

Simulationsbaukasten für die Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung - Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

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

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Uwe Bader
aus Göppingen

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: 10. März 2005

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2005

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger
und

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

Uwe Bader

**Simulationsbaukasten für die
Halbleiter- und
Flachbildschirmfertigung-
Ein Beitrag zur wirtschaftlichen
Planung, Auslegung und
Optimierung automatisierter
Materialflusssysteme**

Nr. 431

Dr.-Ing. Uwe Bader

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

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

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 3-936947-76-7 Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2005.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Herrn Professor Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing. Dieter Spath für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Für die praktische Unterstützung, die vielen Anregungen und die konstruktiven Diskussionen danke ich allen beteiligten Mitarbeitern und Studenten des Instituts. Hierbei gilt mein Dank insbesondere Herrn Dr.-Ing. Nabih Othman, Herrn Dipl.-Ing. Rolf Pfeifer, Herrn Dr.-Ing. Bernhard Klumpp, Herrn Dr.-Ing. Johann Dorner und Herrn Dr.-Ing. Alexander Steck.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Jochen Schließer, der mich durch intensive Fachgespräche und ausdauernde Diskussionsbereitschaft stets motivierte und mir als Ansprechpartner immer zur Seite stand.

Zum Dank für Ihr Verständnis, ihr Vertrauen und ihren Rückhalt während der Entstehung dieser Arbeit widme ich das Buch meinen Eltern Hedi und Wolfgang und meinem Sohn Michael.

Göppingen, im März 2005

Uwe Bader

Inhaltsverzeichnis

<i>Abkürzungen und Formelzeichen</i>	<u>12</u>
1 Einleitung	<u>15</u>
1.1 Problemstellung	<u>15</u>
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	<u>16</u>
2 Ausgangssituation	<u>17</u>
2.1 Begriffe und Definitionen	<u>17</u>
2.2 Fertigung von Halbleitern und Flachbildschirmen	<u>19</u>
2.3 Fertigungsgeräte	<u>20</u>
2.4 Fertigungslayout	<u>22</u>
2.5 Systeme zur Automatisierung der Materialflussabläufe	<u>24</u>
2.6 Lösungsverfahren und Softwaresysteme zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme	<u>28</u>
3 Analyse der Einflüsse und Ableitung von Anforderungen an die wirtschaftliche Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme	<u>33</u>
3.1 Einflussgrößen	<u>33</u>
3.2 Einflüsse aus der Simulationstechnik	<u>34</u>
3.3 Einflüsse aus der Produktionstechnik	<u>35</u>
3.3.1 Fertigungstechnik	<u>35</u>
3.3.2 Materialflussautomatisierung	<u>38</u>
3.3.3 Transporttechnik	<u>40</u>
3.3.4 Speicher- und Handhabungstechnik	<u>43</u>
3.4 Einflüsse auf die Materialflussautomatisierung	<u>45</u>
3.4.1 Automatisierungssysteme	<u>46</u>
3.4.2 Materialflusssystem	<u>47</u>
3.4.3 Materialflussteuerung	<u>48</u>
3.5 Zusammenfassung der ermittelten Anforderungen und Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte	<u>49</u>
3.6 Abgleich der Entwicklungsschwerpunkte mit dem Vorgehen bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung	<u>53</u>

4	<i>Entwicklung des Simulationsbaukastens zur Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme</i>	55
4.1	Vorgehensweise zur Entwicklung des Simulationsbaukastens und der Teilsysteme	55
4.1.1	Modellierungsmethode zur Darstellung der Aufbaustrukturen	55
4.1.2	Funktionale Beschreibung der Ablaufstrukturen	56
4.2	Konzeption des Simulationsbaukastens	58
4.2.1	Entwicklung von Lösungsvarianten zur Abbildung automatisierter Materialflusssysteme	59
4.2.2	Leistungsbewertung und Auswahl einer geeigneten Lösungsvariante	64
4.3	Entwicklung von Lösungskonzepten zur wirtschaftlichen Automatisierung der Materialflusssysteme	65
4.3.1	Entwicklung von Funktionssequenzen und Funktionsketten	65
4.3.2	Entwicklung von Lösungsvarianten	66
4.3.3	Leistungsbewertung der Lösungsvarianten und Auswahl eines geeigneten Konzeptes zur Materialflussautomatisierung	70
4.4	Planung und Auslegung automatisierter Transportsysteme	72
4.4.1	Aufbaustruktur der Transportsysteme	73
4.4.2	Leistungsbewertung automatisierter Transportsysteme	76
4.5	Planung und Auslegung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme	77
4.5.1	Aufbaustruktur der Speicher- und Handhabungssysteme	78
4.5.2	Leistungsbewertung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme	81
4.5.3	Simulationsgestützte Planung und Auslegung der Leistungsfähigkeit automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme	82
4.5.4	Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur überschlägigen Auslegung der Speicher- und Handhabungskapazitäten	86
4.6	Zusammenfassung der Entwicklungsergebnisse und Ableitung von Leitlinien für die Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme	90
5	<i>Entwicklung von Strategien für die Optimierung automatisierter Materialflusssysteme</i>	94
5.1	Vorgehensweise zur Strategieentwicklung	94
5.2	Realisierung des entwickelten Simulationsbaukastens	94
5.3	Definition einer Modellfabrik als Experimentierplattform und Erstellung eines Simulationsplans	96

5.4	Strategien zum optimierten Einsatz der Automatisierungssysteme	99
5.4.1	Kapazität der Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten	99
5.4.2	Optimierung der Fahrzeugdisposition	101
5.4.3	Optimierung der Fahrbereichsaufteilung	103
5.5	Strategien zur Optimierung des Materialflusssystems	104
5.5.1	Minimierung der Investitionskosten	104
5.5.2	Optimierung der Eingabemenge an Fertigungslosen	107
5.5.3	Optimierung der Höhe des Umlaufbestandes	108
5.5.4	Berücksichtigung von Prioritätenlosen	110
5.6	Optimierung der Materialflusssteuerung	111
5.6.1	Ablaufstruktur zur Auswahl eines Fertigungsgerätes	111
5.6.2	Ablaufstruktur zur Auswahl eines Fertigungsloses	113
5.7	Zusammenfassung der Entwicklungsergebnisse und Ableitung von Strategien zur Optimierung automatisierter Materialflusssysteme	114
6	<i>Anwendung und Erprobung des entwickelten Simulationsbaukastens in einer Halbleiterfertigung</i>	118
6.1	Datenbasis, Modellaufbau und Versuchsdurchführung	118
6.2	Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme	121
6.2.1	Planung und Auslegung der Transportsysteme	121
6.2.2	Planung und Auslegung der Speichersysteme	125
6.2.3	Planung und Auslegung der Handhabungssysteme	126
6.3	Optimierung der Materialflusssysteme	127
6.3.1	Eingabe der Fertigungslose in die Fertigung	127
6.3.2	Automatisierungskonzept	129
6.4	Planung, Auslegung und Optimierung eines neu entwickelten Systems zur Materialflussautomatisierung	130
6.5	Diskussion und Bewertung der erzielten Ergebnisse	133
7	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	134
8	<i>Summary</i>	137
9	<i>Literaturverzeichnis</i>	141

Abkürzungen und Formelzeichen

€	EURO
∅	Durchschnitt
μm	Mikrometer
A _{1...n}	Automatisierungssystem 1 bis n
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BiCMOS	Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor
b_y	Speicherbreite in y-Richtung
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
d	Tag
FB _{1...n}	Fertigungsbereich 1 bis n
FB _A	Fertigungsbereich A
FB _B	Fertigungsbereich B (Zentralkorridor)
FB _C	Fertigungsbereich C
FIFO	First In First Out
FG _{1...n}	Fertigungsgerät 1 bis n
FG _A	Fertigungsgerät im Fertigungsbereich A
FG _C	Fertigungsgerät im Fertigungsbereich C
FOUP	Front Opening Unified Pod
FPD	Flat Panel Display
FTS	Fahrerloses Transportsystem
Fzg.	Fahrzeug
h	Stunde
HHS_y	Breite des mittig angeordneten Handhabungssystems im Speicher
HL	Halbleiter
h_z	Speicherhöhe in z-Richtung
kg	Kilogramm
LIFO	Last In First Out
l_x	Speicherlänge in x-Richtung
m	Meter

max.	maximal
M_{Fach1}	Geometrische Abmessungen des Regalfaches 1
min	Minute
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarden
M_{SP}	Minimale geometrische Abmessungen eines Speichersystems
N_{HH}	Summe an Handhabungsvorgängen in einem definierten Zeitintervall
$N_{HH \max}$	Maximale Summe an Handhabungsvorgängen in einem Zeitintervall
N_{SPaus}	Anzahl aus dem Speicher ausgelagerter Lose
N_{SPein}	Anzahl in den Speicher eingelagerter Lose
$N_{SPinhalt}$	Anzahl im Speicher vorhandener Lose
N_{SPint}	Durchschnittliche Belegung eines Speichersystems mit Losen in einem definierten Zeitintervall
OEE	Overall Equipment Efficiency
OMG	Object Management Group
OMT	Object Modeling Technique
OOA	Object Oriented Analysis
OOD	Object Oriented Design
RR _{1...n}	Reinraum 1 bis n
RRH_{\max}	Maximale Reinraumhöhe
RRH_{Std}	Standardhöhe für einen Reinraum
s	Sekunde
SECS	Semiconductor Equipment Communication Standard
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials Institute
SMIF	Standard Mechanical Interface
SP _A	Speichersystem im Fertigungsbereich A
SP _C	Speichersystem im Fertigungsbereich C
s_x	Verfahrweg in x-Richtung
$s_{x \max}$	Maximaler Verfahrweg in x-Richtung
s_y	Verfahrweg in y-Richtung
$s_{y \max}$	Maximaler Verfahrweg in y-Richtung

s_z	Verfahrweg in z-Richtung
$s_{z \max}$	Maximaler Verfahrweg in z-Richtung
t_{HHS}	Zeitbedarf für die Ausführung eines gesamten Handhabungsablaufs
$t_{HHS \max}$	Maximale Zeit zur Ausführung eines gesamten Handhabungsablaufs
t_{int}	Länge des Zeitintervalls
t_{\max}	Maximaler Zeitanteil
t_x	Verfahrzeit in x-Richtung
t_y	Verfahrzeit in y-Richtung
t_z	Verfahrzeit in z-Richtung
UML	Unified Modeling Language
v_x	Geschwindigkeit in x-Richtung
v_y	Geschwindigkeit in y-Richtung
v_z	Geschwindigkeit in z-Richtung
WIP	Work In Process
$x_{1...n}$	Länge des Regalfaches 1...n in x-Richtung
$y_{1...n}$	Breite des Regalfaches 1...n in y-Richtung
y_{\max}	Maximale Regalfachbreite in y-Richtung
$z_{1...n}$	Höhe des Regalfaches 1...n in z-Richtung

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Transport-, Speicher- und Handhabungsabläufe in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung werden zunehmend automatisiert /TIN 2003, TIN 2003a, Chase 2000, Leeuwen 1999/. Gründe hierfür sind in erster Linie die steigenden Substratabmessungen und Handhabungsgewichte der Produkte, die Verbesserung der Fertigungsgeräteausrüstung und die Reduzierung der Transportzeit /Haris 2001, Bigelow 2000, Bader 1998, Garbayo 1998/. Zudem werden Beschädigungen und partikulär bedingter Ausschuss reduziert sowie Fehlleitungen und Fehlbearbeitungen in der Fertigung vermieden /TIN 2003, Kling 1996, Bader 1993a/.

Die Durchlaufzeit zur Herstellung der Produkte kann insbesondere in der Halbleiterfertigung 15 Wochen und mehr betragen, wobei bis zu 900 unterschiedliche Arbeitsschritte und 100 verschiedene Fertigungsanlagen notwendig sind /ITRS 2003a, Treiber 1999/. Ungefähr zwei Drittel der Durchlaufzeiten umfassen unproduktive Transport-, Speicher-, Handhabungs- und Wartezeitvorgänge /Martin 1999, Woolverton 1999/. Durchgeführte Studien belegen, dass ca. 43% der Durchlaufzeiten auf Speichervorgänge, 8% auf Transportvorgänge und nur 30% auf reine Prozess- und Inspektionszeiten entfallen /ITRS 2003, TIN 2003/.

Da automatisierte Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme häufig nur als autonome Teilsysteme in einzelnen Fertigungsbereichen eingesetzt werden, fehlen Erkenntnisse über kostengünstige Konzepte zur Automatisierung der gesamten Materialflussabläufe in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung /ITRS 2003, TIN 2003, TIN 2003a, Bader 1997/. Durchgeführte Untersuchungen belegen, dass Speicher- und Handhabungssysteme allgemein häufig falsch eingesetzt und ausgelegt sind, da eine bedarfsentsprechende Planung und Auslegung der notwendigen Speicher- und Handhabungskapazitäten aufgrund unzureichender Planungshilfsmittel nicht durchgeführt werden kann /ITRS 2003, Fischer 2001, Gudehus 2000a/.

Für die wirtschaftliche Planung und Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme werden effektive Simulationswerkzeuge benötigt, die alle Einflussgrößen des gesamten Fertigungsumfeldes berücksichtigen /Spath 2003, Sturm 2003, Shen 2002, Boyle 1997/. Die dazu notwendigen Simulationsmodelle müssen alle Automatisierungssysteme, Fertigungsbereiche, Fertigungsgeräte, Prozessschritte und Produkttechnologien abbilden /ITRS 2003, Bader 1999, Kuttkat 1999, Colvin 1998/. Zusätzlich besteht die Notwendigkeit, die Modelle bei einem hohen Detaillierungsgrad schnell zu erstellen und an den aktuellen Planungsstand anzupassen, die Simulationsuntersuchungen in möglichst kurzer Zeit durchzuführen und aussagefähige Ergebnisse zu erzielen /ITRS 2003a, Westkämper 2002, Wright 1999/. Mit vorhandenen Simulationssystemen sind diese Untersuchungen sehr zeitaufwendig, nur unter Vernachlässigung des Modelldetaillierungsgrades durchführbar und in der Aussagefähigkeit der erzielten Simulationsergebnisse beschränkt /Campbell 2000, Bader 1999/.

Um einen Beitrag zur wirtschaftlichen Automatisierung der Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung zu leisten, wird ein Simulationsbaukasten benötigt, der die Einflussgrößen aus der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung berücksichtigt, die vorgegebenen Anforderungen erfüllt und mit dem kostengünstig, einfach und schnell die notwendigen Transport-, Speicher- und Handhabungskapazitäten zur Automatisierung der Materialflussabläufe in ihrer Gesamtheit geplant und ausgelegt werden können /ITRS 2003, Campbell 2000, Bader 1999/. Ein weiteres Defizit besteht darin, dass Automatisierungskonzepte und Strategien fehlen, mit deren Hilfe eine fabrikweite Optimierung und Vernetzung aller automatisierten Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme durchgeführt und der Einsatz dieser Systeme unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ziel- und bedarfsorientiert optimiert werden kann.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit soll einen grundlegenden Beitrag zur wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung leisten. Das Ziel ist es, einen Simulationsbaukasten zu entwickeln, mit dem aussagefähige Ergebnisse für eine wirtschaftliche Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme unter Berücksichtigung der Zielkriterien und der speziellen Fertigungsbedingungen schnell und detailliert ermittelt werden können. Wichtige Kenngrößen hierbei sind z.B. Kapazitäten, Geschwindigkeiten, Auslastungen, Anzahl an Automatisierungssystemen, Systemleistung, Transportzeiten, Lagerzeiten, Wartezeiten sowie angewandte Fertigungs- und Materialflusstrategien.

Schwerpunkte der Arbeit liegen dabei in der Bewertung der Leistungsfähigkeit automatisierter Systemvarianten und in der systematischen Entwicklung von Lösungskonzepten und Leitlinien zur Materialflussautomatisierung, um damit die Grundlagen für einen optimalen Einsatz des Simulationsbaukastens zu schaffen. Darauf aufbauend werden mit Hilfe einer Experimentierplattform auf der Basis einer Modellfabrik mit Hilfe des entwickelten Simulationsbaukastens Optimierungsstrategien entwickelt, um die Wirtschaftlichkeit automatisierter Materialflusssysteme beim Einsatz von Transport-, Speicher- und Handhabungssystemen zu erhöhen.

Als Grundlage dieser Arbeit werden basierend auf der Darstellung der Ausgangssituation in Kapitel 2 die Einflüsse analysiert und die Anforderungen ermittelt. Anhand der durchgeführten Analysen und der ermittelten Anforderungen werden in Kapitel 3 die Entwicklungsschwerpunkte abgeleitet und mit dem Vorgehen bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme abgeglichen. Die Entwicklung des Simulationsbaukastens sowie der notwendigen Lösungskonzepte und Leitlinien erfolgt in Kapitel 4 auf der Basis der vorher abgeleiteten Anforderungen und der durchgeführten Leistungsbewertungen. Mit Hilfe des realisierten Simulationsbaukastens werden in Kapitel 5 Optimierungsstrategien systematisch und strukturiert entwickelt. Der entwickelte Simulationsbaukasten und die Optimierungsstrategien werden in Kapitel 6 anhand realer Anwendungsbeispiele auf der Basis der entwickelten Konzepte und Leitlinien praxisnah erprobt und bewertet und ihre Funktionsfähigkeit nachgewiesen.

