

Offline-Analyse, Modellierung und Simulation von Transportsystemen in der Halbleiterproduktion

Offline Analysis, Modelling and Simulation of Transport Systems in Semiconductor Manufacturing

Thomas Wagner, André Gellrich, Vladimir Vasyutynskyy, Klaus Kabitzsch
Technische Informationssysteme, Technische Universität Dresden (Germany)
thomas.wagner2@tu-dresden.de

Abstract: Modelling and analysis of transport systems in semiconductor manufacturing is difficult because of its complexity and the large amount of data originating from different sources. This article proposes an automated method for aggregating recorded event logs in a flexible data format and hereon building a high level model of the system. On the basis of this model, multiple parameters describing performance relevant characteristics are introduced and evaluated with the help of user definable rules. The results reveal the most interesting areas for selective optimization thus lowering the necessary effort for future simulations.

1 Einleitung

Das Produktspektrum existierender 200mm-Halbleiterfertigungen wandelt sich tendenziell zu kundenorientierten Halbleiterprodukten mit einer verbesserten Energieeffizienz. Dies geht allerdings einher mit einer steigenden Komplexität der Produkte, die wiederum einen überproportionalen Anstieg der Logistikschritte (Transport- und Handhabungsprozesse) innerhalb der Produktion bedingt. Es müssen daher innovative Methoden und Strukturen entwickelt werden, um mit diesem Trend Schritt halten zu können. Ziel des Forschungsvorhabens Cool Fab im Spitzencluster Cool Silicon ist es deshalb, verschiedene Ansätze für die Konzipierung zukünftiger Materialfluss- und Logistiklösungen zu erforschen, um den stetig wachsenden Anforderungen zur Herstellung von energieeffizienten Halbleiterprodukten zu begegnen.

Dazu ist es zunächst nötig, die Transportvorgänge zwischen den Produktionsequipments und alle relevanten Einflüsse auf die Performance der Transportlogistik im bestehenden System zu analysieren, um Schwachstellen, Engpässe und entsprechendes Optimierungspotential zu finden. Relevante Fragestellungen in diesem Umfeld sind beispielsweise:

- Welche Start-Ziel Beziehungen werden häufig beansprucht, und auf welchen Routen bewegen sich die Lose dabei typischerweise durch das Transportsystem?
- Gibt es Überschneidungen zwischen den Routen, d.h. viele gemeinsam genutzte Abschnitte bzw. Pfade? Entstehen dadurch performancerelevante Engpässe?
- Wie stark wirkt sich der Faktor Mensch aus (z.B. manueller Lostransport zum und vom Equipment durch einen Operator)?

Sind diese oder ähnliche Probleme identifiziert, können z.B. folgende Überlegungen zu deren Lösung angestellt werden:

- Kann man ihnen durch Einflussnahme auf die Steuerung (z.B. Ausweichrouten) entgegenwirken?
- Können durch das Hinzufügen neuer Förderelemente bzw. durch den Umbau vorhandener Elemente Verbesserungen erzielt werden?

Dieser Beitrag beschreibt einen Ansatz zur modellbasierten, semiautomatischen Analyse der nichtproduktiven Transportzeiten, welche den Ausgangspunkt für die Simulation alternativer Transportrouten und Transportsystemlayouts sowie der Optimierung des Scheduling der Transportaufträge, basierend auf den Produktionszeiten und der Auslastung des Fertigungsequipments, bildet.

2 Ausgangssituation

Die in der Einleitung formulierten Fragen könnten durch eine umfassende Simulationsstudie beantwortet werden. Die dafür notwendige Modellierung wurde jedoch aufgrund der Komplexität und des hohen Aufwands bisher nicht durchgeführt (laut FOWLER, ROSE 2004, S. 3 ein häufiges Problem in der industriellen Praxis). Im Projekt Cool Fab stehen daher im Wesentlichen folgende Informationen zur Verfügung:

- Ereignismeldungen (Logs) der ME- (Manufacturing Execution), Monitoring- und Testsysteme zu Transport- und Lageraufträgen sowie
- Strukturinformationen wie Layout, Zugehörigkeit einzelner Equipments zu Bereichen des Transportsystems und befahrbare Routen.

