

# **Modellbasiertes Verfahren zur Online-Leistungsbewertung von automatisierten Transportsystemen in der Halbleiterfertigung**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von  
Dipl.-Ing. Roland Sturm  
aus Nürnberg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c.  
mult. Engelbert Westkämper

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 31.07.2006

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>15</b>
1.1 Problemstellung .....	15
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	17
<b>2 Ausgangssituation und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes .....</b>	<b>19</b>
2.1 Halbleiterfertigungsprozess.....	19
2.2 Besonderheiten der Halbleiterfertigung aus der Sicht der Materialflussautomatisierung .....	20
2.3 Systemkomponenten automatisierter Transportsysteme .....	22
2.4 Automatisierter Transport in 200 mm und 300 mm Halbleiterfertigungen.....	24
2.5 Entwicklungstrends des Transportsystemlayouts.....	25
2.6 Softwaresysteme zur Steuerung des automatisierten Transports .....	27
2.7 Merkmale für den operativen Betrieb automatisierter Transportsysteme in der Halbleiterfertigung.....	30
<b>3 Anforderungen an ein Verfahren zur Online-Leistungsbewertung von automatisierten Transportsystemen .....</b>	<b>33</b>
3.1 Einflussnahme von Transportsystemen auf die Fertigungslogistik .....	33
3.2 Anforderungen an die Erfassung und Bewertung von Leistungsdaten .....	36
3.3 Anforderungen an die Datenextraktion am realen System .....	39
3.4 Anforderungen an die Datenhaltung der Leistungsdaten .....	41
3.5 Zusammenfassung der Anforderungen für ein Verfahren zur Online- Leistungsbewertung.....	42
<b>4 Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>43</b>
4.1 Direkte und indirekte Verfahren zur Leistungsmessung an Materialflusssystemen.....	43
4.2 Systeme zur Betriebs- und Maschinendatenerfassung .....	46
4.3 Leistungsbewertung als Bestandteil von Transportleitsystemen in Halbleiterfabriken .....	46
4.4 Monitoring verteilter Systeme.....	47
4.4.1 Ereignisse in verteilten Systemen .....	48
4.4.2 Spezielle Monitoringsysteme für Rechnernetzwerke .....	49
4.4.3 Verfahren der Ereignisdatenverarbeitung .....	49
4.5 Spezielle Ansätze zur Bewertung von Materialflusssystemen .....	51
4.6 Datenhaltung und Datenanalyse .....	51
4.7 Zusammenfassung Stand der Technik und Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte .....	53

<b>5 Konzeption des Lösungsansatzes und Vorgehensweise</b> .....	<b>55</b>
5.1 Konzeption von alternativen Lösungsvarianten .....	55
5.2 Lösungsansatz und Gliederung der Teilmodelle .....	57
<b>6 Entwicklung der Teilmodelle des Verfahrens</b> .....	<b>61</b>
6.1 Modellierung der automatisierten Transportprozesse und der Materiallokalationen .....	61
6.2 Teilmodell für die Leistungsbewertung .....	69
6.2.1 Systemlastverhalten.....	71
6.2.2 Verfügbarkeitsverhalten .....	73
6.2.3 Systemkonfiguration .....	75
6.2.4 Leistungsverhalten.....	76
6.2.5 Bewertungsmodell für die Leistungskennzahlen .....	86
6.2.6 Ereignisinformation zur Kennzahlenberechnung .....	88
6.3 Teilmodell für die Datenextraktion.....	89
6.3.1 Zustandsautomat der Datenextraktion .....	89
6.3.2 Ereignisdetektion in verteilten Systemen .....	97
6.3.3 Integration der Datenextraktion und der Datenhaltung.....	98
6.4 Teilmodell für die Datenhaltung .....	102
6.5 Bestandteile der Datenanalyse .....	105
<b>7 Entwicklung eines Verfahrens zur Modellanwendung</b> .....	<b>109</b>
7.1 Analyse der Strukturdaten, Kennzahlen und Steuerungsarchitektur .....	110
7.2 Konfiguration der Datenextraktion.....	112
7.3 Konfiguration der Datenhaltung .....	114
7.4 Test mit Logdaten .....	114
7.5 Initialisierung des Verfahrens.....	115
<b>8 Test des Verfahrens am Einsatz in der Praxis</b> .....	<b>117</b>
8.1 Struktur des Transportsystems .....	117
8.2 Kennzahlensystem zur Bewertung des Transportsystems .....	118
8.3 Analyse der Steuerungsarchitektur und Konfiguration der Teilmodelle zur Online-Leistungsbewertung .....	119
8.4 Darstellung der Ergebnisdaten der Online-Leistungsbewertung .....	126
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>133</b>
<b>10 Summary</b> .....	<b>139</b>
<b>11 Anhang</b> .....	<b>145</b>
<b>12 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>151</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

