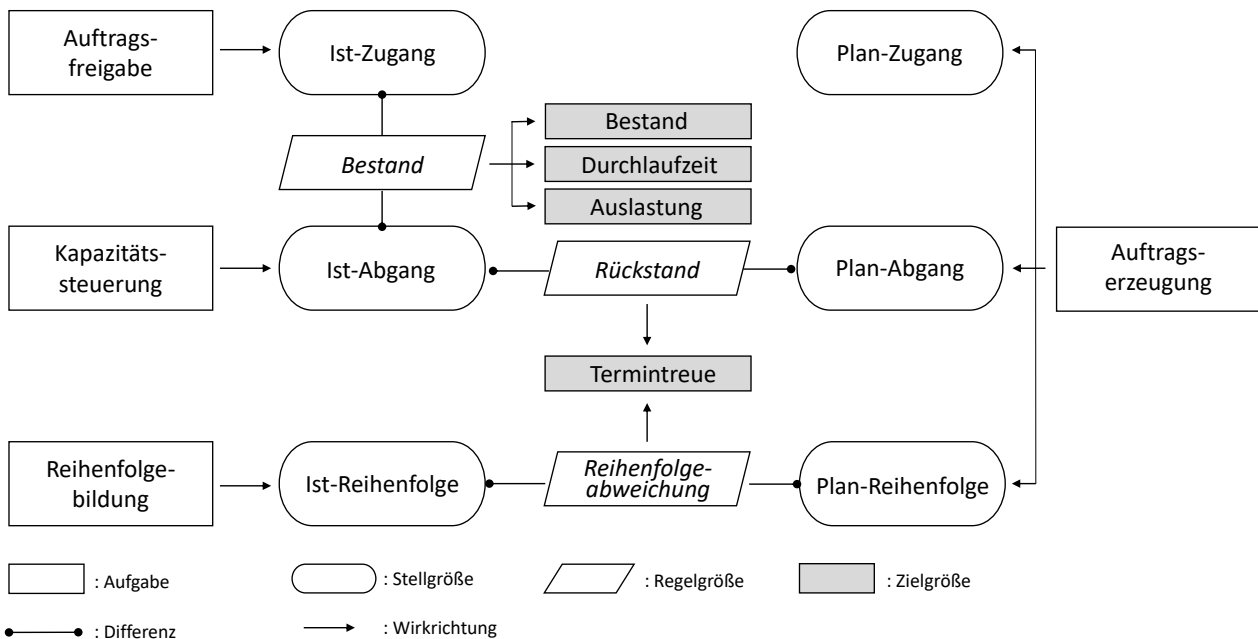
Trotz der Dynamik werden Modelle in der PPS oftmals bei Änderungen nicht angepasst, was manuelle Eingriffe in das System notwendig macht [6]. Sie führen jedoch häufig zu unerwartetem Verhalten, dessen Auswirkungen nicht absehbar sind [4]. Aus der Systemdynamik ergeben sich vielversprechende Ansätze, um Auswirkungen von Steuerungsentscheidungen vorherzusagen. Der Nutzen und eine Anwendung dieser Ansätze in der Halbleiterindustrie werden im Beitrag aufgezeigt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Produktionsplanung und -steuerung

Die PPS nimmt eine zentrale Stellung bei der Auftragsabwicklung in produzierenden Unternehmen ein und umfasst damit neben direkten Produktionsbereichen des Produktionssystems auch indirekte Beteiligte der technischen Auftragsabwicklung [7]. Dabei arbeitet die PPS auf die Ziele hin, eine hohe Liefertermintreue bei gleichzeitig niedrigen Durchlaufzeiten zu erreichen. Parallel wird über eine Bestandsminimierung sowie eine Maximierung der Kapazitätsauslastung eine kosteneffiziente Produktion angestrebt [3]. Zur Strukturierung der hierfür notwendigen vielfältigen Aufgaben der PPS ist das Aachener PPS-Modell weit verbreitet [7]. Darauf baut das Modell zur Fertigungssteuerung nach *Lödding* (Bild 1) auf und beschreibt die Zusammenhänge in der Fertigungssteuerung zwischen Stellgrößen, Regelgrößen sowie den vier charakteristischen Zielgrößen der Produktion in Form von Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue [4].