2 Ausgangssituation

2.1 Begriffe und Definitionen

Elektronische Schaltkreise werden in einer **Halbleiterfertigung** auf **Siliziumscheiben** (engl.: wafer) und in einer **Flachbildschirmfertigung** auf **Glassubstraten** hergestellt. Dabei wird zwischen den Bereichen **Substratfertigung** (engl.: front end) und **Montage** (engl.: back end) unterschieden. In der Substratfertigung werden eine Kombination von **Prozessverfahren** zur Struktur-erzeugung, Strukturübertragung, Schichtherstellung und Schichtmodifikation angewandt /Zant 2000, Hilleringmann 1999/. Die Herstellung der elektronischen Schaltkreise erfolgt auf der Basis sich zyklisch wiederholender **Prozessschritte**, welche wiederum einer bestimmten **Technologie** zugeordnet sind /Ruge 1984/. Diese Technologie beschreibt die Arbeitsvorgänge, die zur Herstellung funktionsfähiger Schaltkreise notwendig sind /Frauenhoffer 2002/.

Durchgeführt werden die Prozessschritte auf speziellen **Prozessgeräten**, die ein oder mehrere Substrate gleichzeitig bearbeiten können. Die Spanne der Bearbeitungszeiten reicht je nach Prozessschritt von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden. Zur Kontrolle der durchgeführten Prozessschritte werden spezielle **Test- und Messgeräte** eingesetzt. Aufgestellt werden alle **Fertigungsgeräte** in unterschiedlichen **Fertigungsbereichen**, die in Abhängigkeit von der eingesetzten Prozesstechnologie als **Reinräume** mit verschiedenen, voneinander hermetisch getrennten **Kontaminationszonen** ausgeführt sind /EN ISO 1999, Schließer 1998/.

Die Substrate werden entweder in offenen **Kassetten** (engl.: carrier) oder in verschlossenen **Transportbehältern** (engl.: box) mit einer eigenen Reinraumatmosphäre /Dorner 1999/ von einem Fertigungsgerät zum nächsten transportiert. Die Durchführung der Transporte erfolgt **bereichsübergreifend** (engl.: interbay) und **bereichsintern** (engl.: intrabay) /Inoue 2002, Foster 2001/. In einer Kassette oder einem Transportbehälter befindet sich jeweils ein **Fertigungslos**, das eine Kapazität von in der Regel bis zu 25 Substratscheiben aufweist und bei Glassubstraten der Generation 6 mit Abmessungen von 1,5m x 1,8m teilweise über 50kg wiegt /TIN 2003a/. Dabei werden **Siliziumsubstrate** meist in geschlossenen Transportbehältern und **Glassubstrate** in offenen Kassetten aufbewahrt.

Der **Materialfluss** umfasst die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten, sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Zum ihm gehören **alle Formen des Durchlaufes** von Arbeitsgegenständen durch ein **System**, welches einen abgegrenzten Bereich zwischen **Eingang (Input)** und **Ausgang (Output)** repräsentiert /VDI 1970/. Der Materialfluss beinhaltet die Teilfunktionen Bearbeiten, Prüfen, Aufenthalt, Fördern, Lagern (Speichern) und Handhaben /VDI 1990, VDI 1970, VDI 1974/.

Die **Materialflussabläufe** in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung sind aufgrund der vielen Lose mit häufig unterschiedlichen Technologien und der sich stets wechselnden **Prozessablauffolgen** sehr komplex und dynamisch /Sturm 2003, Bader 1993a/. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die verschiedenen Kapazitäten der Fertigungsgeräte und die stark differierenden Bearbeitungszeiten. Für den **Transport** der Substrate müssen unterschiedliche **Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge** von einem Fertigungsgerät zum nächsten häufig noch **manuell** durchgeführt werden /TIN 2003/.

Für die **Automatisierung der Materialflusssysteme** werden spezielle **Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme** eingesetzt, welche die gestellten Reinheitsanforderungen bis zur Luftreinheitsklasse 1 erfüllen /TIN 2003/. Zur Durchführung der Transportvorgänge existieren **reinraumtaugliche, deckengebundene Rollenbahn- und Einschienen-Hängebahnsysteme** sowie **bodengebundene Fahrerlose Transportsysteme (FTS)** /TIN 2003a, Bader 1997, Weiss 1997/. Für die **Lagerung** und **Handhabung** einzelner Substrate sowie der Kassetten und Transportbehälter werden ebenfalls spezielle **reinraumtaugliche Speicher-, Handhabungs- und Robotersysteme** eingesetzt /TIN 2003, Bader 1997/. Die Materialflussteuerung (engl.: MCS - Material Control System) steuert und überwacht die Materialflussabläufe und koordiniert als übergeordnete Instanz die Steuerungen der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme /SEMI 2000, Bader 1997/.

Für die Durchführung der Materialtransporte sind sehr viele Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge notwendig. Entscheidend für die Planung und Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme ist deshalb die **Auswahl eines wirtschaftlichen Automatisierungskonzeptes** /ITRS 2003a, Bonora 2001, Bader 1998/. Die **Zielkriterien** bei der **Automatisierung der Materialflusssysteme** sind /ITRS 2003, Bigelow 2000, Plata 2000, Colvin 1999a/:

- Minimierung der Investitionskosten
- Steigerung des Substratdurchsatzes
- Reduzierung der Durchlaufzeiten
- Erhöhung der Auslastung der Fertigungsgeräte
- Verringerung des Umlaufbestandes (engl.: WIP - Work In Process)
- Minimierung von partikulär bedingtem Ausschuß

2.2 Fertigung von Halbleitern und Flachbildschirmen

Die Fertigung halbleiterspezifischer Schaltkreise basiert auf mehreren Grundprozessen bzw. Technologien, wie z.B. den Technologien CMOS (engl.: Complementary Metal Oxide Semiconductor) und BiCMOS (engl.: Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor). Die am häufigsten hergestellten Strukturbreiten in Deutschland betragen etwa 0,12 bis 2,0 μm /Schumacher 2002/. Die Fertigung der Schaltkreise basiert auf den grundlegenden Prozesstechnologien Schichtabscheidung (z.B. chemisch, physikalisch), Strukturübertragung (z.B. Photolithographie) und Schichtabtragung (z.B. Ätzen, Polieren) /Kästner 1980, Steinberger 1985/. Durch Dotierung mit Fremdatomen (z.B. Diffusion, Implantation) können zusätzlich bestimmte elektrische Eigenschaften erzielt werden /Ammon 1989/.

Diese Prozesstechnologien werden zur Herstellung einer Maskenebene benötigt /Hilleringmann 1999/. Sie werden mit Variationen sehr häufig wiederholt, da zur Herstellung der Schaltkreise bis zu 20 (CMOS) oder 30 Maskenschritte (BiCMOS) notwendig sind. Je nach Komplexität der Schaltkreise und den eingesetzten Fertigungsgeräten werden bis zu 900 verschiedene Einzelschritte durchgeführt /Colvin 1999, Treiber 1999/. Entsprechend oft muss ein Produkt bis zur Fertigstellung die einzelnen Fertigungsbereiche durchlaufen.

Die derzeit eingesetzten Substratgrößen der Siliziumscheiben bei der Fertigung von Speicherbausteinen und Mikroprozessoren betragen bis zu 300mm im Durchmesser. Die Fertigung von Flachbildschirmen basiert auf denselben Prozesstechnologien, die auch für die Herstellung von halbleiterspezifischen Schaltkreisen angewandt werden /TIN 2003a, Lemme 1995/. Wesentliche Unterschiede sind die geringere Anzahl an Masken- und Prozessschritten, größere Strukturbreiten, keine Dotierung mit Fremdatomen und die Verwendung von Glassubstraten /TIN 2003a/.

In *Bild 1* sind die prozentualen Anteile einzelner Prozessschritte in Bezug zur Anzahl an Gesamtprozessschritten und zur Gesamtbearbeitungszeit am Beispiel einer typischen Halbleiterfertigung für 256 MByte Speicherbausteine dargestellt. Die Graphik zeigt, dass in der Diffusion nur wenige Prozessschritte durchgeführt werden, die jedoch einen sehr hohen Anteil an der Gesamtbearbeitungszeit ausmachen. Umgekehrt entfallen sehr viele Prozessschritte auf Mess- und Nassätzvorgänge, die einen weit geringeren Anteil an der Gesamtbearbeitungszeit ausmachen.

Die Prozessschritte müssen in den einzelnen Fertigungsbereichen zur Vermeidung von Kontaminationen auf den Substraten unter hochreinen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden /EN ISO 1999/. Zusätzlich zu den normalen Fertigungslosen befinden sich in einer Halbleiterfertigung Test-, Nacharbeits- und Entwicklungslose /ITRS 2003a, Atherton 1996/. Dabei werden Testlose zur Überprüfung einzelner Prozessschritte eingesetzt, während Nacharbeitslose eine Reihe von Prozessschritten aus Qualitätsgründen wiederholen müssen und dann im Rahmen des Gesamtprozesses weiterbearbeitet werden. Entwicklungslose werden für die Erprobung neuer Prozesstechnologien und für die Qualifizierung bestehender Prozesse benötigt.

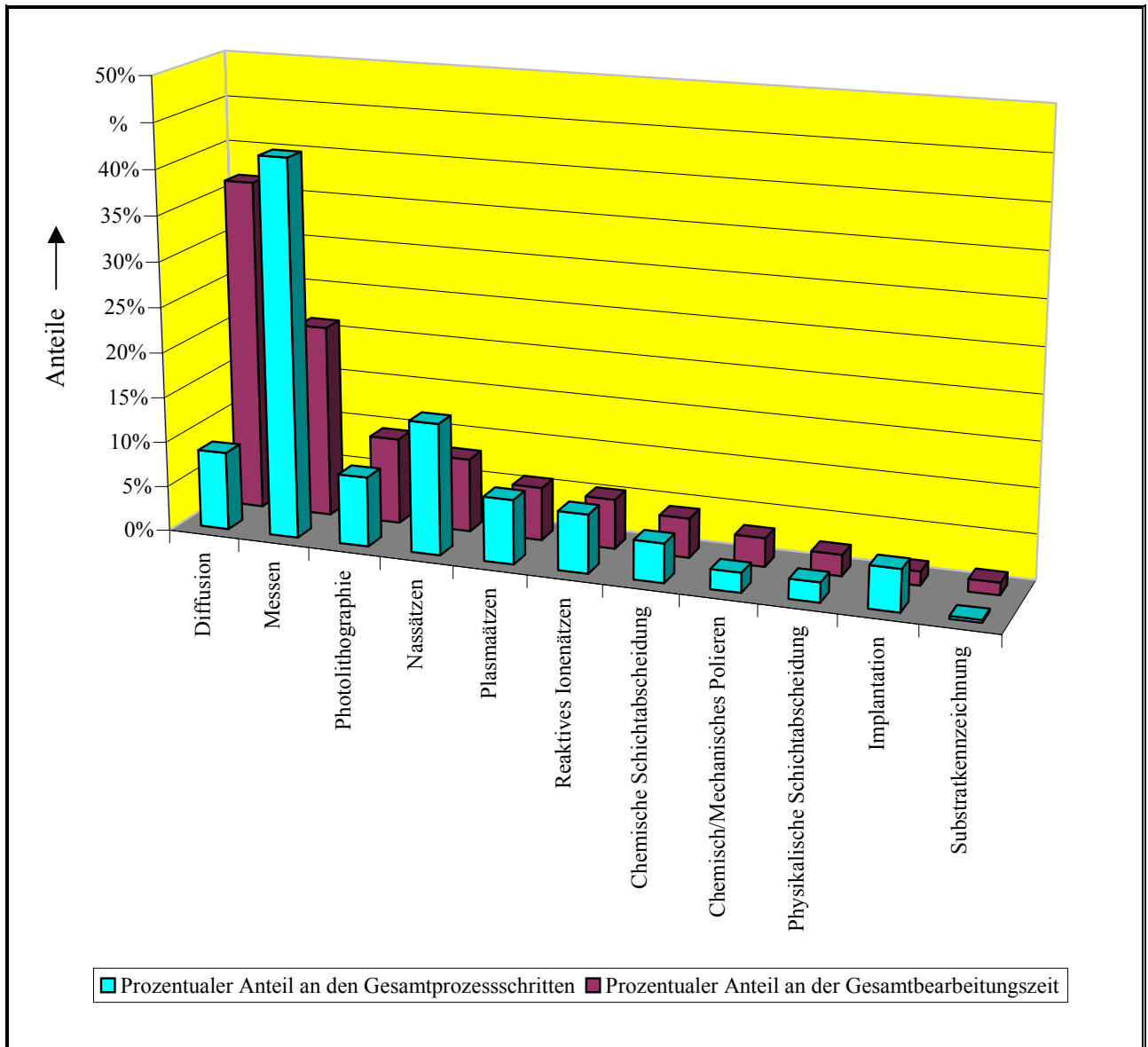


Bild 1: Prozentuale Anteile einzelner Prozessschritte in Bezug zur Anzahl an Gesamtprozessschritten und zur Gesamtbearbeitungszeit

2.3 Fertigungsgeräte

Für die Durchführung der Bearbeitungs- und Messprozesse in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung werden automatisierte Fertigungsgeräte mit standardisierten Übergabeschnittstellen eingesetzt (Bild 2) /Binder 1999, Schließer 1998/. Diese standardisierten Schnittstellen zur Mechanik (engl.: SMIF - Standard Mechanical InterFace) und Datentechnik (engl.: SECS II - SEMI Equipment Communications Standard) / SEMI 2004, SEMI 2002/ ermöglichen einen standardisierten Transfer der Substratscheiben zwischen Transportbehältnis und Fertigungsgerät sowie die Integration der Fertigungsgeräte in eine automatisierte Fertigungssteuerungsumgebung.

In diesen Fertigungsgeräten sind häufig mehrere autarke Gerätesysteme zusammengefasst und miteinander verkettet (engl.: cluster), die von der Prozessablauffolge, der Logistik und von den Umgebungsbedingungen her in enger Verbindung stehen /TIN 2003b, Bader 1993/. Diese multifunktionalen Fertigungsgeräte bewirken neben einer Reduzierung der Handhabungsvorgänge eine Verkürzung der Fertigungszeit und eine Minimierung der Partikelbelastung, wobei mit der Zunahme der Funktionalität auch die Störanfälligkeit steigt /TIN 2003b/.

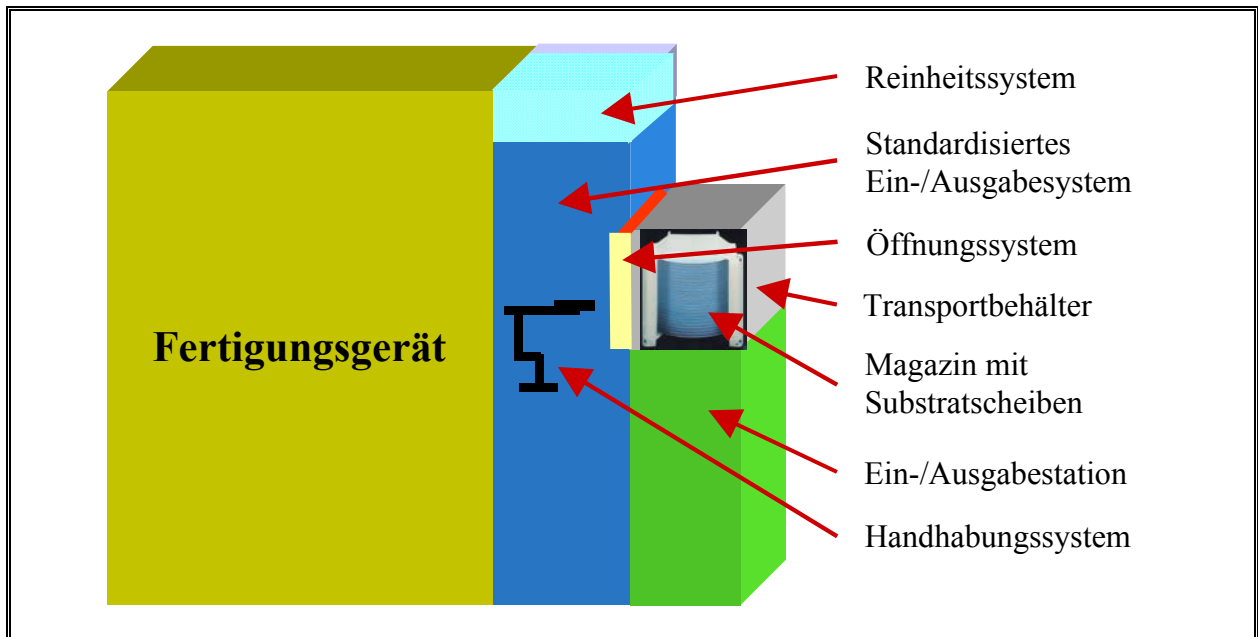


Bild 2: Fertigungsgerät mit einem standardisiertem Ein-/Ausgabesystem (FOUP-Standard)

Zum Be- und Entladen besitzen die Fertigungsgeräte ein oder mehrere Ein-/Ausgabestationen, die in der Regel dem SMIF- oder FOUP-Standard (engl.: FOUP - Front Opening Unified Pod) entsprechen /SEMI 2003, Bonora 2001, Schließer 1998/. Dabei werden die Substrate von einem automatisierten und standardisierten Ein-/Ausgabesystem aus einem Transportbehälter mit einer lokalen Reinraumumgebung entnommen und in das Fertigungsgerät gehandhabt /Bader 1999a/. Die Zwischenlagerung der leeren Transportbehältnisse erfolgt an den Fertigungsgeräten oder einem zugehörigen Gerätespeicher.