Die Menge (mehr als 100.000 Ereignismeldungen pro Tag) sowie die Heterogenität der zur Verfügung stehenden Daten machen, wie aus anderen Anwendungsfällen bekannt (FOWLER, ROSE 2004 S. 6), eine tiefgründige manuelle Auswertung der Logs unmöglich. Die (semi-)automatische Analyse von Equipment-Logs wird in RÖDER u.a. (2005) beschrieben, wobei jedoch die Untersuchung einzelner Tools im Vordergrund steht. Vorhandene Arbeiten zur automatischen Log-Auswertung umfassen weiterhin die Analyse von Simulations-Traces, wie beispielsweise in KEMPER und TEPPER (2005, 2009). Allerdings liegt der Fokus dieser Arbeiten ebenso wie bei BETTER (2007) auf der Validierung der Simulationsmodelle und nicht auf der Analyse realer Prozesse. Die auf Ereignisdaten basierende Untersuchung von Geschäftsprozessen wird unter anderem in COOK u.a. (2004)

und AALST u.a. (2007) diskutiert. Trotz der Ähnlichkeit in der Herangehensweise konzentrieren sich diese Autoren jedoch auf *Erkennung* von Prozessen, während der hier vorgestellte Ansatz sich primär auf deren *Wechselwirkungen* bezieht. STRUSS (2009) beschreibt die Post-mortem-Diagnose von verketteten Flaschenabfüllanlagen, was sich unmittelbar auf weitere Domänen anwenden lässt. Es wird jedoch einerseits das Vorhandensein eines detaillierten Gesamtprozessmodells vorausgesetzt, andererseits werden die transportierten Güter nicht voneinander unterschieden. Dadurch wird deren Rückverfolgung (beispielsweise zur Untersuchung der Route eines Loses mit sehr langer Gesamtbearbeitungszeit) unmöglich.

3 Modellbildung

Zum automatischen Parsen, Aggregieren und Auswerten der Daten wurde von den Autoren ein erweiterbares, modulbasiertes Analysetool entwickelt. Um den Wünschen der Industriepartner nach Verteilbarkeit, Flexibilität und Online-Fähigkeit zu entsprechen, wurden dessen Module basierend auf der AMES Agentenplattform (siehe THEISS 2009) implementiert.

Schritt 1: Die verschiedenen herstellereigenen Protokolldaten und Anlagenspezifikationen wurden in eine uniforme Ereignishistorie transformiert, um sie dem Modellbildungsverfahren zugänglich zu machen (siehe Schritt 2). Dieses Format sieht folgende Informationen für jedes Ereignis vor:

- **Load Identifier:** Kennung der aktuell transportierten Einheit (*Load*), in diesem Fall Fertigungslose
- **State Identifier:** Aktueller Zustand (*State*), hier das soeben befahrene Transportelement (Segment) oder ein verwendetes Equipment
- **Timestamp:** Ereigniszeitpunkt
- **Attributes:** Menge weiterer Informationen, welche für dieses Ereignis in Bezug auf die spätere Analyse relevant sind

Der Vorteil dieser Darstellung liegt zum einen in ihrer Flexibilität, da auch die Daten anderer Transportsysteme (z.B. Gepäckförderanlagen, Lagerlogistik- oder Materialhandling-Systeme) in dieser Weise abgebildet werden können und zum anderen in der Nutzbarkeit effizienter Zugriffs- und Speicherstrategien.

Schritt 2: Basierend auf diesen Daten wird vollautomatisch ein erweitertes Zustandsübergangsmodell, bestehend aus den Elementen ST, TR, L, E, P und A, generiert. Die Mengen der Zustände ST und Lose L werden direkt der Ereignishistorie entnommen. TR bezeichnet die Transitionen (Übergänge) zwischen den Zuständen. Die Existenz einer Transition wird, analog zu der in AALST 2004 präsentierten Methode, aus dem zeitlich unmittelbar folgenden Auftreten desselben Loses an zwei Segmenten abgeleitet (siehe Abbildung 1). Weiterhin gehören zu einem solchen Modell sämtliche Ereignisse E sowie die zulässigen Pfade und Routen P, auf denen sich die Lose durch das System bewegen. Die Menge der Attribute A ordnet jedem Modellelement beliebig viele Kenngrößen zu, die sich in statische und dynamisch berechnete Werte unterteilen, auf die im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen wird. Abbildung 1 zeigt ein vereinfachtes Beispiel der Modellgenerierung.