PPS-Modelle haben aber ihre Grenzen, weil sie komplexe Sachverhalte oftmals zu sehr vereinfachen [6]. So sind neben den beschriebenen Stell- und Regelgrößen in einer typischen Fertigung noch eine Vielzahl weiterer Parameter zu berücksichtigen, um die nicht trivialen Auswirkungen von Steuerungsentscheidungen auf die Zielgrößen zu analysieren [3]. Eine simulationsgestützte Analyse dieser Zusammenhänge bildet jedoch die Grundlage dafür, die Aufgaben der PPS weiter zu automatisieren und damit manuelle Eingriffe in die Produktionssteuerung zu minimieren. Der Aufwand zur Erstellung von Modellen zur Ablaufsimulation in der Produktion ist jedoch heute noch sehr hoch und bedarf spezifischer Expertise [7]. In der Halbleiterindustrie ist dieser Aufwand beispielsweise durch die Vielzahl der Elemente in der Fertigung, die inhärente Unsicherheit



**Bild 1. Modell zur Fertigungssteuerung [4]**

des Produktionssystems und den ständigen technologischen Wandel begründet [2]. Zur Überwindung dieser Limitierungen wird in Abschnitt 3 eine Integration zwischen PPS und Systemdynamik beschrieben.

## 2.2 Systemdynamik

Systemdynamik bezeichnet eine von *Jay W. Forrester* entwickelte Übertragung des kybernetischen Prinzips der Rückkopplung von naturwissenschaftlichen auf sozioökonomische Fragestellungen. Untersucht wird damit, wie sich Entscheidungen und Handlungen in industriellen Systemen auf den Erfolg des Systems auswirken [8]. Zur Prädiktion der Auswirkungen von Steuerungsentscheidungen kann die Systemdynamik dahingehend verwendet werden, dass anstatt des gesamten Produktionsablaufs nur die kausalen Zusammenhänge zwischen charakteristischen Kenngrößen modelliert und quantifiziert werden. Darauf aufbauend kann simuliert werden, wie sich bei Veränderung einer Kenngröße, also einem Steuerungseingriff, die übrigen Kenngrößen verhalten. Vorteile eines solchen Systemdynamik-Modells sind unter anderem die Möglichkeit, alle Kausalbeziehungen abbilden zu können, mathematisch einfacher Natur zu sein sowie daraus folgend auch bei einer großen Variablenanzahl maschinell berechenbar zu bleiben [8].

Die Modellierungstechniken der Systemdynamik lassen sich in qualitative und quantitative Ansätze unterteilen [9]. Bei der qualitativen Modellierung werden zur Strukturierung von Systemen deren Variablen durch Verbindungen in einen vorhandenen kausalen Zusammenhang gesetzt. Die Richtung der Verbindungen spiegelt dabei die Argumentationsweise wider. Die positive oder negative Polarität der Verbindung beschreibt den Effekt der Erhöhung oder Erniedrigung von der unabhängigen Ausgangsvariable auf die abhängige, verbundene Variable. Schleifen zwischen Variablen werden abhängig von der Polarität mit „Reinforcing“ (gerade Anzahl negativer Polaritäten) oder „Balancing“ (ungerade Anzahl negativer Polaritäten) benannt. Diese qualitativen Modelle werden als Causal-Loop-Diagramm (CLD) bezeichnet. Zu beachten ist, dass qualitative Modelle

kein durchschnittliches Systemverhalten beschreiben, sondern nur die Auswirkungen, wenn sich eine Variable im System verändert [9].