Zur Fertigung von Halbleitern und Flachbildschirmen sind je nach Fertigungsgröße und den eingesetzten Fertigungsgeräten ca. 120 bis 600 Fertigungsgeräte aufgrund von notwendigen Redundanzen in einer reinen Fertigungsumgebung installiert /Westkämper 2002b, Frauenhoffer 2002/. Die Investitionskosten für die Fertigungsgeräte liegen im Bereich von 0,5 bis 5 Mio. EURO pro installiertem Gerät /Frauenhoffer 2002/. Sie verursachen damit bis zu 70% der Gesamtinvestitionskosten für eine Halbleiter- oder Flachbildschirmfertigung, die zwischen 0,3 Mrd. EURO für kleine Fertigungen und über 3 Mrd. EURO für große Massenfertigungen liegen /ITRS 2003a, Wright 2000, Arnold 2000/. Um die hohen Investitionskosten zu amortisieren und Verluste beim Wiederanlauf der Fertigungsgeräte zu vermeiden, findet ein ununterbrochener Produktionsbetrieb an sieben Tagen pro Woche statt.

Die Prozesszeiten und Kapazitäten der Fertigungsgeräte sind in Abhängigkeit von der durchzuführenden Prozesstechnologie stark unterschiedlich. So variieren die Prozesszeiten je Los von mehreren Minuten für spezielle Messvorgänge bis zu 16 Stunden für Diffusionsprozesse. Die Prozesskapazität setzt sich aus einer oder mehreren Prozessressourcen zusammen, wie z.B. Kammern, Becken oder Rohren, in denen die Prozessierung der Substrate durchgeführt wird. Ist die Kapazität einer Prozessressource größer als ein Los, wird die Ressource mit mehreren Losen gleichzeitig im Block beladen, die in der Regel der gleichen Prozesstechnologie angehören und sich im selben Bearbeitungsfortschritt befinden /Herzog 1997/.

Die Prozesskapazität eines Fertigungsgerätes kann 32 Lose und mehr betragen, die in mehreren Prozessressourcen parallel bearbeitet werden. Zur Vermeidung von Substratdefekten und Nacharbeitsvorgängen müssen teilweise zwischen einzelnen Prozessschritten, die auf unterschiedlichen Fertigungsgeräten durchgeführt werden (z.B. Diffusionsprozess nach einem Reinigungsprozess), definierte maximale Liegezeiten eingehalten werden. /ITRS 2003a, Atherton 1996, Bader 1993a/.

2.4 Fertigungslayout

Für die Anordnung der Fertigungsgeräte und die Gestaltung des Fertigungslayouts in einer Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung gibt es prinzipiell die nachfolgend aufgeführten Möglichkeiten (Bild 3) /Csatory 1997, Atherton 1996/.

- **Layoutvariante 1: Anordnung der Fertigungsgeräte in einem Flächenreinraum (engl.: ballroom)**

Bei diesem Fertigungslayout werden die Fertigungsgeräte in großflächigen Reinräumen mit einer turbulenzarmen Verdrängungsströmung aufgestellt /EN ISO 1999, Schließer 1998/. Der Aufstellungsort der Fertigungsgeräte ist im Raum frei wählbar, die Geräte sind frei zugänglich /Plata 2002/.

- **Layoutvariante 2: Anordnung der Fertigungsgeräte in einem Tunnelreinraum (engl.: farm-layout)**

Die hochreinen Fertigungsbereiche mit einer ebenfalls turbulenzarmen Verdrängungsströmung reduzieren sich aus Kostengründen auf die Umgebung der Fertigungsgeräte. Sie sind entlang eines bereichsübergreifenden Zentralkorridors angeordnet und durch diesen miteinander verbunden. Die Fertigungsgeräte werden in den hochreinen Bereichen nebeneinander aufgestellt. Die Installation der Geräte erfolgt zum Teil durch die Tunnelseitenwand, um die kontaminationskritischen Bereiche der Fertigungsgeräte mechanisch und strömungstechnisch vom Reinraumbereich zu trennen. Innerhalb eines Fertigungsbereiches befinden sich in der Regel Fertigungsgeräte einer Prozesstechnologie /Plata 2002/. Zur Sicherstellung der notwendigen Bearbeitungskapazitäten und zum Ausgleich von Kapazitätsschwankungen sind häufig mehrere redundante Fertigungsbereiche mit derselben Prozesstechnologie vorhanden, wie z.B. bei den Fertigungsbereichen für Photolithographie und Diffusion.

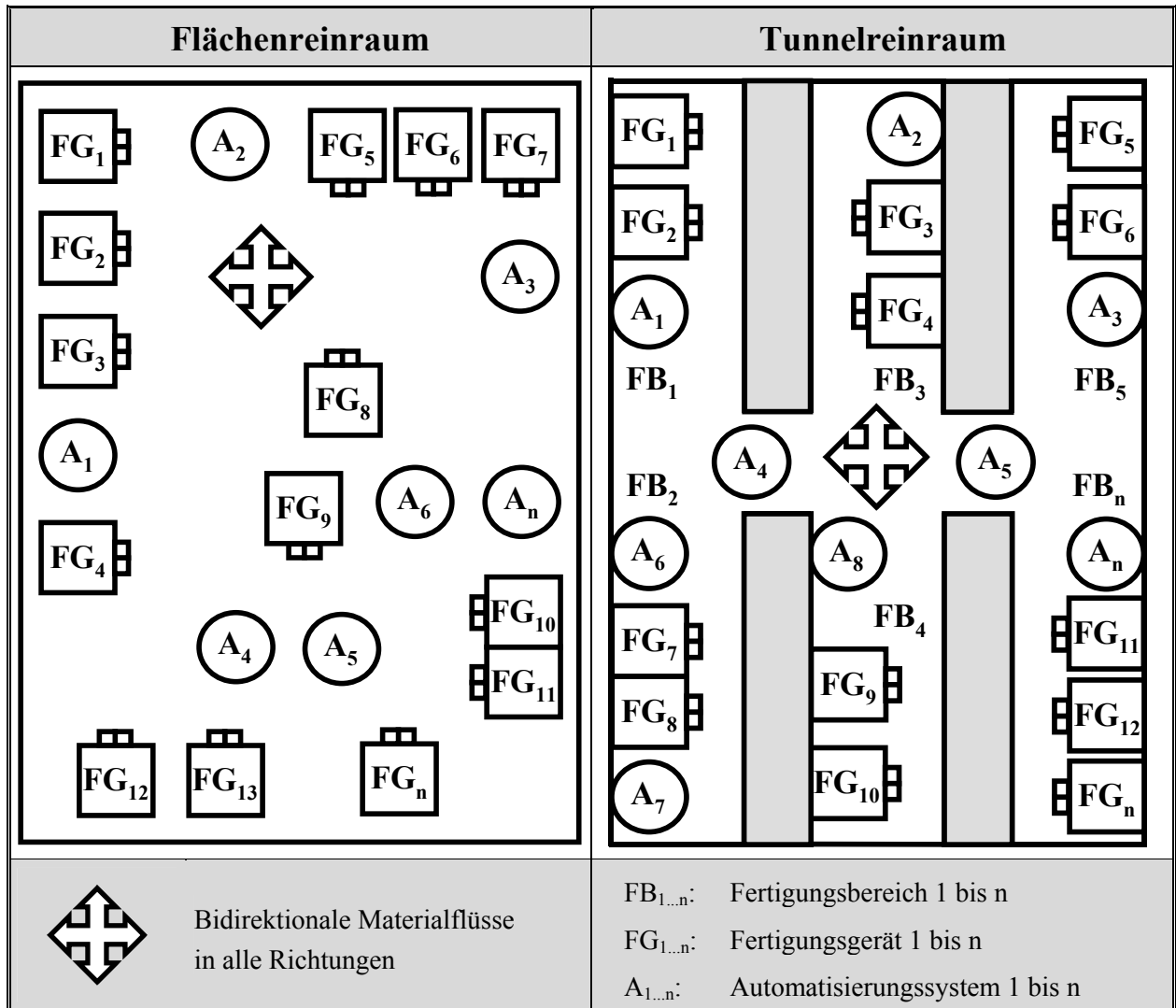


Bild 3: Fertigungslayoutvarianten in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung

- Layoutvariante 3: Komprimierte Anordnung der Fertigungsgeräte in einem Tunnelreinraum (engl.: compressed farm-layout)**

Die Anordnung und Aufstellung der Fertigungsgeräte in der komprimierten Variante erfolgt analog zur Layoutvariante 2. Im Unterschied zu dieser Variante werden jedoch unterschiedliche Fertigungsgerätetypen in einem Fertigungsbereich eingesetzt, um eine Reduzierung der Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge zu erzielen (z.B. Messgeräte in der Photolithographie oder Reinigungsanlagen im Diffusionsbereich). Häufig eingesetzte Fertigungsgeräte, wie z.B. Prüfgeräte, können zusätzlich entlang des Zentralkorridors angeordnet werden.

- Layoutvariante 4: Sequentielle Anordnung mehrerer Reindräume hintereinander (engl.: hybrid workcell-layout)**

Bei dieser Layoutvariante werden mehrere Flächenreindräume oder Tunnelreindräume hinter- oder nebeneinander angeordnet und über Schleusensysteme miteinander verbunden (Bild 4) /Jansen 2001/.

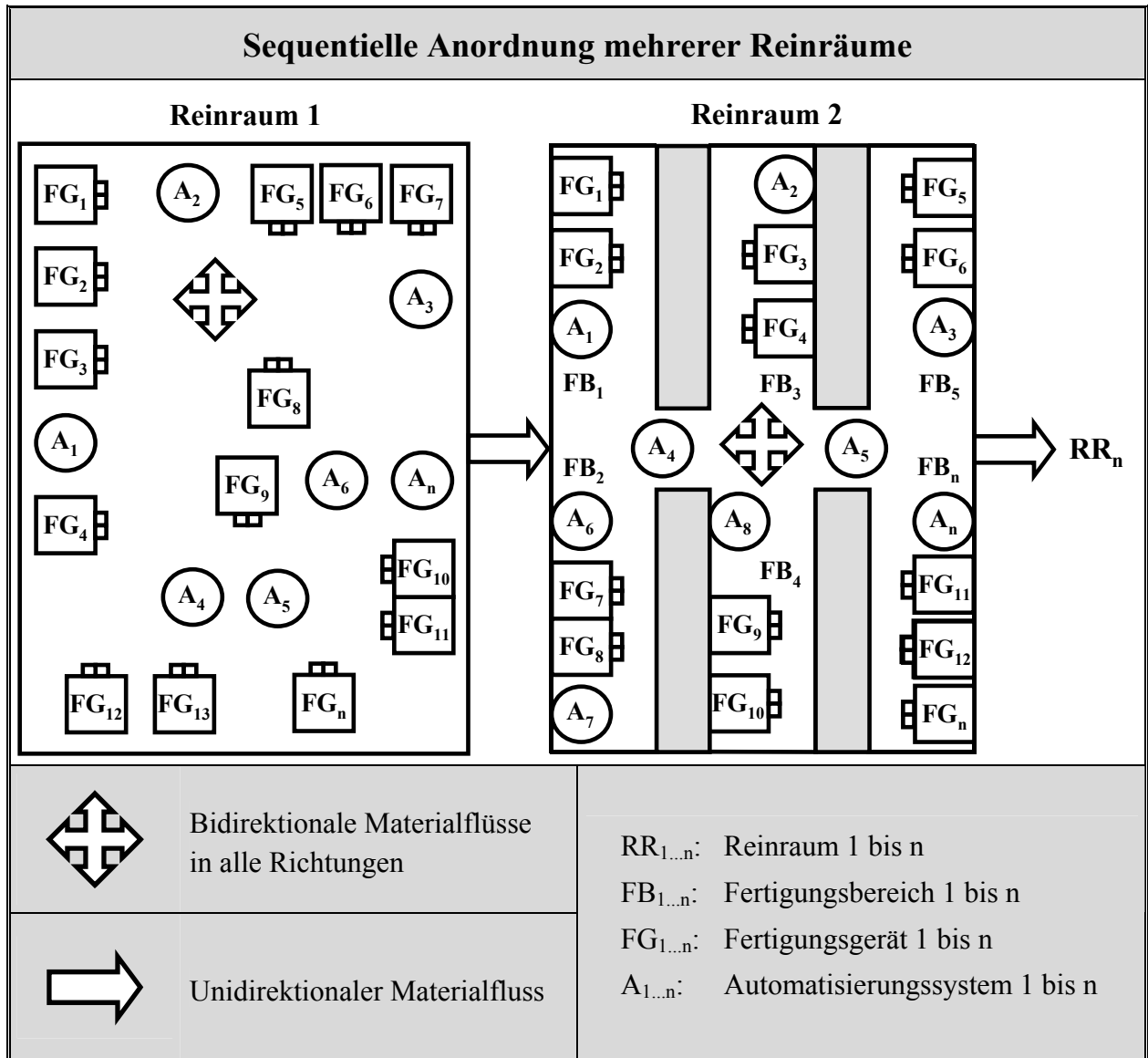


Bild 4: Sequentielle Anordnung mehrerer Reinnräume hintereinander

Die Anordnung und Aufstellung der Fertigungsgeräte entspricht den vorher beschriebenen Layoutvarianten. In jedem Reinraum können alle notwendigen Fertigungsgeräte installiert sein, um eine bestimmte Anzahl an Maskenebenen herzustellen (z.B. Ebene 1-5). Anschließend werden die Substrate zur Fertigung weiterer Maskenebenen in den nächsten Reinraum transportiert.

2.5 Systeme zur Automatisierung der Materialflussabläufe

Die Automatisierung der Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ist mit sehr hohen Investitionskosten von teilweise über 50 Mio. EURO verbunden und stellt große Anforderungen an die Planung und Auslegung der Automatisierungssysteme /ITRS 2003, TIN 2003, Colvin 1999/. Für jede Automatisierungslösung wird ein auf die speziellen Anforderungen des Kunden zugeschnittenes Materialflusskonzept benötigt. Dieses Konzept muss die wirtschaft-

liche Planung, Auslegung und Optimierung der automatisierten Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme berücksichtigen /Inoue 2002a/.

Für den automatisierten Materialtransport zwischen bzw. innerhalb der einzelnen Fertigungsbe-
reiche werden folgende Transportsysteme eingesetzt, welche die Anforderungen an eine hochrei-
ne Produktionsumgebung erfüllen müssen /TIN 2003, Bader 1997, Weiss 1997, Jünemann 1989/.

- Deckengebundene, schienengeführte Elektrohängebahnen mit oder ohne automatische Bela-
deeinrichtung /VDI 1987/
- Deckengebundene Rollenbahnsysteme /VDI 1971/
- Bodengebundene, frei fahrende oder schienengeführte Fahrerlose Transportsysteme (FTS)
/Schmidt 1989/

Schienengeführte Elektrohängebahnen werden überflur an der Decke hängend eingesetzt und
transportieren unidirektional, hintereinander im Kreis fahrend, einen Transportbehälter pro Fahr-
zeug entlang eines vorgegebenen Transportweges (*Bild 5*). Schienengeführte Elektrohängebah-
nen **mit einer automatischen Beladeeinrichtung** (engl.: hoist system) können die Substrate di-
rekt mit einer **integrierten Vertikalhebeeinheit** an den Ein-/Ausgabestationen der Fertigungsge-
räte und Speichersysteme absetzen /TIN 2003, Weiss 1997/.

Elektrohängebahnsysteme **ohne automatische Beladeeinrichtung** (engl.: monorail system) wer-
den an den Fertigungsgeräten mit Hilfe eines **stationären Liftsystems** und an den Speichersys-
temen durch das **speicherintegrierte Handhabungssystem** bzw. durch den Einsatz eines **zusätz-
lichen stationären Handhabungssystems an der Ein-/Ausgabestation** be- und entladen /Bader
1996, Schmutz 1991/.