In der Reinstfertigung von Halbleiterbauelementen hat der Verbreitungsgrad von automatisierten Transportsystemen in den letzten Jahren zugenommen. Um maximale Maschinenauslastung und hohe Ausbeuten in Halbleiterfabriken zu erreichen, müssen die richtigen Fertigungslose partikelarm sowohl zum richtigen Zeitpunkt als auch zum richtigen Fertigungsgerät geliefert werden. Eine hauptsächliche Fehlerquelle ist der Mensch, der Lose verwechselt und den Reinraum mit Partikeln verunreinigt /Sauter 1990/. In modernen, großen Halbleiterfabriken werden daher zunehmend automatisierte Transportsysteme eingesetzt. Durch den Einsatz automatisierter Transportsysteme in Halbleiterfabriken ist neben der Verringerung von Ausschuss auch eine Effizienzsteigerung in der Logistik durch eine höhere Transparenz und geringere Zugriffszeiten im Vergleich zum manuellen Transport zu beobachten /Bode 2002, Liao 2002/. Die zu stellenden Anforderungen an die Transportleistung, die Einhaltung von kurzen Lieferzeiten und die Verfügbarkeit werden sich in den nächsten Jahren für automatisierte Transportsysteme in der Halbleiterfertigung verschärfen. Abbildung 1.1 zeigt einen Ausschnitt aus der International Technology Roadmap for Semiconductors /ITRS 2004/.

Leistungsmerkmale der Transportautomatisierung in Halbleiterfertigungen		2002	2005	2008	2011
Fertigungsmerkmale	Minimale Strukturbreite	130 nm	80 nm	55 nm	40 nm
	Scheibendurchmesser	200 mm	300 mm		
Spitzen-Transportleistung (Transporte pro Stunde)	Bereichsübergreifender Transport	1300	2250	2660	N/A
	Bereichsinterner Transport	180	210	250	N/A
	Fabrikweiter Transport	N/A	4240	5000	
Lieferzeit (Minuten)	Mittelwert für Produktionslose	10	6	5	
	bei Lastspitzen für Produktionslose	20	12	10	
	Mittelwert für Entwicklungslose	N/A	3	2	
Mittlere Bereitstellungszeit eines Transportloses aus einem Speichersystem in Sekunden		15	12	10	
Verfügbarkeitsdaten	Anzahl Transporte bis Ausfall	N/A	9k	40k	45k
	Anzahl Lagerzyklen bis Ausfall	N/A	40k	76k	
Mittlere Reparaturzeit (Minuten) nach SEMI E10	Transportsystemkomponenten	20	10	8	
	Speichersystemkomponenten	10	25	20	

Abbildung 1.1: Leistungsmerkmale der Transportautomatisierung in Halbleiterfertigungen /ITRS 2004/

Demnach wird bis zum Jahr 2008 die fabrikweite zu erbringende Transportleistung auf bis zu 5000 Transporte pro Stunde anwachsen. Gleichzeitig wird eine Reduzierung der mittleren

Lieferzeit auf ca. 5 min gefordert. Dies ist auf die Entwicklung des Fertigungsprozesses für integrierte Schaltkreise (engl. Integrated Circuits, Abk. ICs) mit höherer Integrationsdichte und mehr Funktionalität zurückzuführen.