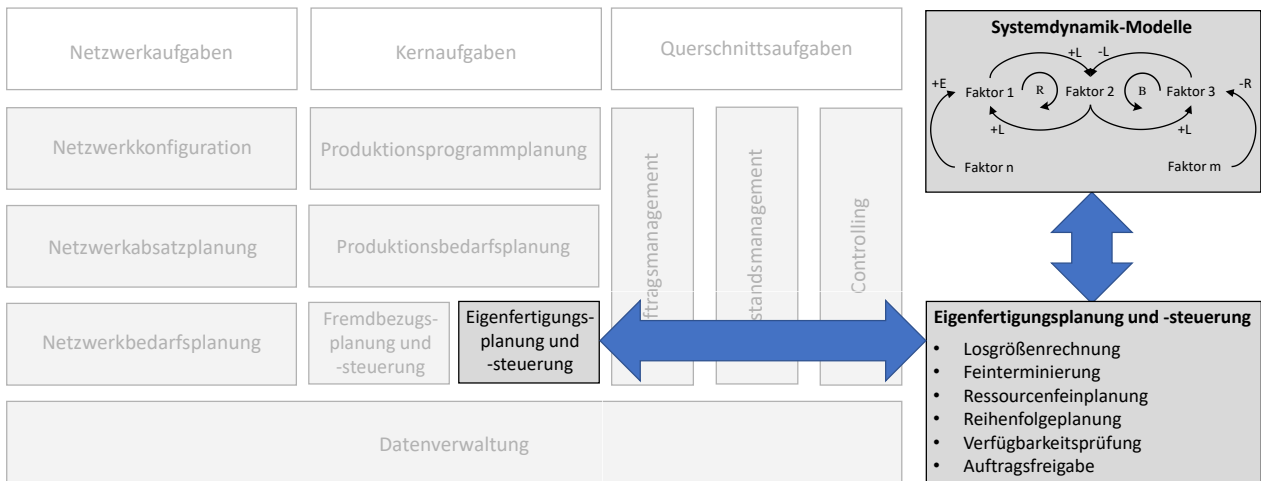
Die quantitative Modellierung baut auf der qualitativen Modellierung auf und hinterlegt mathematische Beschreibungen der kausalen Abhängigkeiten zwischen Variablen. Angelehnt an hydraulische Systeme werden die Variablen des qualitativen Modells in Bestands- sowie Flussgrößen aufgeteilt, deren Zu- und Abflüsse von Ventilen reguliert werden. Diese Modelle werden deshalb als Stock-and-Flow-Diagramm bezeichnet und verbinden die kausalen Aussagen qualitativer Modelle mit der Dynamik von Systemen [9].

## 3 Integration von Systemdynamik in die Produktionsplanung und -steuerung

Die Integration von Ansätzen aus der Systemdynamik in die PPS adressiert den Zielkonflikt, dass einerseits Auswirkungen von Planungs- und Steuerungsentscheidungen prädiktiv analysiert werden müssen und andererseits der Aufbau und die Pflege von Ablaufsimulationen mit einem hohen Aufwand verbunden sind. Systemdynamik-Modelle erlauben es, nicht mehr den gesamten Ablauf eines Produktionssystems modellieren zu müssen, sondern nur dessen Stell-, Regel- und Zielgrößen sowie deren kausale Zusammenhänge und mathematische Beschreibungen. Damit wird nicht nur der Aufwand zur Modellierung und Pflege der Modelle minimiert, sondern auch deren Simulationszeit. Folglich können Alternativen schneller simuliert werden und damit insbesondere in der Produktionssteuerung schneller auf Ereignisse reagiert werden.

### 3.1 Integration der Aufgaben

Mit dem Fokus auf das unternehmensinterne Produktionssystem lassen sich Systemdynamik-Modelle korrespondierend zur Eigenfertigungsplanung und -steuerung in das Aachener PPS-Modell integrieren (**Bild 2**). Den eigentlichen Aspekt der Planung und Steuerung des Produktionssystems bildet dabei



**Bild 2. Integration von Systemdynamik-Modellen in die Produktionsplanung und -steuerung PPS (in Anlehnung an [7, 9])**

weiterhin die Eigenfertigungsplanung und -steuerung ab. Zur Prädiktion von Auswirkungen eines steuernden Eingriffs in das Produktionssystem interagiert diese dann mit einer Simulation, basierend auf Systemdynamik-Modellen (Bild 3). Die Steuerungsentscheidung wird also von der Eigenfertigungsplanung und -steuerung vorgeschlagen, deren Auswirkungen anschließend von Systemdynamik-Modellen simuliert. Dieser Prozess kann mehrfach wiederholt werden, um verschiedene Alternativen zu simulieren oder Steuerungsentscheidungen iterativ mit dem Ziel zu optimieren, die Auswirkungen auf eine oder mehrere Zielgrößen möglichst positiv zu beeinflussen. Idealerweise wird die nach den Zielgrößen bestmögliche Steuerungsalternative anschließend automatisiert von der Eigenfertigungsplanung und -steuerung umgesetzt.

### 3.2 Vorgehen zur Erstellung von Systemdynamik-Modellen

Die in Bild 4 dargestellte Vorgehensweise zum Erstellen von Systemdynamik-Modellen in der PPS basiert auf den allgemeinen Vorgehensweisen nach [8], [9] und [10].