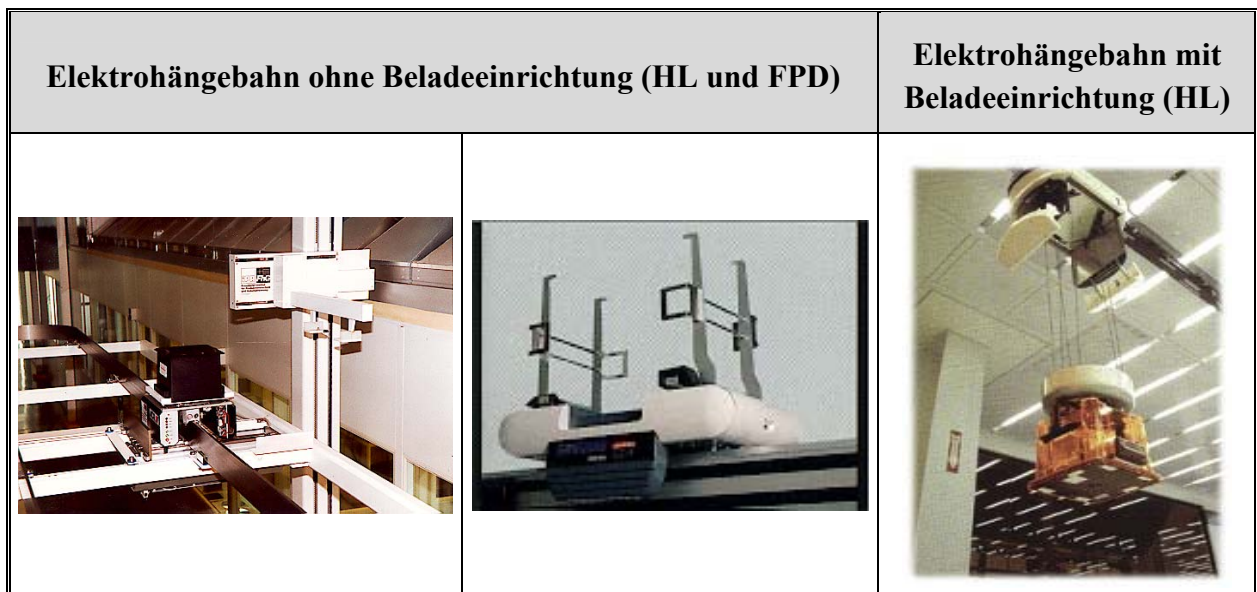


Bild 5: Deckengebundene, schienengeführte Elektrohängebahnen mit und ohne integrierte automatische Beladeeinrichtung für Halbleiter (HL) und Flachbildschirme (engl.: FPD - Flat Panel Display; Quellen: Fraunhofer IPA, Fa. Daifuku und Fa. Murata)

Rollenbahnsysteme (engl.: conveyor system) arbeiten Überflur an der Decke hängend nach dem Fließbandprinzip (*Bild 6*) /Feindel 2000/.

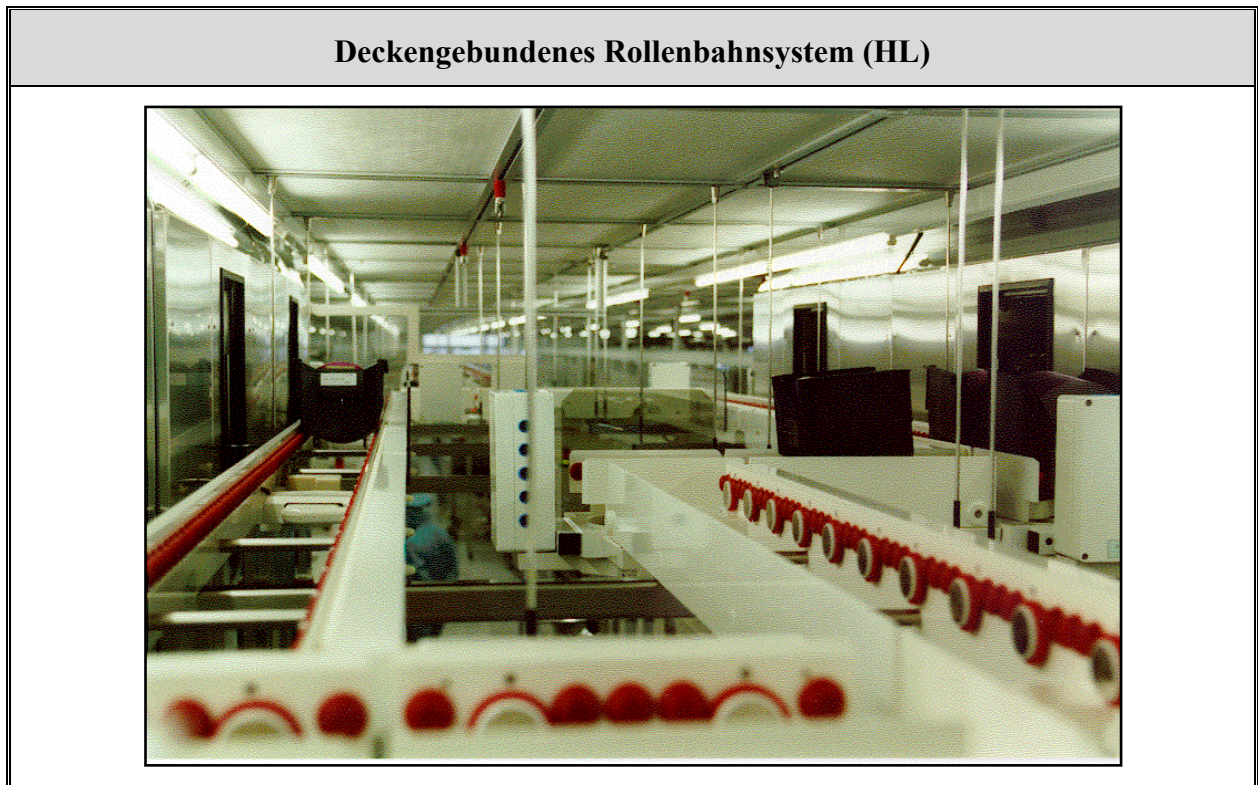


Bild 6: Deckengebundenes Rollenbahnsystem für die Halbleiterfertigung (Quelle: Fa. Infineon)

Bei dieser Transportlösung werden die Transportkassetten und Transportbehältnisse auf einem Rollenbahnsystem durch elektrisch angetriebene Transportrollen auf den Förderstrecken unidirektional hintereinander befördert, wobei die Transportkapazität der Förderstrecken von der Länge der Rollenbahn abhängig ist /Heinrich 1999/. Das Be- und Entladen der Rollenbahnsysteme erfolgt wie bei den Elektrohängebahnsystemen ohne automatische Beladeeinrichtung ebenfalls mit Hilfe eines stationären Liftsystems oder durch ein Handhabungssystem des Speichers.

Automatische Fahrerlose Transportsysteme sind mobile Roboter, die vollautomatisch ohne mechanische Führung auf dem Boden entlang eines vorgegebenen Transportweges verfahren und abhängig von der Substratgröße eine oder mehrere Kassetten oder Behältnisse transportieren (*Bild 7*). Das Be- und Entladen der Fahrzeuge erfolgt durch ein vollautomatisches Handhabungssystem, welches in das Transportfahrzeug integriert ist /TIN 2003, Ward 1997, VDI 1992/.

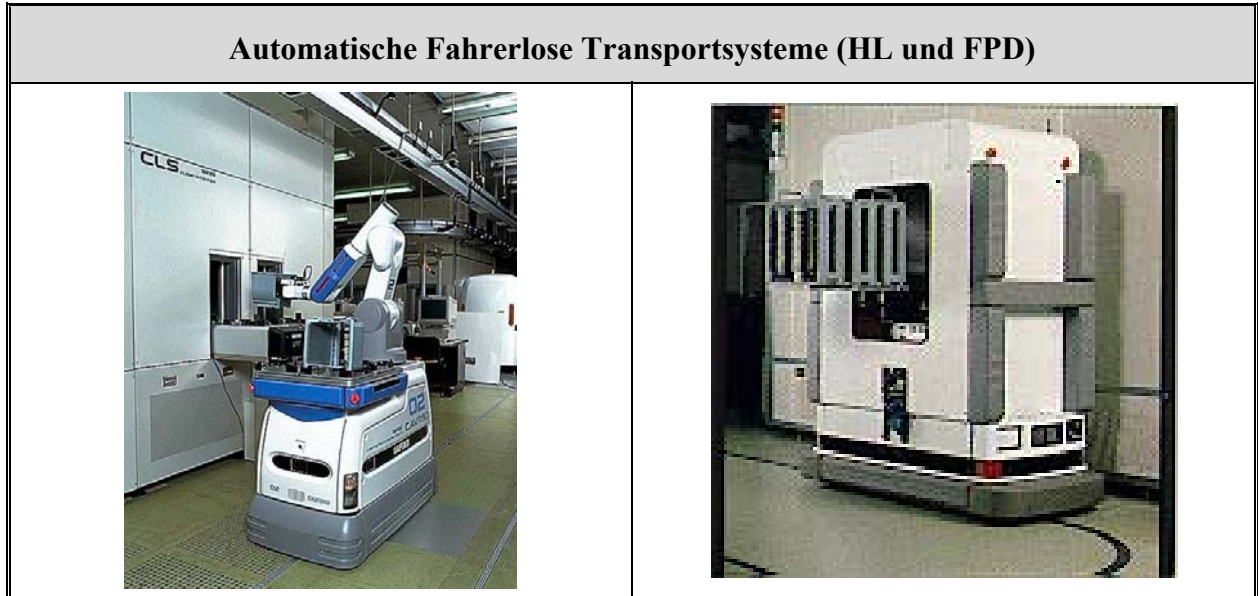


Bild 7: Automatische Fahrerlose Transportsysteme mit einem integrierten Handhabungssystem für die Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung (Quelle: Fa. Daifuku)

Schiengeführte Fahrerlose Transportsysteme entsprechen in ihrem Aufbau den automatischen Fahrerlosen Transportsystemen und verfügen ebenfalls über ein integriertes Handhabungssystem (*Bild 8*). Sie werden mechanisch auf einer im Boden verlegten Schiene geführt und mit Energie versorgt /VDI 1985/.

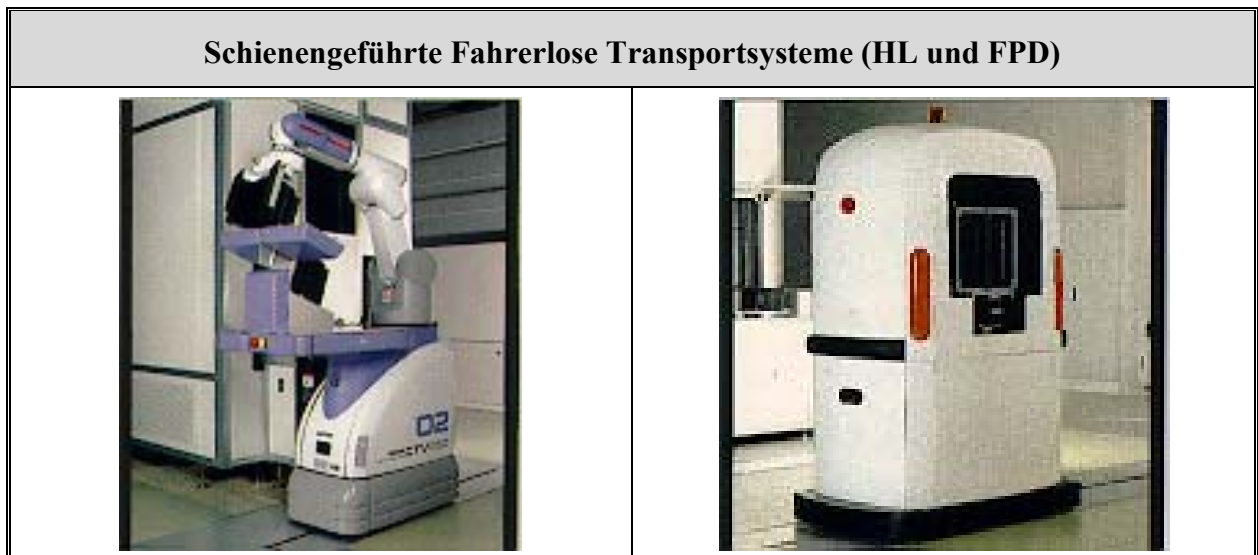


Bild 8: Schiengeführte Fahrerlose Transportsysteme mit einem integrierten Handhabungssystem für die Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung (Quelle: Fa. Daifuku)

Innerhalb eines **automatischen Speichersystems** werden die Transportkassetten und Behältnisse in einer reinen Produktumgebung zwischen den einzelnen Fertigungsschritten in Regalfächern zwischengelagert (*Bild 9*) /Bader 1997/. Die Hauptaufgabe der Speichersysteme ist der Ausgleich von Kapazitätsschwankungen im Produktionsprozess durch die zeitliche Entkopplung von Fertigungsgeräten mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten und Bearbeitungskapazitäten /Gudehus

2000a/. Ebenso können auch Schwankungen im Materialfluss aufgrund von Störungsausfällen und Wartungsarbeiten bei den Fertigungsgeräten und Automatisierungssystemen ausgeglichen und unterschiedliche Transportsysteme miteinander vernetzt werden /Foster 2001/.

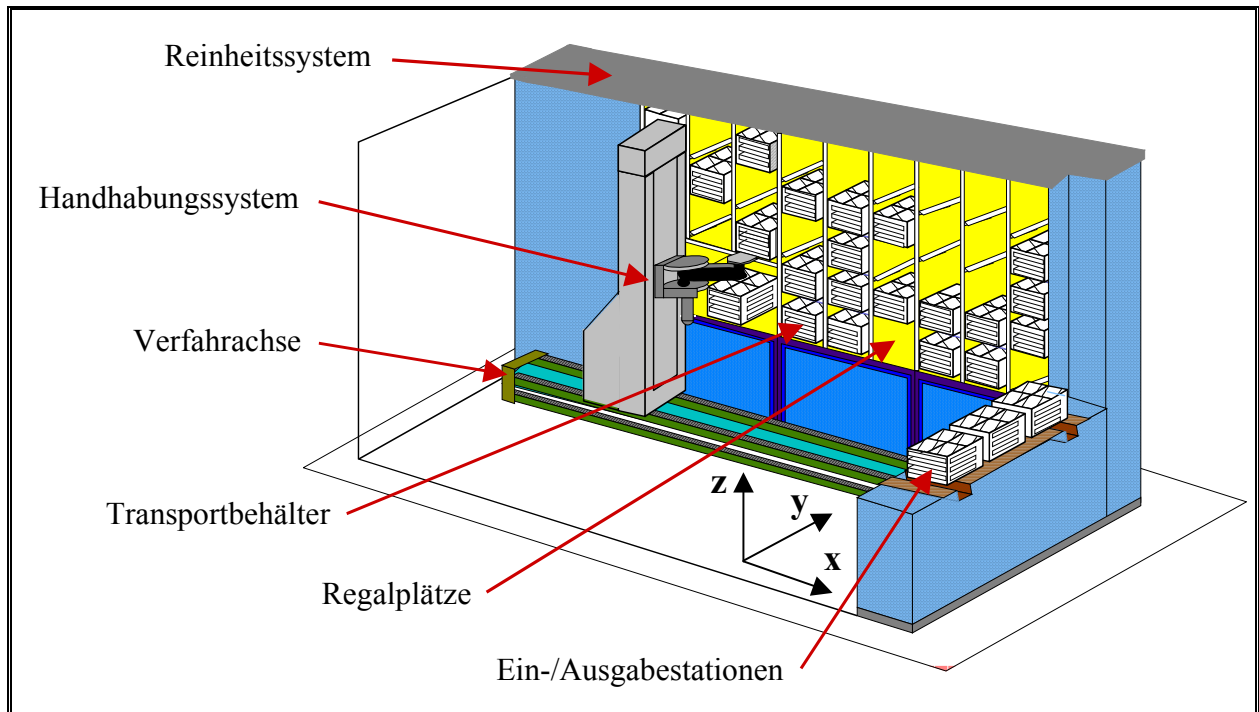


Bild 9: Automatisches Speichersystem mit einem integrierten Handhabungssystem

Die Ein- und Auslagerung der Transportkassetten und Behältnisse in die einzelnen Regalplätze wird durch ein in das Speichersystem integriertes, automatisches Handhabungssystem durchgeführt /SEMI 2004a/. Die Kapazität eines großen Speichersystems kann mehr als 250 Speicherplätze betragen /Bonora 2001/. Zur Ein- und Ausgabe der Substrate besitzen die Speichersysteme häufig mehrere automatisiert und manuell bedienbare Ein-/Ausgabestationen /TIN 2003/.