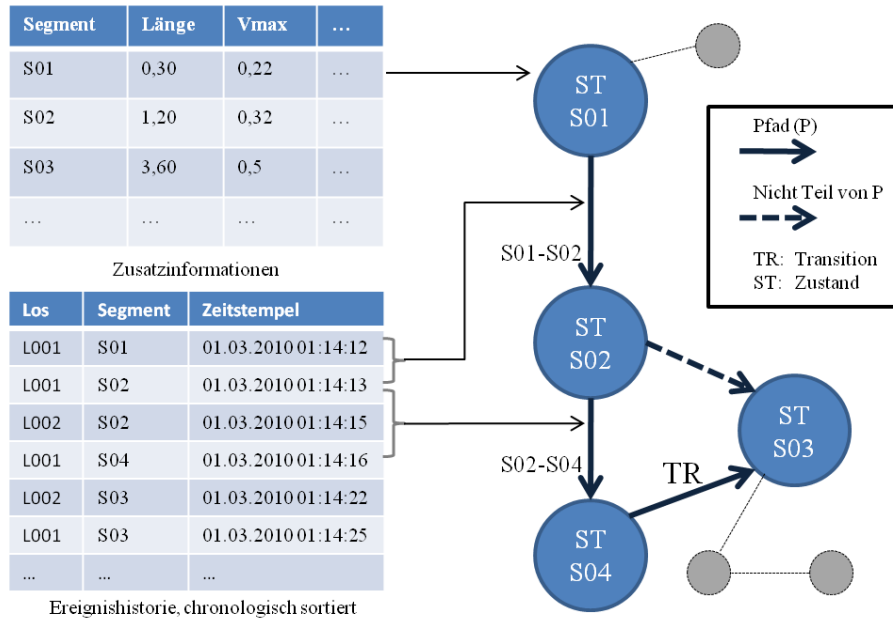


Abbildung 1: Vereinfachtes Beispiel der Modellgenerierung

4 Analyse

4.1 Kenngrößen

Liegt ein Modell des Anlagenverhaltens wie im vorigen Kapitel beschrieben vor, können dynamisch zu berechnende Kenngrößen definiert werden, die den Nutzer bei der Beantwortung der eingangs gestellten Fragen unterstützen. Für die Zustände relevante Kenngrößen sind unter anderem:

- *InterArrivalTime* $IAT_{ST(i)}$: Zeitlicher Abstand der Ankünfte zweier aufeinander folgender Lose am Segment
- *HoldingTime* $HT_{ST(i)}$: Haltezeit (Warte- bzw. Transportzeit) eines Loses auf einem Segment
- *Relevance* $\bar{R}_{ST(i)}$: normierter Anteil des Zustands $ST(i)$ an den im betrachteten Zeitraum im Gesamtsystem transportierten Losen L_{ST} . Ist die Menge der über einen Zustand $ST(i)$ transportierten Lose mit $L_{ST(i)}$ gegeben, können die relative Relevanz $R_{ST(i)}$ sowie die normierte Relevanz $\bar{R}_{ST(i)}$ folgendermaßen berechnet werden:

$$R_{ST(i)} = \frac{|L_{ST(i)}|}{|L_{ST}|} \quad \bar{R}_{ST(i)} = \frac{R_{ST(i)}}{\text{Max}_{ST(j) \in ST}(R_{ST(j)})}$$

- *CrossSectionCorrelation* $CSC_{ST(i)}$: Sei D die Menge der Transportrichtungen eines Zustandes $ST(i)$ zwischen dessen Vorgängern Pre und Nachfolgern Suc :

$$D = \{d_1 = [Pre_1(ST(i)), ST(i), Suc_1(ST(i))], \dots, d_n\}$$

So berechnet sich ein Element $CSC_{a,b}$ der Matrix $CSC_{ST(i)}$ durch die Korrelation der Haltezeiten $H(d_a) = \{HT_1, HT_2, \dots, HT_p\}$ der Transportrichtung d_a mit der Losanzahl $C(d_b) = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ der Transportrichtung d_b innerhalb der jeweiligen Wartezeit. Dabei ist $c_{k \in \{1 \dots p\}}$ die Anzahl der Lose, die während der Wartezeit HT_k die Richtung d_b passieren.