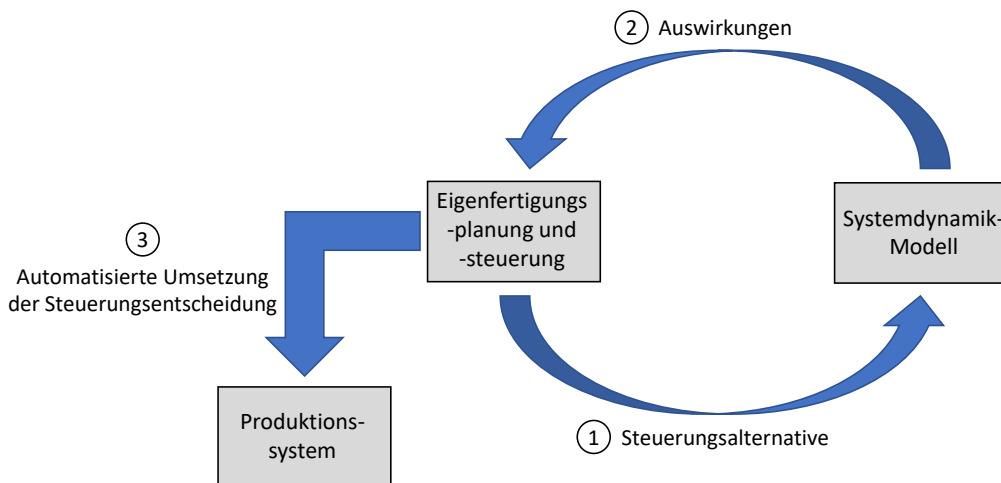
Im ersten Schritt wird die Problemstellung beschrieben. Hierfür ist die Festlegung des Modellzwecks maßgeblich, der die Systemgrenzen und den Zeithorizont enthält. Die Systemgrenzen sind dort zu ziehen, wo die Kopplung zur Umgebung

sehr schwach ist. In der PPS können dies beispielsweise einzelne Aufgaben oder angrenzende Systeme wie das Wertschöpfungsnetzwerk sein. Sofern bereits ähnliche Modelle existieren, können diese als Basis herangezogen werden.

Im nächsten Schritt erfolgt der qualitative Modellentwurf, welcher am Ende die verhaltensrelevante Systemstruktur in einem CLD darstellt. Welche Systemgrößen relevant und wie diese miteinander verknüpft sind, wird zuvor in einem Wortmodell beschrieben. Hier fließen unter anderem wissenschaftliche Untersuchungen, Expertenbefragungen oder auch Hypothesen mit ein.

Im dritten Schritt werden die Wirkbeziehungen zwischen den Systemgrößen im qualitativen Modell mittels funktionaler (Multiplikation, Addition usw.) oder logischer Zusammenhänge quantifiziert und in ein Stock-and-Flow-Diagramm überführt. Im besten Fall erfolgt die Quantifizierung vollständig, dies ist jedoch in der Realität nicht immer möglich.

Anschließend kann in Schritt vier der Aufbau des Simulationsmodells erfolgen. Dafür muss eine geeignete Simulationsplattform gewählt werden, welche entweder den Stock-and-Flow-Ansatz bereits unterstützt oder diesen mit alternativen Methoden überführbar macht. Im Anschluss werden die Parameter und Anfangsbedingungen definiert, um die Simulationsläufe vergleichbar zu machen.



**Bild 3. Interaktion zwischen Eigenfertigungsplanung und -steuerung sowie Systemdynamik-Modellen**

## Qualitative Systemdynamik

## Quantitative Systemdynamik

1. Formulierung der Problemstellung	2. Qualitative Modellierung	3. Quantitative Modellierung	4. Aufbau des Simulationsmodells	5. Test des Modells
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modellzweck bestimmen</li> <li>• Systemgrenzen definieren</li> <li>• Ggf. Referenzmodelle berücksichtigen</li> <li>• Schlüsselvariablen ableiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wortmodell formulieren (System, Variablen und Verhalten)</li> <li>• Wirkungsbeziehungen zwischen Variablen identifizieren</li> <li>• Causal Loop Diagram erstellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wirkungsbeziehungen funktional beschreiben</li> <li>• Mathematische oder logische Formalisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geeignete Beschreibungsmethode wählen</li> <li>• Quantitatives Modell übersetzen</li> <li>• Parameter und Anfangsbedingungen definieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definiert durch Modellzweck</li> <li>• Robustheit prüfen</li> <li>• Sensitivitätsanalyse</li> <li>• Modellgültigkeit validieren (Struktur, Verhalten, Empirie, Anwendung)</li> </ul>
Charakteristik des Produktionssystems und der PPS				