2.6 Lösungsverfahren und Softwaresysteme zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

In der Literatur existieren verschiedene Lösungsverfahren, welche für die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme eingesetzt werden können /Gudehus 2000, Gudehus 2000a, VDI 1997/. Die zur Lösung der vorgegebenen Aufgabenstellung anwendbaren Verfahren und Softwaresysteme sind in *Bild 10* dargestellt. Der Einsatz eines bestimmten Verfahrens oder Softwaresystems hängt von den Anforderungen an die zu lösende Aufgabenstellung ab. Allen Lösungsverfahren gemeinsam ist die Abbildung der Realität durch ein Modell /Müller-Merbach 1971/. Diese Modelle sind eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder in der Realität existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Dabei stellt das Simulationsmodell ein reales Modell dar, das aus einem gedanklichen Modell entsteht und mit dem Experimente durchgeführt werden können /VDI 1996/.

Allgemein können mit mathematischen Beschreibungsfunktionen auch sehr komplexe technische Problemstellungen gelöst werden. Sie berücksichtigen eine umfangreiche Menge an Daten und können somit auch mehrere miteinander konkurrierende Zielsetzungen optimieren /Müller-Merbach 1971/.

Die Planung und Auslegung automatisierter Speichersysteme kann außerdem mit den **stochastischen Verfahren** der Warteschlangen- und Bediensystemtheorie erfolgen /Bryda 1991, Kampe 1973/. Diese Verfahren sind sehr komplex in der Anwendung und im vorliegenden Einsatzfall sind aussagefähige Ergebnisse aufgrund der vielen Speichersysteme und der vielfältig ineinander verschachtelten Materialflüsse, die sich ständig wiederholen, nicht zu erzielen.

Für die Planung und Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme existieren eine Reihe von **analytischen Verfahren**, die teilweise auch als Softwaresysteme für den rechnergestützten Einsatz erhältlich sind /Fischer 2001, Gudehus 1992, Gudehus 1992a, Großeschallau 1984/. Diese Verfahren berücksichtigen keine dynamischen Zusammenhänge und werden in erster Linie für einfachere Systemlösungen angewandt /Cselenyi 1992/. Für die Auslegung automatisierter Speichersysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung gibt es bisher keine analytischen Verfahren, welche auf den speziellen Aufbau der Systeme abgestimmt sind, alle spezifischen Einflussgrößen berücksichtigen und zu aussagefähigen Ergebnissen führen.

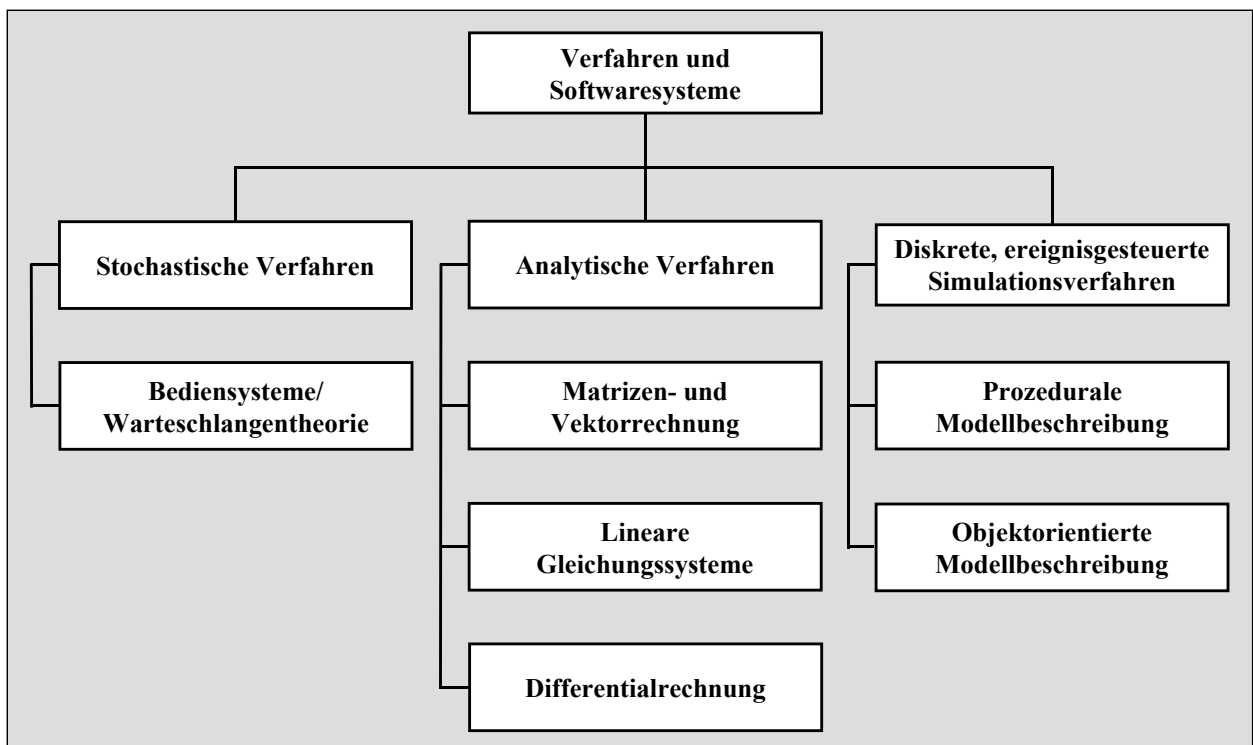


Bild 10: Lösungsverfahren und Softwaresysteme zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

Alle auf mathematischen Zusammenhängen basierenden stochastischen und analytischen Lösungsverfahren berücksichtigen viele spezifische Einflussgrößen aus der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung nicht. Ebenso werden dynamische Einflussgrößen, wie z.B. Stauungen im Materialfluss oder Störungen an den Fertigungsgeräten und Automatisierungssystemen, bei großen Modellen nur unzureichend abgebildet. Stochastische und analytische Lösungsverfahren eignen sich bei komplexen Materialflussstrukturen, wie sie in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung vorherrschen, in erster Linie für eine analytische Grobabschätzung der Systemleistung, deren Ergebnisse dann als Eingangsgrößen für weiterführende Simulationsuntersuchungen dienen können.

Die **diskrete, ereignisorientierte Simulation** ist ein Verfahren, das für die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme sehr gute Ergebnisse liefert /Westkämper 2003, VDI 2000, Bader 1994, Becker 1991/. Die Simulation stellt dabei ein experimentelles Durchspielen von Modellen dar, bei dem durch die schrittweise Veränderung des Simulationsmodells eine Lösung gefunden wird. Der Modellzustand wird durch bestimmte Ereignisse sprunghaft zu diskreten Zeitpunkten ohne Zeitverbrauch verändert /VDI 2000/. Durch eine große Anzahl von Simulationsläufen mit unterschiedlich parametrisierten Modellen wird die Lösung ermittelt /Rode 1990/. Die in der Simulation benötigten Zufallsereignisse können durch die Anwendung der Monte-Carlo-Methode mit Hilfe von Zufallszahlen erzeugt werden /Müller-Merbach 1971/. Nachteilig beim Einsatz der Simulationstechnik sind der große Zeitbedarf und der hohe Aufwand bei der Modellbildung und Durchführung der Simulationsexperimente, da bei sehr komplexen Aufgabenstellungen einer genaueren Anpassung an die Realität eine Erhöhung der Komplexität des Lösungsverfahrens und der Planungskosten gegenübersteht /Campbell 2000, Bader 1999/.

Durch den Einsatz eines **Simulationsbaukastens**, der die notwendige Fertigungsumgebung und die technischen Systemlösungen in Modellform bereits enthält und die spezifischen Einflussgrößen berücksichtigt, werden der Modellaufbau und die Durchführung der Simulationsuntersuchungen vereinfacht und die Erzielung aussagefähiger Simulationsergebnisse wesentlich erleichtert /Wiechers 2003, Campbell 2000, Bader 1999, Bader 1999b/. Ein solcher Simulationsbaukasten, der für die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung eingesetzt werden kann, existiert derzeit nicht /ITRS 2003/.

Die Entwicklung des Simulationsbaukastens vereinfacht auch die Anwendung logistischer Kennlinien in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung. Logistische Kennlinien können die durch den Einsatz des Simulationsbaukastens erzielten Simulationsergebnisse nutzen, um quantitativ die funktionalen Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen zu beschreiben. Dadurch ist es möglich, Schwachstellen und logistische Engpässe im Materialfluss zu erkennen und Maßnahmen zur Beseitigung abzuleiten /Wiendahl 2003/.

Die Erstellung der Simulationsmodelle kann durch einen prozeduralen oder einen objektorientierten Ansatz erfolgen /VDI 2000/. Bei der Anwendung des **prozeduralen Modellierungsansatzes** werden die Materialflüsse durch eine Menge von Prozeduren und Anweisungen dargestellt, die

z.B. Anweisungen zu Prozessschritten, Bearbeitungszeiten und benötigten Fertigungsgeräten enthalten /Hughes 1991, Noche 1990/. Die in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung am häufigsten eingesetzten Softwaresysteme *AutoMod* und *AutoSched* der Firma *Brooks Automation Inc.* sind typische Vertreter des prozeduralen Modellierungsansatzes /Gupta 2003, Zoughby 2000/. Dabei wurde *AutoSched* als Aufsatz zu *AutoMod* entwickelt und eignet sich besonders für die Analyse und Kapazitätsplanung bei Fertigungsgeräten und zur längerfristigen Produktionsplanung. *AutoSched* ist speziell für die Anwendung in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung geeignet und bietet daher schon Standardfunktionalitäten für z.B. Blockbildungen, Wartungsarbeiten, Haupt- und Nebenzeitanteile bei den Fertigungsgeräten, etc.

Die Simulation von Transport-, Speicher- und Handhabungssystemen kann in *AutoSched* nur sehr schwer durchgeführt werden, da die Materialbewegungsintensitäten häufig nur in Form einer Transportmatrix abgebildet und die technischen Leistungsparameter der Automatisierungssysteme nur unzureichend berücksichtigt werden. Für die genaue Abbildung dieser Parameter ist die Verwendung von *AutoMod* notwendig, dessen Einsatz in Verbindung mit *AutoSched* jedoch problematisch ist, da die Simulation dann ein sehr starres System darstellt. Die besonders für den Vergleich verschiedener Automatisierungssysteme notwendige detaillierte Abbildung der Dispositionsstrategien und der Materialflusssteuerung ist nur mit erheblichem Programmieraufwand möglich, da dabei häufig Eingriffe in den Source-Code des Programms notwendig sind. Da die Materialflusssimulation bei komplexen Materialflussmodellen in der Regel auf den statischen Daten einer Transportmatrix aufbaut, die Mittelwerte über sehr lange Zeiträume darstellen, ist das wahre dynamische, durch Ausfälle und Stauungen geprägte Verhalten der Materialflusssysteme nur ungenau abbildbar /Wright 1999/.

Der Aufbau einer Simulation nur mit *AutoMod* gestaltet sich für den hier vorliegenden Anwendungsfall ebenfalls schwierig. In diesem Fall können Steuerungsstrategien zwar flexibler als in *AutoSched* programmiert und angewendet werden, aber hilfreiche *AutoSched*-Funktionalitäten, wie z.B. die Modellierung des Fertigungslayouts und der Fertigungsgeräte, sind dann in *AutoMod* nur eingeschränkt verfügbar. Dadurch können sehr lange und komplexe Prozessflüsse nur sehr kosten- und zeitaufwendig in der Simulation abgebildet werden, da für jeden Prozessschritt eine Prozedur programmiert werden muss. Weitere Funktionalitäten, wie Blockbildungen und definierte Liegezeiten, sind im Gegensatz zu *AutoSched* standardmäßig nicht verfügbar und müssen erst aufwendig für jedes Fertigungsgerät einzeln programmiert werden.

Der **objektorientierte Ansatz** zur Modellbildung verwendet Objektmodelle, um die Materialflüsse und die zugehörigen Einflussgrößen darzustellen. Die Objektmodelle bestehen aus Objektklassen mit einzelnen Objekten (Bausteinen), die einen zeitlich veränderbaren Zustand haben, und Modellelemente mit oder ohne eigene interne Ablauflogik darstellen können /Frauenhoffer 2002/. Als Oberklasse können sie aus mehreren Subklassen bestehen und an diese wesentliche Eigenschaften vererben, wodurch ein hierarchischer und strukturierter Aufbau der Simulationsmodelle machbar ist. Neben physischen Objekten, wie Fertigungsgeräten, Fertigungshilfsmitteln und Automatisierungssystemen, gibt es Informationsobjekte, wie Aufträge, Arbeitspläne und Steuerungsabläufe /VDI 2000/. Der objektorientierte Ansatz ermöglicht die zuverlässige Model-

lierung großer Materialflusssysteme und ist bei Änderungen einfach und flexibel an wechselnde Anforderungen anpassbar /Westkämper 2002a/.

Als Vertreter der objektorientierten Modellierung wird in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung das Simulationssystem *eM-Plant* der Firma *Tecnomatix* eingesetzt /Bader 1999/. Der hierarchische Aufbau der Simulationsmodelle ermöglicht eine enge Anlehnung an die tatsächlichen Informationsstrukturen der Fertigungs- und Materialflussteuerung. Die Automatisierungstechnik kann sehr detailliert und realitätsnah dargestellt werden, wie z.B. die Anzahl und Ausführung der Ein-/Ausgabestationen an den Speichersystemen und Fertigungsgeräten sowie die genaue Abbildung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme mit allen technischen Leistungsmerkmalen. Zudem lassen sich beliebige Steuerungsstrategien zur Optimierung der Materialflussabläufe ins Simulationsmodell einfügen.

Die Möglichkeit zur Vererbung bestimmter Eigenschaften bei einem objektorientierten Baustein-konzept erlaubt die Verwendung von vorgefertigten Bausteinen mit speziellen Eigenschaften, die im Bereich der Fertigungstechnik teilweise schon vorhanden sind. Layout- und Prozessablaufänderungen können so leichter eingefügt werden. Zu jedem beliebigen Simulationszeitpunkt besteht die Möglichkeit des Eingriffs in den Ablauf (z.B. Momentaufnahmen) und es existieren eine Vielzahl an Schnittstellen zur Datenübernahme und Datenübergabe mit externen Softwaresystemen, wie z.B. dem Produktionsplanungs- oder Fertigungssteuerungssystem. Zusätzlich gibt es viele integrierte, statistische Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten, die anwendungsspezifisch angepasst werden können. Objektorientierte Simulationssysteme bieten nahezu uneingeschränkte Detaillierungsmöglichkeiten, wobei der Grad der Detaillierung Auswirkungen auf den Aufwand und die Zeitdauer für die Erstellung der Simulationsmodelle und die Durchführung der Simulationsuntersuchungen hat /VDI 2000/.

3 Analyse der Einflüsse und Ableitung von Anforderungen an die wirtschaftliche Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

3.1 Einflussgrößen

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Simulationsbaukastens für die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung. Dazu sind die genauen Kenntnisse der zu berücksichtigenden Einflussgrößen bei der Planung, Auslegung und Optimierung aller notwendigen Prozesse, Abläufe und Strukturen von entscheidender Bedeutung /Westkämper 2004, Spath 2002/. Ausgehend von der Beschreibung der Ausgangssituation werden diese Einflüsse im Folgenden analysiert und die notwendigen Anforderungen abgeleitet.

Die wesentlichen Einflussgrößen, die bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens und bei der wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung zu berücksichtigen sind, stellen die Bereiche Simulationstechnik, Produktionstechnik und Materialflussautomatisierung dar (*Bild 11*).