Für die Pfade wurden beispielsweise folgende Kennwerte definiert:

- *AllocatedTime* $AT_{P(i)}$: Erwartete Transportzeiten, u. a. basierend auf statischen Zustandsmerkmalen (Länge usw.)
- *TimeDifference* $TD_{P(i)}$: Transportzeitabweichung, d.h. die mittlere Differenz der tatsächlichen Transportzeiten eines Pfades von den erwarteten Zeiten $AT_{P(i)}$

Insgesamt sind derzeit mehr als 50 Kenngrößen implementiert. Diese können je nach Bedarf jederzeit vom Endnutzer erweitert werden. Sämtliche Kenngrößen können bei Vorliegen neuer Ereignisdaten prozessbegleitend (online) aktualisiert werden.

4.2 Regelbasierte Analyse

Um die in der Einleitung gestellten Fragen weitestgehend automatisch beantworten zu können, müssen auf dem gewonnenen Modell formale Regeln angewendet werden. Diese können nach ihrer Zielstellung folgendermaßen unterteilt werden:

- Erkennung von **Symptomen** (Fehler oder suboptimales Verhalten)
- Iterative **Rückverfolgung** von Symptomen zu ihren Ursachen
- Vorschlagen von adäquaten **Gegenmaßnahmen**

Weiterhin können die Quellen für Regeln wie folgt unterschieden werden:

- **Modellbasierte Regeln** werden ausschließlich anhand abstrakter Eigenschaften des Modells (z.B. dessen Topologie und statistischen Kennwerten) erzeugt und können dementsprechend auf alle Modelle angewendet werden.
- **Expertenregeln** verwenden domänenspezifisches Wissen. Da diese auch während der Analysephase erzeugt oder erweitert werden können, wird der Experte bei der Arbeit mit dem Framework durch aussagekräftige Visualisierungen und Datenverarbeitungsschritte unterstützt.

Die Ergebnisse der Regelanwendung (z.B. aggregierte (sekundäre) Kennwerte, gefilterte und sortierte Modellelement-Listen) können wie folgt verwendet werden:

- Visualisierungen in Form von Tabellen, Graphen und Diagrammen erlauben dem Anwender einen tiefen Einblick in die Zusammenhänge des betrachteten Systems und unterstützen die Entscheidungsfindung bei der Optimierung.
- Weiterführende Analyse mit anderen Tools über Exportschnittstellen
- Ausführung von Gegenmaßnahmen, beispielsweise Auslösen von Alarmen

4.3 Beispiel

Anhand der Zuordnung von Losen zu befahrenen Routen lassen sich die am häufigsten verwendeten Routen sowie die durchschnittlich auf einer Route benötigte Zeit ermitteln. Von besonderem Interesse sind der potentielle Einfluss beim Ausfall eines Kreuzungspunktes sowie das Verhalten in Situationen mit hoher Last. Generell ist zu erwarten, dass Ausfälle oder Überlastungen (Staus) einzelner Segmente umso kritischer sind, je mehr Pfade durch dieses Segment führen und je mehr Lose auf diesen Pfaden transportiert werden. Um solche Brennpunkte zu identifizieren, wird die normierte mittlere Transportzeitabweichung $\overline{TD}_{ST(i)}$ jedes Zustands berechnet mit:

$$TD_{ST(i)} = avg(TD_{P(x)} \mid ST(i) \in P(x)) \quad \overline{TD}_{ST(i)} = \frac{TD_{ST(i)}}{\text{Max}_{ST(j) \in ST} (TD_{ST(j)})}$$

Der Abweichungskoeffizient A eines Zustandes $ST(i)$ wird wie folgt definiert:

$$A_{ST(i)} = \overline{R}_{ST(i)} \cdot \overline{TD}_{ST(i)}; A_{ST(i)} \in R\{0...1\}$$

Abbildung 2 visualisiert $A_{ST(i)}$ für einen Ausschnitt des Transportsystems, indem jedem Zustand eine Hintergrundfarbe zwischen grün ($A_{ST(i)}=0$) und rot ($A_{ST(i)}=1$) zugewiesen wird.