**Bild 4. Vorgehen zur Erstellung von Systemdynamik-Modellen für die PPS in Anlehnung an [8–10]**

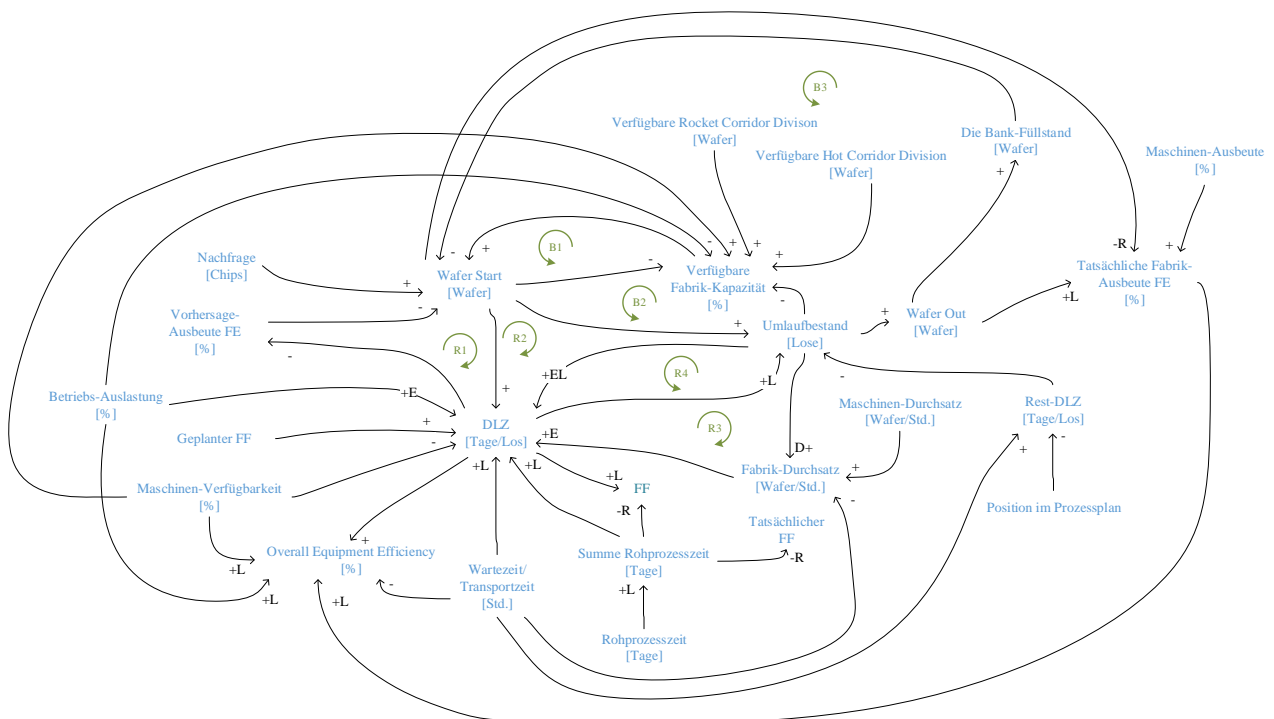
Im fünften und letzten Schritt wird das Modell auf Basis des eingangs festgelegten Modellzwecks getestet. Die Variablen und Zusammenhänge sind dabei daraufhin zu prüfen, inwieweit sie dem realen System entsprechen. Auch die Robustheit und Sensitivität auf Unsicherheiten ist festzustellen. Unter Umständen ist eine Anpassung der Parameter notwendig, sodass sich eine iterative Wiederholung der Schritte vier und fünf bildet. Sind die Tests erfolgreich, kann die Charakteristik des Produktionssystems bei Eingriffen durch die PPS simuliert werden.

Der Fokus des Diagramms liegt auf dem Front-End der Produktion, also jenem Teil der Prozesskette, in welchem der höchste Wertschöpfungsanteil stattfindet. Im Front-End werden auf Wafern in einem komplexen mehrstufigen Fertigungsprozess schichtweise Chips gefertigt. Wafer bezeichnet dabei sowohl den Rohling, als auch das teilfertige Werkstück während der Fertigung [2]. Dargestellt werden im Diagramm die Einflussfaktoren auf die Produktionssteuerung, um beim Eintreten von Störeeignissen Gegenmaßnahmen ableiten zu können. Der Zeithorizont ist daher operativ.

## 4 Anwendung

Für einen Anwendungsfall in der PPS bei einem Halbleiterhersteller wurde ein CLD als qualitativer Ansatz erstellt (Bild 5).