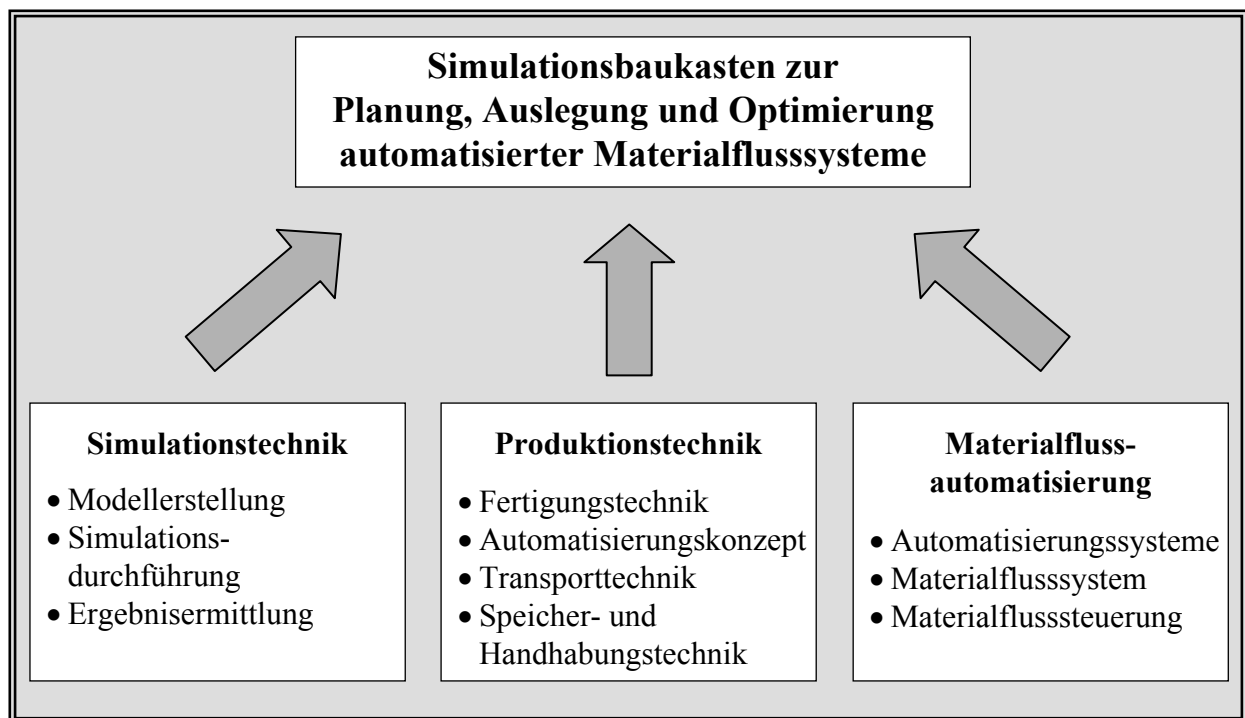


Bild 11: Einflussgrößen auf die Entwicklung des Simulationsbaukastens zur wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

3.2 Einflüsse aus der Simulationstechnik

Die Planung und Auslegung von Transport-, Speicher- und Handhabungssystemen erfolgt derzeit nur überschlägig mit Hilfe von Simulationsuntersuchungen, bei denen die Automatisierungssysteme im Simulationsmodell vereinfacht abgebildet oder nur die Materialtransporte auf der Ebene der einzelnen Fertigungsbereiche betrachtet werden. Leistungsfähige Simulationsmodelle fehlen, um eine durchgängige Systembetrachtung sowie die Abbildung aller spezifischen Einflussgrößen aus der Produktionstechnik und der Materialflussautomatisierung in ihrer Gesamtheit zu ermöglichen.

Durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass Engpässe im Materialfluss häufig durch den Einsatz von Speicher- und Handhabungssystemen entstehen, die unabhängig von ihrem Einsatzzweck (z.B. Zwischenlagerung bei Störungen oder Übergabe von Losen zwischen verschiedenen Transportsystemen) alle die gleiche Leistungsfähigkeit und Lagerkapazität aufweisen. Im Bereich der Transporttechnik wird häufig nur eine Transportsystemvariante abgebildet, deren Einsatz auf einzelne Fertigungsbereiche beschränkt ist.

Aussagefähige Planungsdaten für Wirtschaftlichkeitsrechnungen und Investitionsentscheidungen werden bereits früh im Planungsstadium benötigt. Die Erstellung der Simulationsmodelle muss deshalb schnell und einfach möglich sein, um erste Simulationsergebnisse rasch zu erzielen und die Simulationsuntersuchungen in einem möglichst kurzen Zeitraum durchführen zu können. Die schnelle und einfache Erstellung der Simulationsmodelle bildet auch die Basis für einen effektiven Vergleich unterschiedlicher Lösungskonzepte zur Automatisierung der Materialflusssysteme und für eine schnelle Durchführung der Simulationsuntersuchungen. Um aussagefähige Simulationsergebnisse zu erzielen, ist die Modellierung der zu entwickelnden Lösungskonzepte und die genaue Abbildung der realen Fertigungsbedingungen im Simulationsmodell entscheidend. Der Genauigkeitsgrad muss so gewählt werden, dass die relevanten Einflussgrößen detailliert im Modell nachgebildet werden und die Anforderungen in ihrer Gesamtheit im Modell enthalten sind. Alle diese Anforderungen werden nur von einem Simulationsbaukasten unterstützt.

Eine weitere wichtige Anforderung ist die einfache Erweiter- und Änderbarkeit der im Simulationsbaukasten enthaltenen Modelle und Bausteine. Es muss sichergestellt sein, dass Simulationsmodelle für neue Lösungskonzepte einfach erstellt und bestehende Modelle ohne großen Aufwand um weitere Lösungsvarianten erweitert werden können. Zur Erzielung aussagefähiger Simulationsergebnisse müssen die komplexen Fertigungs- und Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung mit allen Automatisierungskomponenten und Teilsystemen im Simulationsmodell nachgebildet werden, um eine genaue Abbildung der realen Zusammenhänge zu ermöglichen. Ebenso müssen Schnittstellen zur Datenübernahme aus dem Simulationssystem spezifiziert und Ergebnisdiagramme konzipiert werden, um die Ermittlung, Aufbereitung und Präsentation der Ergebnisse zu vereinfachen und zu standardisieren.

Durchgeführte Untersuchungen zeigen weiter, dass die wesentlichen Einflussgrößen aus der Modellerstellung, Simulationsdurchführung und Ergebnisermittlung bei der Planung und Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme nicht ausreichend berücksichtigt

werden, wodurch die Simulationsergebnisse oft unzureichend sind /Campbell 2000, Bader 1999/. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass zur Lösung der vorgegebenen Aufgabenstellung die folgenden Anforderungen bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens beachtet werden müssen.

- *Begrenzter Zeitbedarf zur Simulationsdurchführung*

Aussagefähige und verwertbare erste Simulationsergebnisse müssen in der Planungsphase innerhalb eines Zeitraumes von 6 bis 10 Wochen vorliegen.

- *Abbildung aller Transport- und Speichersysteme*

Der Detaillierungsgrad der Simulationsmodelle muss so gewählt werden, dass alle Einflussgrößen aus der Transport-, Speicher- und Handhabungstechnik funktional, zeitlich und kapazitiv mit allen Teilsystemen im Simulationsbaukasten abgebildet und entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit berücksichtigt werden.

- *Geringer Aufwand für die Modellerstellung und Modelländerung*

Um die besten Lösungsvarianten für die Automatisierung der Transport-, Speicher- und Handhabungsabläufe ermitteln zu können, muss die einfache Erstellung und Änderbarkeit der Simulationsmodelle während des gesamten Planungsprozesses sichergestellt werden.

- *Genauere Abbildung automatisierter Materialflusssysteme*

Die genaue Abbildung der sehr komplexen Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung bildet die Voraussetzung für die wirtschaftliche Planung und Auslegung der Transport-, Speicher- und Handhabungskapazitäten.

- *Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse*

Für die Gegenüberstellung und Bewertung unterschiedlicher Lösungskonzepte zur Automatisierung der Materialflusssysteme müssen aussagefähige Simulationsergebnisse für die Teilsysteme ermittelt und mit Hilfe von definierten Schnittstellen und Ergebnisdiagrammen ausgelesen und aufbereitet werden können.

3.3 Einflüsse aus der Produktionstechnik

3.3.1 Fertigungstechnik

In der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung werden sehr viele unterschiedliche Prozesstechnologien mit bis zu 900 Einzelprozessschritten parallel gefertigt. Für die einzelnen Fertigungsschritte werden bis zu 100 verschiedene Fertigungsgeräte mit stark unterschiedlichen Prozesskapazitäten benötigt. Durch notwendige Redundanzen kann eine einzige Fertigung aus bis zu 600 Fertigungsgeräten bestehen. Der dadurch verursachte häufige Wechsel der Fertigungsbereiche und Fertigungsgeräte führt zu sehr komplexen und dynamischen Fertigungsabläufen. Hohe Sub-

stratdurchsätze, sehr lange Durchlaufzeiten, und ein großer Umlaufbestand beeinflussen den Materialfluss zusätzlich /ITRS 2003, TIN 2003/.

Die Auswahl und Anpassung des Fertigungslayouts an die Anforderungen des automatisierten Materialflusssysteme steigert dessen Leistungsfähigkeit um 10% bis 30% /Weiss 1999, Padillo 1998/. In *Bild 12* sind die Auswirkungen von Einflussgrößen aus der Fertigungstechnik auf die Materialflussautomatisierung bei verschiedenen Layoutvarianten dargestellt. Die Analyse zeigt, dass Tunnelreinräume strukturierte Materialflüsse unterstützen und für die Automatisierung der Materialflüsse am besten geeignet sind. Eine sequentielle Anordnung der Reinräume unterstützt die Automatisierung der Materialflüsse nur zum Teil, während bei Flächenreinräumen eine Automatisierung aufgrund der meist unstrukturierten Materialflüsse schwierig ist.

Einflussgrößen aus der Fertigungstechnik	Layoutvarianten			
	Flächen- reinraum	Tunnelreinraum	Komprimierter Tunnelreinraum	Sequentielle Reinräume
Durchsatz an Fertigungslosen	geringe Durchsätze	hohe Durchsätze	sehr hohe Durchsätze	mittlere bis hohe Durchsätze
Durchlaufzeit der Fertigungslose	hohe Durchlaufzeiten	mittlere Durchlaufzeiten	mittlere bis gute Durchlaufzeiten	gute Durchlaufzeiten
Auslastung der Fertigungsgeräte	geringe bis mitt- lere Auslastung	gute Auslastung	sehr gute Auslastung	mittlere bis gute Auslastung
Höhe der Investitionskosten	mittlere Investitionskosten	hohe Investitionskosten	hohe Investitionskosten	sehr hohe Investitionskosten
Wechselhäufigkeit der Fertigungsbereiche	kein Bereichswechsel	sehr viele Bereichswechsel	viele Bereichswechsel	wenige Bereichswechsel
Materialflusstruktur	unstrukturierte Materialflüsse	strukturierte Materialflüsse	strukturierte Materialflüsse	teilstrukturierte Materialflüsse
Automatisierbarkeit der Materialflüsse	sehr schwierige Automatisierung	gute Automatisierung	gute Automatisierung	mittlere Automatisierung
Anwendung der Layoutvariante	kleine bis mittlere, manuelle Fertigungen	geeignet für Fertigungen mit hohem Durchsatz	geeignet für Fertigungen mit hohem Durchsatz	geeignet für Fertigungen mit vielen Produkten
Die wichtigsten Einflussgrößen sind dunkel hinterlegt				

Bild 12: Auswirkungen von Einflussgrößen aus der Fertigungstechnik auf die Materialflussautomatisierung bei verschiedenen Layoutvarianten

Neben den normalen Produktionslosen müssen Prioritätenlose, die während Ihrer Bearbeitung im Fertigungsablauf Vorrang besitzen, sowie Test-, Nacharbeits- und Entwicklungslose, die einzelne Prüf- und Bearbeitungsschritte durchlaufen, als Einflussgrößen berücksichtigt werden /Kaufmann 2002, Foster 1998/. Bedingt durch die Prozesskomplexität kann der Anteil dieser Lose insbesondere bei der Einführung neuer Produkttechnologien sehr hoch sein. Der Einsatz dieser Lose kann dabei auf einzelne Prozessschritte beschränkt sein oder auch Prozessablauffolgen bestehend aus

mehreren Prozessschritten umfassen. Zusätzliche Anforderungen stellen aus Sicht der Prozesstechnik definierte Liegezeiten zwischen zwei Prozessschritten und bei der Abbildung der Fertigungsgeräte Blockbildungen in variablen Blockgrößen dar. Weitere wesentliche Einflussgrößen, welche die Dynamik der Fertigungsabläufe beeinflussen und bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens berücksichtigt werden müssen, sind unvorhergesehene Störungen und zeitlich definierte Instandhaltungsarbeiten.

Die durchgeführten Analysen führen aus fertigungstechnischer Sicht zu den nachfolgend aufgeführten Anforderungen an die Entwicklung des Simulationsbaukastens.

- *Abbildung aller möglichen Fertigungsprozesse und Losarten*

Als wesentliche Einflussgrößen aus dem Umfeld der Fertigungstechnik müssen die große Anzahl an Prozesstechnologien und -schritten zur Produktfertigung und die Abbildung der vorhandenen Prioritäts-, Test-, Nacharbeits- und Entwicklungslose bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens berücksichtigt werden. Dies beinhaltet auch die Einhaltung zeitlicher Abhängigkeiten aus der Prozesstechnik, wie z.B. definierte Liegezeiten zwischen zwei Fertigungsprozessen.

- *Abbildung aller Fertigungsgerätetypen*

Entscheidende Anforderungen für die detaillierte Abbildung der Fertigungsgeräte im Simulationsbaukasten sind die Berücksichtigung der stark unterschiedlichen Prozesszeiten und Kapazitäten der Fertigungsgeräte sowie die Bearbeitung von Losen in variablen Blockgrößen. Die für ein Fertigungsgerät typischen Haupt- und Nebenzeiten, wie z.B. Bearbeitungs- oder Umrüstzeiten, müssen ebenfalls im Simulationsmodell abgebildet werden.

- *Berücksichtigung dynamischer Einflussgrößen*

Zur Abbildung der dynamischen Zusammenhänge im Simulationsmodell müssen zeitlich definierte Instandhaltungsarbeiten und unvorhergesehene Störungen an den Fertigungsgeräten und Automatisierungssystemen genauso berücksichtigt werden, wie Kapazitätsengpässe und Aufstauungen im Materialfluss.

- *Abbildung der Fertigungslayoutvarianten*

Die Basis für die Erstellung der Simulationsmodelle bilden die untersuchten Layoutvarianten für eine Fertigung. Diese Layoutvarianten müssen entsprechend ihres geometrischen Aufbaus und ihrer räumlichen Anordnung im Simulationsmodell abgebildet werden. Dies beinhaltet auch die Forderungen nach einer detaillierten Abbildung der Aufstellung der Fertigungsgeräte und der genauen Anordnung der Automatisierungssysteme im Layout.

- *Einfache Modellierung der Materialflüsse*

Zentrale Anforderung an die Entwicklung des Simulationsbaukastens ist die einfache Modellierung der Materialflüsse, um die Erstellung der Simulationsmodelle und die Simulationsdurchführung zu beschleunigen.

3.3.2 Materialflussautomatisierung

Die Transportvorgänge werden vom gewählten Fertigungslayout beeinflusst /Meyersdorf 1998/. Bei fabrikweiten Transportvorgängen werden die Substrate von einem Fertigungsgerät zum nachfolgenden und bei bereichsübergreifenden Transportvorgängen von einem Fertigungsbereich zum nächsten transportiert /SEMI 2004b, Chrisos 1998/. Im Gegensatz dazu werden bei bereichsinternen Transportvorgängen die Substrate innerhalb der Fertigungsbereiche zu den einzelnen Fertigungsgeräten transportiert /TIN 2003, Bader 1997/.

Durchgeführte Untersuchungen der Prozessabläufe bei einer Fertigung von 256 MByte Speicherbausteinen mit einem Tunnelreinraum zeigen, dass bei 319 notwendigen Prozessschritten zur Herstellung eines Bausteins 225 bereichsübergreifende und 312 bereichsinterne Transportvorgänge sowie mehr als 500 Zwischenlagerungen in automatischen Speichersystemen durchgeführt werden. Die Ergebnisse einer weltweiten Analyse der Defizite bei der Materialflussautomatisierung in bestehenden Halbleiter- und Flachbildschirmfertigungen sind in *Bild 13* zusammengefasst.

Eingesetzte Systeme zur Materialflussautomatisierung	Halbleiterfertigung	Flachbildschirmfertigung
Einsatz von hybriden, fabrikweiten Transportsystemen	Keine Realisierung bekannt	Keine Realisierung bekannt
Fabrikweites Transportsystem und automatische Beladung der Fertigungsgeräte	Keine Realisierung bekannt	Keine Realisierung bekannt
Fabrikweites Transportsystem und manuelle Beladung der Fertigungsgeräte	Für Rollenbahn und Elektrohängebahn ohne Handhabung realisiert	Für hohe Transportgewichte Realisierung schwierig
Einsatz von Automatisierungssystemen unterschiedlicher Hersteller	In der Regel Einsatz von Systemen eines Herstellers in separaten Fertigungsbereichen	In der Regel Einsatz von Systemen eines Herstellers in separaten Fertigungsbereichen
Bereichsübergreifende Transportautomatisierung im Korridorbereich	Realisierungen in der Regel für deckengebundene Transportsysteme	Realisierungen in der Regel für deckengebundene Transportsysteme
Bereichsinterne Transportautomatisierung mit automatischer Beladung der Fertigungsgeräte	Für Fahrerlose Transportsysteme und Elektrohängebahnen realisiert	Für Fahrerlose Transportsysteme realisiert
Einsatz automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme	In allen Fertigungsbereichen realisiert	In allen Fertigungsbereichen realisiert
Die wichtigsten Defizite sind dunkel hinterlegt		

Bild 13: Analyse der Defizite bei der Materialflussautomatisierung

Die Analyse zeigt, dass in der Flachbildschirmfertigung bei großen Substratgrößen Automatisierungssysteme eingesetzt werden, die denen in der Halbleiterfertigung entsprechen und zum großen Teil die Fertigungsgeräte direkt beladen /TIN 2003a, Ward 1997/. Da eine Aufteilung der Transportsysteme in bereichsübergreifende und bereichsinterne Systeme erfolgt, werden viele Transportsysteme benötigt. Zur Verknüpfung der Transportsysteme werden Speichersysteme eingesetzt, was insgesamt zu sehr hohen Investitionskosten und zu einer sehr großen Anzahl an Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgängen bei einem Materialtransport bis zum nächsten Fertigungsgerät führt /Inoue 2002, Subramaniam 1998/.