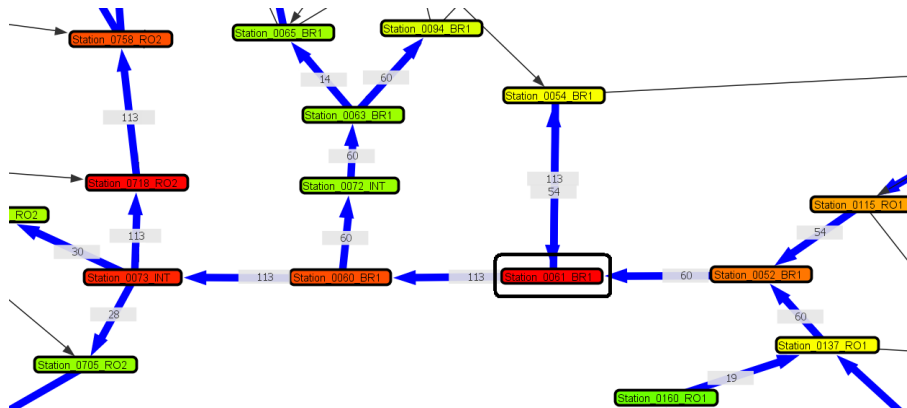


Abbildung 2: Ausschnitt des betrachteten Systems mit mehreren Pfaden

Im gezeigten Ausschnitt weisen die Übergangselemente zwischen zwei Produktionsbereichen hohe Werte von $A_{ST(i)}$ auf. Für das Segment "Station_0061_BR1" (im Bild umrahmt) wurden außerdem die bedeutendsten Transportrouten visualisiert (blau), die sich in nahezu alle Bereiche der Fabrik verästeln.

Man kann nun folgende Regel anwenden: "Ermittle alle Zustände deren Abweichungskoeffizient größer als 0,9 ist und zeige dem Benutzer für diese die Matrix $CSC_{ST(i)}$ an". Aus der Analyse der Matrix ergab sich für die Station "Station_0061_BR1" ein starker Zusammenhang zwischen der Wartezeit auf der Strecke a und dem Losdurchsatz auf Strecke b (siehe Abbildung 3).

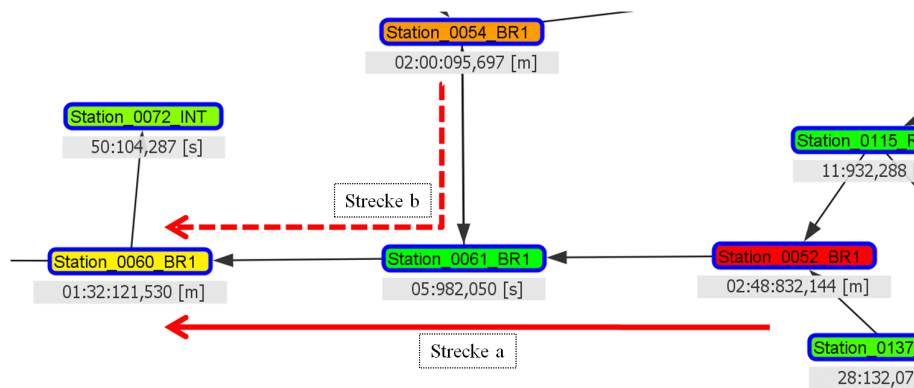


Abbildung 3: Transport über die Strecken a und b, an den Stationen sind jeweils die Haltezeiten HT dargestellt