Derzeit ist eine Zunahme der Automatisierung von Materialtransportprozessen in Halbleiterfabriken zu beobachten. Dieser Entwicklungstrend wird durch die zunehmende Implementierung von internationalen Standards bei der Entwicklung von Steuerungssoftware und Hardwarechnittstellen an Halbleiterfertigungsgeräten begünstigt. Mit dem wachsenden Verbreitungsgrad von Transportautomatisierungslösungen geht eine Zunahme der Größenordnung und der Komplexität der Materialflusstopologie in Halbleiterfabriken einher. Durch sich verkürzende Produktlebenszyklen, damit verbundenen häufiger stattfindenden Technologiewechseln und stark schwankenden Auftragsvolumina pro Technologie bzw. Halbleiterprodukt, verändern sich die Transportintensitäten zwischen funktionalen Bereichen bzw. Fertigungsgeräten im Halbleiterfertigungsprozess in immer kürzeren Zeitabständen.

Vor diesem Hintergrund gewinnt eine kontinuierliche Bewertung des Leistungsverhaltens von Transportsystemen zunehmend an Bedeutung. Schwachstellen und Engpässe bei der Transportabwicklung, welche sich durch veränderte Lastszenarien ergeben, können durch eine quantifizierte Bewertung des Gesamtsystems, von Systembereichen und Einzelkomponenten identifiziert werden. Weiterhin ermöglicht eine kontinuierliche Leistungsanalyse der Transportprozesse eine auf das Lastverhalten abgestimmte Konfiguration von Materialflusssystemen im operativen Betrieb /Freund 2001/. Die Konfigurationsanpassung umfasst hierbei die Veränderung sowohl von Steuerungsparametern als auch von Strukturparametern am Transportsystemlayout. Eine weitere Notwendigkeit der kontinuierlichen Leistungsbewertung von Transportprozessen in der Halbleiterfertigung besteht im Nachweis der vertraglich vereinbarten Leistungskennwerte und Spezifikationen zwischen Halbleiterherstellern und Transportsystemherstellern. Nach erfolgter Installation der Transportsysteme in einer Halbleiterfabrik werden hier spezielle Abnahmetests geplant und durchgeführt. Hier sind aus Sicht der Betreiber von Transportsystemen unabhängige herstellernerneutrale Verfahren zur Leistungsmessung im Rahmen von Abnahmetests durchzuführen.

Derzeit existieren noch keine praxistauglichen Lösungen für eine Online-Leistungsdatenerfassung automatisierter Transportsysteme unter Berücksichtigung der besonderen Bewertungskriterien in Halbleiterfertigungen. Zudem stehen keine geeigneten Verfahren und Werkzeuge zur Verfügung, die eine effiziente Leistungsbewertung auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen von Transportsystemen ermöglichen.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit soll einen grundlegenden Beitrag zur ereignisbasierten Beobachtung und Online-Leistungsbewertung von automatisierten Transportsystemen im operativen Betrieb von Halbleiterfertigungen leisten. Hierbei steht die Entwicklung von adäquaten Verfahren und Modellen zur Datenextraktion und Leistungsbewertung von automatisierten Transportsystemen in der Halbleiterfertigung im Vordergrund. Ziel ist es, eine neue modellbasierte Vorgehensweise zu entwickeln und prototypisch zu realisieren, mit der Leistungsdaten an der Steuerung des Transportsystems kontinuierlich erfasst und zu einer operativen Online-Leistungsbewertung des Systems verarbeitet werden können. Wichtige Kenngrößen sind hierbei das Lieferzeitverhalten, der Durchsatz und die Systemauslastung unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit sowie der aktuellen Konfiguration des Transportsystems. Die Online-Leistungsbewertung bildet die Grundlage zur kontinuierlichen Trend- und Schwachstellenanalyse der Transportprozesse in Halbleiterwerken. Die Extraktion der Leistungsdaten soll unabhängig von Transportsystemherstellern und flexibel konfigurierbar aufgebaut werden. Die zu entwickelnde Vorgehensweise muss sich an die in Halbleiterfabriken häufig verändernden Materialflussabläufe und Transportsystemkonfigurationen mit möglichst geringem Aufwand adaptieren lassen.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