In der Halbleiterfertigung werden automatisierte Transportsysteme in erster Linie für Transportvorgänge zwischen verschiedenen Speichersystemen eingesetzt. Die Beladung der Fertigungsgeräte erfolgt weitgehend manuell oder durch einen Gerätespeicher /TIN 2003/. Nur in neueren Einsatzfällen werden die Fertigungsgeräte durch bereichsinterne Transportsysteme beladen /ITRS 2003/.

Die durchgeführte Analyse zeigt weiter, dass kein durchgängiges und wirtschaftliches Automatisierungskonzept existiert, das einen fabrikweiten Einsatz automatisierter Transport- und Speichersysteme entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit ohne eine Trennung in bereichsübergreifende und bereichsinterne Transportvorgänge ermöglicht /ITRS 2003/. Weitere große Defizite bestehen beim fabrikweiten Einsatz von hybriden Systemlösungen mit unterschiedlichen Transportsystemvarianten in einem fabrikweitem Gesamtsystem, der Optimierung der einzelnen Automatisierungssysteme im Hinblick auf die Gesamtfunktionalität und der durchgängigen automatischen Beladung der Ein-/Ausgabestationen /ITRS 2003, Inoue 2002/.

Aus den durchgeführten Analysen lassen sich die folgenden Anforderungen an eine wirtschaftliche Automatisierung der Materialflusssysteme ableiten.

- *Minimierung der Transportvorgänge*

Die sehr große Anzahl an Transportvorgängen muss minimiert werden, damit möglichst wenig Fahrzeuge und Automatisierungssysteme für die Durchführung der anstehenden Transportaufträge benötigt und die Investitionskosten minimiert werden.

- *Minimierung der Speichervorgänge*

Da die Investitions- und Betriebskosten für den Einsatz der Speichersysteme und die notwendige Reinraumfläche sehr hoch sind, muss die Anzahl an Speichervorgängen im Materialfluss minimiert werden.

- *Minimale Loshandhabungen*

Um die speicherintegrierten Handhabungssysteme zu entlasten, die Materialflussabläufe zu optimieren und die Lose keinen unnötigen Erschütterungen auszusetzen, muss die Anzahl an Loshandhabungen minimiert werden.

- *Kleine Wartezeitanteile*

Der Anteil an Wartezeiten im Materialfluss muss durch die Konzeption und Auswahl eines geeigneten Automatisierungskonzeptes so klein wie möglich sein.

- *Geringe Anzahl an Automatisierungssystemen*

Die Anzahl an eingesetzten Automatisierungssystemen muss aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten möglichst gering sein.

- *Niedrige Investitionskosten*

Die sehr hohen Investitionskosten von teilweise über 50 Mio. EURO für die Materialflussautomatisierung müssen durch die Entwicklung eines wirtschaftlichen Automatisierungskonzeptes reduziert werden.

- *Hybride Systemlösungen*

Das Automatisierungskonzept muss hybride Systemlösungen mit verschiedenen Transportsystemvarianten in einem fabrikweiten Gesamtsystem unterstützen.

- *Geringe Transportzeiten*

Zur Reduzierung der Gesamtdurchlaufzeit für ein Los muss die hohe Anzahl an Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgängen verringert werden.

- *Anwendbarkeit für unterschiedliche Fertigungslayouts*

Das Automatisierungskonzept muss das zugrunde liegende Fertigungslayout unterstützen und kann im Idealfall durch Modifikationen an unterschiedliche Layoutformen adaptiert werden.

- *Flexibilität bei Systemausfall*

Das Automatisierungskonzept muss so flexibel ausgelegt werden, dass bei Ausfällen von Teilsystemen das Materialflusssystem möglichst wenig gestört wird und Ausweichmöglichkeiten aufgrund von Redundanzen im Materialflusssystem bestehen.

3.3.3 Transporttechnik

Der Einsatz automatisierter Transportsysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung umfasst den Transport von Kassetten- und Substratbehältnissen zwischen Fertigungsbereichen, Fertigungsgeräten und automatisierten Lagersystemen. Studien zeigen, dass durch den Einsatz dieser Systeme eine signifikante Erhöhung der Auslastung der Fertigungsgeräte bewirkt werden kann (*Bild 14*) /TIN 2003, ITRS 2003, Plata 1997/.

Die Studien belegen, dass ein Fertigungsgerät nur zu ca. 30% seiner verfügbaren Zeit für Produktionszwecke eingesetzt wird (engl.: OEE - Overall Equipment Efficiency) /TIN 2003, Alexander-son 1997/. Große Optimierungspotentiale liegen in der Reduzierung von Nebenzeiten und Testsubstraten (18%), der Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit (15%) sowie in der Reduzie-

rung von Störzeiten (15%). Die Optimierung dieser Faktoren kann nur durch zusätzlichen Aufwand oder eine intensive Zusammenarbeit mit den Herstellern der Fertigungsgeräte erfolgen.

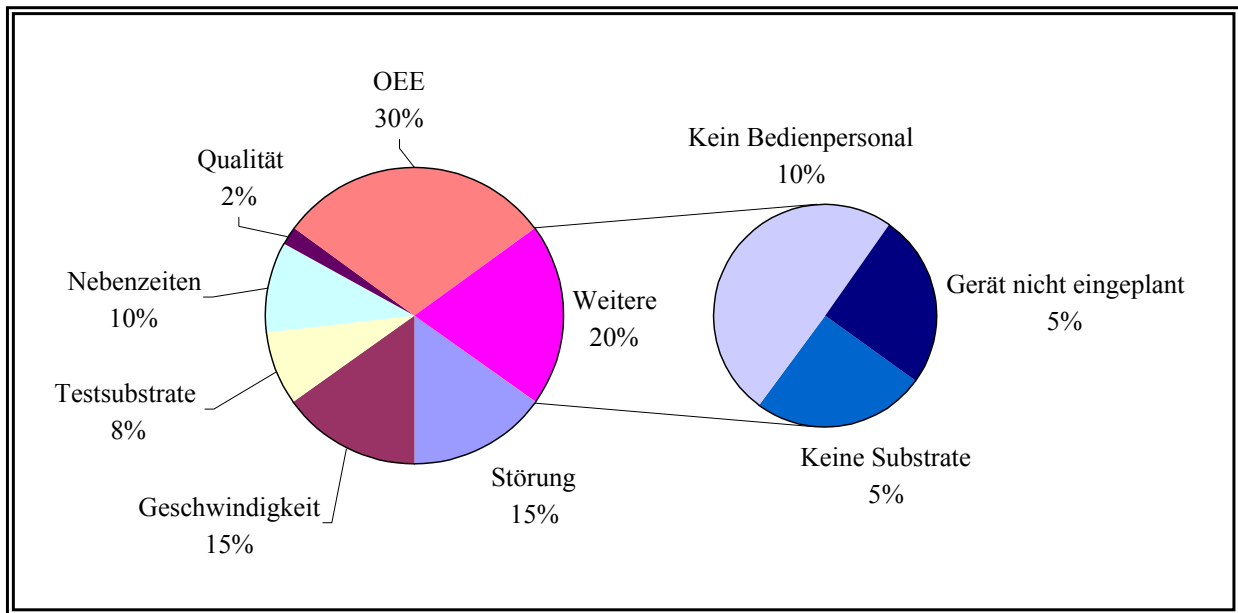


Bild 14: Analyse der durchschnittlichen prozentualen Auslastung eines Fertigungsgerätes in der Halbleiterfertigung

Die geforderte Automatisierung der Materialflusssysteme kann eine Erhöhung der Fertigungsgeräteausrüstung von im Idealfall bis zu 15% bewirken, da die Ausfallzeiten bedingt durch fehlende Substrate oder Bedienpersonal reduziert werden. Um dieses Optimierungspotential ausschöpfen zu können, ist der bedarfsentsprechende Einsatz automatisierter Transportsysteme von entscheidender Bedeutung. Durchgeführte Untersuchungen hierzu zeigen, dass große Defizite bei den Hilfsmitteln und Methoden für eine wirtschaftliche Planung, Auslegung und Optimierung der Transportsysteme bestehen.

Die wesentlichen technischen Leistungsmerkmale der unterschiedlichen Transportsystemvarianten, die bei der Automatisierung der Transportabläufe und der Leistungsbewertung der Systeme beachtet werden müssen, sind in *Bild 15* gegenübergestellt. Diese Leistungsmerkmale der einzelnen Systemvarianten sind bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens zu berücksichtigen. Neben den verschiedenen Förderprinzipien und Leistungsparametern betrifft dies in erster Linie die Leistungsfähigkeit der Transportsysteme im Hinblick auf Geschwindigkeiten und Kapazitäten sowie unterschiedliche Anteile bei den variablen und fixen Investitionskosten.

Technische Leistungsmerkmale der Transportsysteme	Rollenbahn	Elektrohängebahn		Fahrerlose Transportsysteme	
		ohne Handhabung	mit Handhabung	schienengeführt	automatisch
Förderprinzip	stetig	unstetig	unstetig	unstetig	unstetig
Luftreinheitsklasse	2 bis 3	2 bis 3	2 bis 3	2 bis 3	2 bis 3
Geschwindigkeit	0,22 m/s	1,5 m/s	1 m/s	1 m/s	1,2 m/s
Traglast	30 kg	50 kg	15 kg	>50 kg	>60 kg
Kapazität HL	sehr hoch	1 Los / Fzg.	1 Los / Fzg.	4 Lose / Fzg.	4 Lose / Fzg.
Kapazität FPD	—	1 Los / Fzg.	—	1 Los / Fzg.	1 Los / Fzg.
Integrierte Handhabung	nein	nein	ja	ja	ja
Antriebsart	Elektromotor	Elektro-/Linearmotor	Elektro-/Linearmotor	Elektromotor/Schiene	Elektromotor
Energiezuführung	Kupplungssystem	Batterie/Schiene	Batterie/Schiene	Batterie/Schiene	Batterie
Führungsart	Schienenbahn	Schiene	Schiene	Schiene	Leitlinie/Navigation
Transporttrasse	Decke	Decke	Decke	Boden	Boden
Einsatzmöglichkeit	HL	HL / FPD	HL	HL / FPD	HL / FPD
Kosten / Fahrzeug	—	25000.- €	50000.- €	150000.- €	250000.- €

Bild 15: Gegenüberstellung der technischen Leistungsmerkmale der unterschiedlichen Transportsystemvarianten

Aus der Ausgangssituation und der durchgeführten Gegenüberstellung werden die folgenden Anforderungen an die wirtschaftliche Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Transportsysteme abgeleitet.

- *Minimaler Flächenbedarf*

Eine wesentliche Anforderung beim Einsatz automatisierter Transportsysteme ist die Minimierung des Flächenbedarfs, da die Investitionskosten für Reinraumflächen im Bereich von 10000.- bis 15000.- EURO je m² liegen und die Betriebskosten bis zu 2500.- EURO je m² nutzbare Reinraumfläche betragen können, wobei zukünftig ein weiterer Anstieg dieser Kosten prognostiziert wird.

- *Hoher Durchsatz an Fertigungslosen*

Die Leistungsfähigkeit des Transportsystems muss sicherstellen, dass auch ein hoher Durchsatz an Fertigungslosen, wie z.B. im Korridorbereich, ohne Stauungen im Materialfluss abgearbeitet werden kann.

- *Minimierung der Transportzeit*

Insbesondere beim Transport von Eillosen mit einer Fertigungspriorität muss das Transportziel möglichst schnell innerhalb von wenigen Minuten erreichbar sein.

- *Eignung für lange oder kurze Transportstrecken*

Bei der Auswahl einer geeigneten Transportsystemvariante muss die Eignung für lange oder kurze Transportstrecken berücksichtigt werden. Speziell innerhalb eines Bereiches werden beim Beladen der Fertigungsgeräte häufig nur kurze Transportstrecken zurückgelegt (bis zu 100m), während bei bereichs- oder werksübergreifenden Transportvorgängen diese sehr lang sein können (bis zu 500m).

- *Höhe der variablen oder fixen Investitionskosten*

Bei der Auswahl eines Transportsystems für eine vorgegebene Transportaufgabe sind aus Wirtschaftlichkeitsgründen die Höhe der variablen und fixen Investitionskosten zu berücksichtigen.

- *Flexibilität der Transporttrassen*

Da beim Ausfall einzelner Teilstrecken oder bei einer Änderung der Aufstellung der Fertigungsgeräte die Materialtransporte nicht behindert werden dürfen, muss die Transporttrasse eine größtmögliche Flexibilität aufweisen.

- *Einfache Beladung der Fertigungsgeräte*

Die Beladung der Ein-/Ausgabestationen eines Fertigungsgerätes muss ohne großen Aufwand durchführbar sein.

- *Transport hoher Substratgewichte*

Insbesondere in der Flachbildschirmfertigung besteht die Anforderung an die Transportsysteme, Lose mit einem Gewicht von teilweise über 50kg zu transportieren.

3.3.4 Speicher- und Handhabungstechnik

Die Hauptaufgabe automatischer Speichersysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ist der Ausgleich von Kapazitätsschwankungen im Produktionsablauf und die Zwischenlagerung von mehr als 200 Losen mit teilweise über 50kg Handhabungsgewicht. Parallel dazu dienen sie häufig als Schnittstelle für die Materialübergabe zwischen verschiedenen Transportsystemen. Wichtigster Bestandteil des Speichersystems ist ein integriertes, zentrales Handhabungssystem zur Handhabung der Kassetten- und Transportbehältnisse zwischen den Ein-/Ausgabestationen und den Regalplätzen /SEMI 2004a/. Zusätzlich können Speichersysteme automatische Ein-/Ausgabesysteme mit eigenen stationären Handhabungssystemen zur Be- und Entladung der Transportsysteme besitzen, die das zentrale Handhabungssystem zeitlich entkoppeln und entlasten. Die Kosten für ein automatisiertes Speichersystem können in Abhängigkeit von der gewählten Ausführungsform bis zu 500000.- EURO und mehr betragen.

In der Ausführung als Gerätespeicher bilden sie die Übergabeschnittstelle zwischen einem Transportsystem und einem Fertigungsgerät und sind für die Lagerung der Kassetten und Transportbehälter vor und während der Fertigungsprozesse zuständig /Weiss 1999/. Durchgeführte Untersuchungen in mehreren Halbleiterfertigungen zeigen, dass die Speichersysteme häufig falsch geplant und die Kapazitäten unzureichend ausgelegt sind, weil entsprechende Planungsleitlinien und Hilfsmittel während des Planungsprozesses fehlen. Dies verursacht insbesondere bei Grenzbelastungszuständen häufig zeit- und kostenintensive Störungen und Engpässe durch fehlende oder falsch dimensionierte Speichersysteme im Materialflusssystem.

Die Häufigkeit der Frequentierung, die Verweilzeiten der Lose im Speicher, die Auslastung des integrierten Handhabungssystems und die Lagerung von Losblöcken sind entscheidende Einflussgrößen auf die Planung und Auslegung automatisierter Speichersysteme. In Verbindung mit der optimalen Gestaltung der Übergabeschnittstellen zur Vermeidung von Wartezeiten bei der Ein- und Auslagerung der Lose sind diese Kriterien für eine wirtschaftliche Planung und Auslegung der Speicher- und Handhabungskapazitäten von großer Bedeutung. Aus der Ausgangssituation und den durchgeführten Analysen lassen sich die nachfolgenden Anforderungen an die Planung und Auslegung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme ableiten.

- *Hohe Frequentierungshäufigkeit*

Die Frequentierungshäufigkeit eines Speichersystems mit Losen muss bei einem hohen Materialdurchsatz berücksichtigt werden.

- *Zwischenlagerung bei langen Störungen*

Bei länger andauernden Störungen und Wartungsarbeiten ist sicherzustellen, dass Fertigungslose auch über längere Zeiträume in einem Speichersystem zwischengelagert werden können.

- *Speicherkapazitäten für unproduktive Lose*

Fertigungslosen für unproduktive Fertigungsabläufe, wie z.B. Messvorgänge und Entwicklungsabläufe oder Auffüllsubstrate bei bestimmten Fertigungsprozessen, müssen zusätzliche Speicherkapazitäten zur Verfügung gestellt werden.