Die Ursache-Wirkungsbeziehungen werden derzeit noch untersucht. Setzt man jedoch voraus, dass der Losdurchsatz die Wartezeit beeinflusst, wären mögliche Ansätze zur Entspannung des Problems z.B. der punktuelle Ausbau des Transportsystems oder die Umleitung einiger Lose über andere, parallele Segmente (im abgebildeten Ausschnitt nicht dargestellt). Obwohl letztere Lösung deutlich kostengünstiger in der Anwendung wäre ist zu erwarten, dass sich durch die daraus folgende Mehrbelastung anderer Segmente Situationen entwickeln, welche die Performance wiederum negativ beeinflussen. Eine genaue Evaluation der Ansätze ist demnach nur mittels einer Simulationsstudie zu erreichen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das in diesem Beitrag beschriebene Framework und die Methode zur ereignisbasierten Modellierung und Analyse von Transportsystemen konnte aufgrund der erreichten Flexibilität bereits erfolgreich in anderen Anwendungsgebieten, wie der Analyse von Gepäckförderanlagen (WUSTMANN u.a. 2009), angewendet werden.

Durch die Einführung der erläuterten, domänenspezifisch erweiterten, statischen und dynamischen Kenngrößen können jetzt auch im Bereich der Halbleiterindustrie Engpässe und Anomalien in den zu untersuchenden Systemen aufgedeckt werden. Das erzeugte Modell wird zukünftig als Grundlage für Simulationsstudien dienen die es ermöglichen werden, verschiedene Optimierungsvarianten zunächst ohne Beeinflussung der realen Anlage zu testen. Da die Analyse der Modellkenngrößen wichtige Anhaltspunkte auf kritische Stellen des Systems liefert, ist dabei eine erhebliche Verringerung des zur Simulation von Alternativen nötigen Aufwandes zu erwarten. Exportschnittstellen für gängige Simulationswerkzeuge befinden sich derzeit in Entwicklung.

6 Förderhinweis

Das Forschungsprojekt Cool Fab wird im Rahmen des Spitzenclusters Cool Silicon vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Literatur

- AALST, van der W. M. P.; WEIJTERS, T.; MARUSTER, L.: Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs. In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Piscataway, NJ, 16(2004)9, S. 1128-1142.
- AALST, van der W. M. P.; REIJERS, H.A.; WEIJTERS, A. J. M. M. u.a.: Business process mining: An industrial application. In: Information Systems, Amsterdam, 32(2007)5, S. 713-732.
- BETTER, M.; GLOVER, F.; LAGUNA, M.: Advances in analytics: integrating dynamic data mining with simulation optimization. In: IBM Journal of Research and Development, New York, 51(2007)3, S. 477-487.
- COOK, J. E.; DU, Z.; LIU, C.; WOLF, A. L.: Discovering models of behaviour for concurrent workflows. In: Computers in Industry, Amsterdam u.a., 53(2004)3, S. 297-319.
- FOWLER, J. W.; ROSE, O.: Grand Challenges in Modelling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. In: Simulation, Thousand Oaks, CA, 80(2004)9, S. 469-476.
- KEMPER, P.; TEPPER, C.: Trace based analysis of process interaction models. In: Proceedings of the 37th conference on Winter simulation. Hrsg.: KUHLM, M. E.; STEIGER, N. M.; ARMSTRONG, F. B.; JOINES, J. A. Orlando, Florida, 2005, S. 427-436.
- KEMPER, P.; TEPPER, C.: Automated Trace Analysis of Discrete-Event System Models. In: IEEE Software Engineering, New York, 35(2009)2, S. 195-208.
- RÖDER, A.; VASYUTYNSKY, V. u.a.: Log-based State Machine Construction for Analyzing Internal Logistics of Semiconductor Equipment. In: MASM 2005, Singapore, 2005, S. 54-60.
- STRUSS, P.; ERTL, B.: Post-mortem Diagnosis of Bottling Plants Based on Recorded Data. In: Safeprocess '09, 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, 2009.
- THEISS, S.; VASYUTYNSKY, V.; KABITZSCH, K.: Software Agents in Industry: a Customized Framework in Theory and Praxis. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, New York, 5(2009)2, S. 147-156.
- WUSTMANN, D.; VASYUTYNSKY, V., SCHMIDT, Th.: Ansätze zur automatischen Analyse und Diagnose von komplexen Materialflusssystemen. In: 5. Fachkolloquium WGTL. Hrsg.: TU Ilmenau, 2009, S. 1-19.