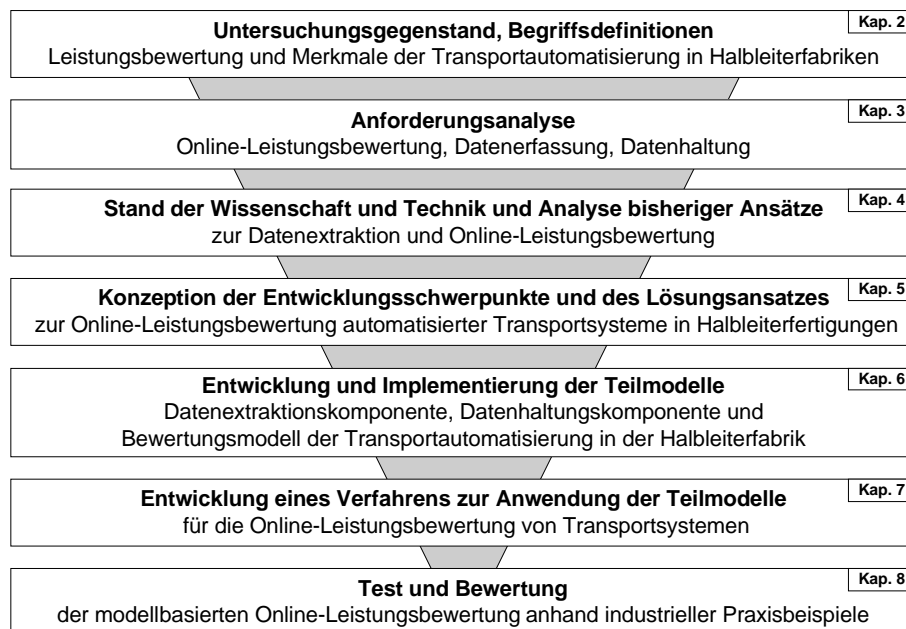


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden die für die Untersuchung notwendigen Begriffe definiert und die wesentlichen Merkmale von Transportautomatisierungslösungen in Halbleiterfabriken diskutiert. In Kapitel 3 werden die Anforderungen an das zu entwickelnde modellbasierte Verfahren analysiert. Aufbauend auf der Darstellung und Diskussion der bestehenden Ansätze und Verfahren für die Datenextraktion und die Leistungsbewertung von automatisierten Materialflusssystemen in Kapitel 4, erfolgt in Kapitel 5 die Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte und der Lösungsansatz dieser Arbeit. Die Entwicklung der Teilmodelle und die Implementierung als Komponenten des Verfahrens sind Gegenstand von Kapitel 6. Kapitel 7 beschreibt die Entwicklung einer Vorgehensweise zur systematischen Konfiguration und Adaption der Teilmodelle für den Einsatz an Transportsysteminstallationen in Halbleiterfabriken. Die Erprobung des modellbasierten Verfahrens an einem realen System wird in Kapitel 8 beschrieben. Abschließend folgen die Zusammenfassung und der Ausblick über weitere Entwicklungsmöglichkeiten zur operativen Nutzung der Online-Leistungsbewertung von Transportsystemen in Halbleiterfabriken.