Die Auswahl der Einflussfaktoren mit ihren in eckigen Klammern dargestellten Einheiten ist zuvor durch die Verknüpfung von Theorie und Praxis erfolgt und umfasst quantifizierbare Größen. Im ersten Schritt wurden Literaturquellen und Semi-



**Bild 5. Exemplarisches Causal-Loop-Diagramm in der PPS eines Halbleiterherstellers**

Standards (Semiconductor Equipment and Materials International) auf mathematische und logische Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren untersucht. Diese wurden durch Experteninterviews und Workshops ergänzt und konkretisiert. In Bezug auf die im vorherigen Abschnitt dargestellte Vorgehensweise zeigt Bild 5 den Zustand innerhalb des dritten Schritts, Teil A – Wirkbeziehungen sind modelliert und formalisiert, jedoch in dieser Darstellung nicht quantifiziert. Die Wirkbeziehungen werden deshalb als linear zunehmend (+L), exponentiell zunehmend (+E), erst exponentiell und dann linear zunehmend (+EL) und degressiv zunehmend (+D) sowie regressiv abnehmend (-R) dargestellt. Exemplarische Schleifen, welche durch die Verbindung der Einflussfaktoren entstehen, sind ebenfalls dargestellt. So bildet beispielsweise die Verbindung von der Anzahl eingeschelester Wafer in die Produktion mit der verfügbaren Fabrik-Kapazität aufgrund der ungeraden Anzahl an negativen Polaritäten einen Balancing Loop.

Für den Modellzweck der Systematisierung von Einflussfaktoren ist das CLD ein effektiver Weg, um jene Einflussfaktoren auszuwählen, welche für den Aufbau von Entscheidungsmodellen notwendig sind. Diese dienen dann als Unterstützung für die Produktionssteuerung, um adäquat auf Störereignisse aus dem Wertschöpfungsnetzwerk zu reagieren. Validiert werden können die Auswirkungen solcher Entscheidungen analog zu Bild 3 mit einem auf diesem CLD basierenden Stock-and-Flow-Diagramm.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der PPS kommt insbesondere in hochtechnisierten Bereichen wie der Halbleiterindustrie eine hohe Bedeutung zu, wenn trotz der Komplexität der Produktion eine hohe Zielerreichung angestrebt wird. Für steuernde Eingriffe in die Produktion müssen deshalb eine Vielzahl von Einflussfaktoren und deren Wirkbeziehungen berücksichtigt werden. Systemdynamik-Modelle können hier einerseits eine wertvolle Übersicht schaffen, andererseits die Auswirkungen auch auf Basis quantitativer Ansätze ermitteln. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich Systemdynamik-Modelle über die Zeit verändern und bei neuem Wissen angepasst, erweitert oder gekürzt werden können. Das in der Anwendung vorgestellte CLD stellt deshalb zum aktuellen Zeitpunkt nur einen Ausschnitt dar.

Um quantitative Simulationen durchführen zu können, soll das CLD nun zu einem Stock-and-Flow-Diagramm weiterentwickelt werden (Bild 4, Schritte 3B bis 5). Darauf aufbauend soll untersucht werden, wie die Interaktion zwischen Eigenfertigungsplanung und -steuerung sowie Systemdynamik-Modellen (Bild 3) automatisiert technisch umgesetzt werden kann. Darüber hinaus soll das Konzept neben der Halbleiterindustrie auf weitere Branchen übertragen und validiert werden.

### Literatur

- [1] Bauernhansl, T.; Schatz, A.; Jäger, J.: Komplexität bewirtschaften – Industrie 4.0 und die Folgen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014), Nr. 5, S. 347–350
- [2] Mönch, L.; Fowler, J. W.; Mason, S. J.: Production planning and control for semiconductor wafer fabrication facilities. Modeling, analysis, and systems. New York: Springer 2013
- [3] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser 2014
- [4] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin: Springer Vieweg 2016
- [5] Reinhart, G.; Gyger, T.: Identification of implicit strategies in production control. In: 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapur, 08.–11.12.2008, S. 302–306 2008
- [6] Schuh, G.; Lödding, H.; Stich, V. et al.: High Resolution Production Management. In: Brecher, C.; Klocke, F. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. 27. Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium, Aachen, 26. – 27.05.2011, S. 61–80. Aachen: Shaker 2011
- [7] Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Berlin: Springer 2007
- [8] Forrester, J. W.: Industrial Dynamics. Cambridge: MIT Press 1961
- [9] Sterman, J. D.: Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill 2000
- [10] Bossel, H.: Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 1994