- *Sammlungsmöglichkeiten für Losblöcken*

Die Sammlung von Losblöcken für eine gemeinsame Bearbeitung am nachfolgenden Fertigungsgerät muss bei der Auslegung der entsprechenden Speichersysteme berücksichtigt werden.

- *Minimierung des Flächenbedarfs im Reinraum*

Wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten muss beim Einsatz automatisierter Speichersysteme in einer Halbleiter- oder Flachbildschirmfertigung der Verbrauch an Reinraumfläche möglichst minimiert werden.

- *Optimale Anordnung der Ein-/Ausgabestationen*

Die Anordnung der Ein-/Ausgabestationen zum Materialtransfer zwischen Speichersystemen, Transportsystemen und Fertigungsgeräten muss im Hinblick auf die Frequentierungshäufigkeit und die Kapazität des Handhabungssystems untersucht und optimiert werden.

- *Minimierung der Wartezeit eines Loses bis zur Einlagerung*

Die Wartezeit eines Loses bis zu seiner Einlagerung in ein Speichersystem muss minimiert werden.

- *Überschlägige Berechnung der Speicher- und Handhabungskapazitäten*

Da derzeit kein Verfahren existiert, mit dem automatische Speichersysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung bereits in der Grobplanungsphase ausgelegt werden können, müssen mathematische Zusammenhänge für eine überschlägige Berechnung der Speichergröße in Abhängigkeit von der Handhabungsgeschwindigkeit und der Anzahl an durchzuführenden Handhabungen entwickelt werden.

3.4 Einflüsse auf die Materialflussautomatisierung

Halbleiterfertigungen werden anhand der gefertigten Produktapplikationen und Stückzahlen in drei unterschiedliche Fertigungstypen unterteilt. Bei der durchsatzorientierten Massenfertigung von Halbleitern werden einige wenige Produktapplikationen in sehr großen Stückzahlen gefertigt (z.B. Speicherchips). Bei der Herstellung produktspezifischer Halbleiter werden unter der Zielsetzung einer möglichst kurzen Durchlaufzeit zumeist im Kundenauftrag viele Produkttechnologien in kleinen und mittleren Stückzahlen mit unterschiedlichen Prioritäten gefertigt (engl.: ASIC – Application Specific Integrated Circuit). In manchen Fertigungen werden massen- und produktspezifische Halbleiter parallel gefertigt, wodurch aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen zusätzliche Anforderungen an die Automatisierung der Materialflusssysteme gestellt werden. Bei der Fertigung von Flachbildschirmen handelt es sich in der Regel um eine durchsatzorientierte Massenfertigung mit wenigen Produktapplikationen, die in sehr großen Stückzahlen hergestellt werden.

In *Bild 16* sind die unterschiedlichen Zielkriterien bei der Automatisierung der Materialflusssysteme in Abhängigkeit von der gewählten Fertigungsvariante dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass bei der Fertigung von Massenthalbleitern andere Zielkriterien vorherrschen als bei der Fertigung produktspezifischer Halbleiter. Der Vergleich belegt, dass die Zielkriterien niedrige Umlaufbestände, geringe Durchlaufzeiten und eine hohe Anzahl an Prioritätenlose charakteristisch für eine produktspezifische Halbleiterfertigung sind. Im Gegensatz dazu sind für eine massenspezifische Halbleiterfertigung ein hoher Substratdurchsatz, hohe Umlaufbestände und eine geringe Anzahl an Prioritätenlosen typisch. Daraus folgt, dass die Planung, Auslegung und Optimierung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme stark von der jeweiligen Fertigungsvariante und den damit verbundenen Zielkriterien abhängt.

Zielkriterien unterschiedlicher Fertigungsvarianten	Fertigungsvarianten von Halbleitern und Flachbildschirmen		
	Massenfertigung	Massen- und Einzelfertigung	Produktspezifische Einzelfertigung
Anzahl an Produkten und Technologien	gering	mittel bis hoch	sehr hoch
Durchsatz an Losen	sehr hoch	mittel bis hoch	gering bis mittel
Durchlaufzeit eines Loses	sehr hoch	mittel bis hoch	gering bis mittel
Fertigungsgeräteaustattung	hoch	mittel	gering
Umlaufbestand	sehr hoch	mittel bis hoch	gering bis mittel
Anteil an Prioritätenlosen	gering	mittel	hoch

Bild 16: Gegenüberstellung unterschiedlicher Zielkriterien bei der Automatisierung der Materialflusssysteme in Abhängigkeit von den Fertigungsvarianten

3.4.1 Automatisierungssysteme

Zur Optimierung der Zielkriterien müssen zusätzliche Einflussgrößen aus der Automatisierungstechnik bei der Planung, Auslegung und Optimierung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme berücksichtigt werden. Bei der Automatisierung der Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung zeigen Erfahrungen aus der Praxis, dass bei den standardisierten Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten große Optimierungspotentiale vorhanden sind. Bei den un stetigen Transportsystemen liegen Optimierungspotentiale im Bereich der Disposition der Transportfahrzeuge /Gudehus 2000a, Fischer 1997/ und in der Aufteilung des Transportkurses in Fahrbereiche.

Die Kapazitäten der Ein-/Ausgabestationen zur Materialübergabe müssen so ausgelegt werden, dass immer genügend Substrate an jedem Fertigungsgerät zur Bearbeitung bereitstehen und Ausfallzeiten durch fehlende Substrate vermieden werden. Die Kosten für eine Ein-/Ausgabestation können aufgrund der vorgegebenen Anforderungen des SMIF- bzw. FOUP-Standards bis zu 100000.- EURO betragen. Deshalb besteht die Forderung, genügend Kapazitäten für die Substrate an den Übergabeschnittstellen bereitzustellen und die Anzahl der Ein-/Ausgabestationen aus Kostengründen möglichst zu minimieren.

Für die Auslegung der Transportkapazitäten bei un stetig arbeitenden Transportsystemen ist die Disposition der Leerfahrzeuge entscheidend /Fischer 2001, Gudehus 1993, Gudehus 1992, Moldaschl 1986/. Deshalb ist für die Zuordnung eines freien Transportfahrzeuges zu einem wartenden Transportauftrag eine auf die vorliegenden Anforderungen zugeschnittene Dispositionsstrategie notwendig. Da die Kosten für reinraumtaugliche Transportfahrzeuge sehr hoch sind (bis zu 250000.- Euro für ein automatisches Fahrerloses Transportfahrzeug), muss die Fahrzeuganzahl so reduziert werden, dass keine Kapazitätseinschränkungen auftreten und genügend Fahrzeugkapazitäten für die Lostransporte zur Verfügung stehen.

Entsprechend den festgelegten Zielkriterien müssen außerdem die Forderungen an eine Reduzierung der Transportzeiten oder eine Erhöhung des Substratdurchsatzes erfüllt werden. Zur Vermeidung von langen und unproduktiven Leerfahrten der Transportfahrzeuge bis zur Aufnahme eines Transportloses ist es sinnvoll, zusätzlich den kompletten Transportkurs in einzelne Fahrbereiche zu unterteilen. Aus den durchgeführten Analysen werden die folgenden Anforderungen an die Automatisierungssysteme abgeleitet.

- *Optimale Anzahl an Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten*

Um Bearbeitungsausfälle durch fehlende Substrate zu vermeiden, muss die Auslegung der Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten dahingehend optimiert werden, dass bei einem minimalen Kostenaufwand genügend Kassetten oder Transportbehältnisse an jedem Fertigungsgerät bereitstehen.

- *Optimierung der Fahrzeugdisposition*

Die Fahrzeugdisposition muss eine optimale Zuordnung der Transportaufträge zu den Leerfahrzeugen ermöglichen, um entsprechend den vorgegebenen Zielkriterien einen optimalen Transportablauf zu gewährleisten.

- *Berücksichtigung von Fahrbereichen*

Die Aufteilung des Transportkurses in Fahrbereiche muss die Fahrzeugdisposition unterstützen und eine optimale Durchführung der Transportaufträge im Hinblick auf die geforderten Zielkriterien sicherstellen.

3.4.2 Materialflusssystem

Einflussgrößen aus dem Materialflusssystem beeinflussen die Planung und Auslegung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme zusätzlich /ITRS 2003, Campbell 2000, Horn 1998/. Zur Optimierung der Materialflusssysteme müssen die Investitionskosten für die Automatisierungssysteme minimiert sowie die Auswirkungen der Materialeingabe in das Gesamtsystem und die Höhe der Umlaufbestände quantifiziert werden /Boyle 1997/. Die Beeinflussung der Materialflusssysteme durch Lose mit einer Fertigungspriorität ist ein weiterer Ansatzpunkt für die Optimierung des Materialflusssystems /ITRS 2003a, Atherton 1996/.

Oftmals werden bei der Eingabe der Lose in die Fertigung Staueffekte festgestellt, die den Materialfluss auch über einen längeren Zeitraum beeinträchtigen, den Durchsatz begrenzen und die Durchlaufzeit der Lose verlängern. Um diese Aufstauungen zu vermeiden, müssen die Auswirkungen unterschiedlicher Eingabemöglichkeiten untersucht und die Einlastung optimiert werden.

Der Anteil an Substraten, die sich gerade in der Fertigung befinden, wird als Umlaufbestand (WIP) bezeichnet. Da ein Los mit fertig bearbeiteten Substraten je nach Produkttechnologie bis zu 100000.- EURO wert sein kann und sich über 3000 Lose gleichzeitig in einer Fertigung befinden können, bindet der Umlaufbestand ein großes Kapitalvermögen /Kaufmann 2002/. Da für eine Erhöhung des Materialdurchsatzes oder für eine Reduzierung der Durchlaufzeit ein jeweils

unterschiedlich großer Umlaufbestand vorteilhaft ist, muss entsprechend den vorgegebenen Zielkriterien für den Umlaufbestand eine optimale Anzahl an Losen in der Fertigung ermittelt werden.

Oft sind eine große Anzahl an Losen mit einer höheren Fertigungspriorität vorhanden, die möglichst schnell durch die Fertigung geschleust werden müssen. Um den Einfluss dieser Prioritätenlose in der Fertigung auf die Materialflusssysteme möglichst gering zu halten, müssen die Auswirkungen auf den Durchsatz und die Durchlaufzeit untersucht und der Durchlauf der Prioritätenlose optimiert werden. Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich die nachfolgenden Anforderungen an die Optimierung der Materialflusssysteme ableiten.

- *Minimierung der Investitionskosten*

Um die Investitionskosten bei der Automatisierung der Materialflusssysteme zu minimieren, müssen Automatisierungskonzepte eingesetzt werden, die eine Optimierung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ermöglichen.

- *Optimierung der Eingabemenge an Fertigungslosen*

Um Störungen im Materialfluss durch die Materialeingabe zu vermeiden, muss die Eingabe der Fertigungslose entsprechend den vorgegebenen Zielkriterien optimiert werden.

- *Optimierung der Höhe des Umlaufbestandes*

Um die hohen Kapitalkosten durch die in der Fertigung befindlichen Lose zu reduzieren, muss die Höhe des Umlaufbestandes so ausgelegt werden, dass bei einem möglichst geringen Umlaufbestand der Durchsatz und die Durchlaufzeit im Sinne der geforderten Zielkriterien optimal sind.

- *Berücksichtigung von Prioritätenlosen*

Um eine Störung des Fertigungsablaufes zu vermeiden, müssen die Materialflussabläufe beim Vorhandensein von Losen mit Eilprioritäten optimiert werden.

3.4.3 Materialflussteuerung

Zur optimalen Einplanung und Durchführung der Transportaufträge muss die Materialflussteuerung die Fertigungslose nach der Beendigung eines Prozessschrittes dem nächsten Fertigungsgerät zur Durchführung der weiteren Bearbeitungsschritte zuordnen. Das nachfolgende Fertigungsgerät wird aufgrund der technologischen Anforderungen des nächsten Prozessschrittes und den verfügbaren Bearbeitungskapazitäten ausgewählt. Nach der Zuordnung des Fertigungsloses zum nächsten Fertigungsgerät generiert die Materialflussteuerung einen Transportauftrag für die Transportsteuerung und übergibt ihn an diese. Die Disposition der Transportaufträge muss so durchgeführt werden, dass ein fertig bearbeitetes Transportlos unverzüglich zum nächsten Fertigungsgerät transportiert werden kann, um eine Minimierung der Transportzeiten und eine optimale Auslastung der Fertigungsgeräte zu erzielen.

Zur Durchführung der anstehenden Transportaufträge muss die Materialflusssteuerung die notwendigen Kapazitäten und Automatisierungssysteme bereitstellen und koordinieren, so dass die Transportaufträge schnell und ohne Störung des Materialflusses durchgeführt werden können. Dazu müssen den zur Abholung bereitstehenden Fertigungslosen freie Transportfahrzeuge bzw. Transportkapazitäten zugeteilt und bei Bedarf die notwendigen Speicherkapazitäten in einem Speichersystem zur Zwischenlagerung zur Verfügung gestellt werden. Für die Durchführung der anstehenden Transportaufträge muss die Steuerung der Transportfahrzeuge so erfolgen, dass die Transportzeiten minimiert werden.

- *Optimierte Auswahl des nachfolgenden Fertigungsgerätes*

Nach der Bearbeitung eines Fertigungsloses muss die Fertigungssteuerung das nachfolgende Fertigungsgerät so auswählen, dass die Durchlaufzeit eines Fertigungsloses minimiert wird.

- *Optimierte Auswahl des nächsten Fertigungsloses*

Nach der Bearbeitung und Abholung eines Loses muss dem Fertigungsgerät ein neues Los so zugeordnet werden, dass eine möglichst hohe Auslastung der Fertigungsgeräte erzielt wird.

3.5 Zusammenfassung der ermittelten Anforderungen und Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte

In *Bild 17* sind die in der Analyse abgeleiteten Anforderungen an die Entwicklung des Simulationsbaukastens für die Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung zusammengefasst. Die in Kapitel 2 aufgeführten Lösungsverfahren zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme sowie die gegenwärtig eingesetzten Softwaresysteme werden anhand dieser Anforderungen gegenübergestellt und bewertet und die Schwerpunkte bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens abgeleitet.

Der zu entwickelnde Simulationsbaukasten muss die abgeleiteten Anforderungen möglichst vollständig unterstützen. Die durchgeführte Bewertung ergibt, dass derzeit kein verfügbares Lösungsverfahren oder Softwaresystem existiert, das alle ermittelten Anforderungen an eine umfassende Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung erfüllt. Basierend auf der beschriebenen Ausgangssituation und den durchgeführten Analysen lässt sich ableiten, dass nur ein Simulationsbaukasten mit einem objektorientierten Aufbau der Simulationsmodelle die gestellten Anforderungen erfüllt.

Bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens müssen insbesondere Lösungsvarianten für die Erstellung der Simulationsmodelle abgeleitet werden, welche die gestellten Anforderungen an die Modellerstellung erfüllen. Die Anforderungen aus der Fertigungstechnik werden für die Auswahl eines geeigneten Systems als Grundlage für die Entwicklung des Simulationsbaukastens benötigt und sind in ihrer Gesamtheit bei einem objektorientierten Aufbau der Simulationsmodelle bereits vollständig erfüllt. Diese Anforderungen stellen im Rahmen der vorgegebenen Zielsetzung keine Entwicklungsschwerpunkte dar und werden deshalb bei den weiteren Entwicklungsarbeiten nicht weiter betrachtet.

Anforderungen an die Entwicklung des Simulationsbaukastens		Verfahren und Systeme als Entwicklungsgrundlage				Entwicklungsschwerpunkte
		Stochastische Verfahren	Analytische Verfahren	Prozedurale Simulationsmodelle	Objektorientierte Simulationsmodelle	
Modell-erstellung	Begrenzter Zeitbedarf zur Simulationsdurchführung	—	—	—	○	X
	Abbildung aller Transport- und Speichersysteme	—	—	○	○	X
	Geringer Aufwand für die Modellerstellung und Modelländerung	—	—	—	○	X
	Genaue Abbildung automatisierter Materialflusssysteme	—	○	○	○	X
	Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse	—	—	○	○	X
Fertigungs-technik	Abbildung aller möglichen Fertigungsprozesse und Losarten	—	○	+	+	
	Abbildung aller Fertigungsgerätetypen	—	—	○	+	
	Berücksichtigung dynamischer Einflussgrößen	○	—	+	+	
	Abbildung der Fertigungslayoutvarianten	—	○	+	+	
	Einfache Modellierung der Materialflüsse	—	○	○	+	
Anforderungen	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">+ erfüllt</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">○ teilweise erfüllt</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">— nicht erfüllt</div> </div> <p style="text-align: center;">Das ausgewählte Lösungssystem ist dunkel hinterlegt</p>					

Bild 17: Bewertung bestehender Lösungsverfahren und Simulationssysteme anhand der ermittelten Anforderungen und Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte bei der Entwicklung des Simulationsbaukastens

Die Bewertung zeigt weiter, dass analytische und stochastische Verfahren für den vorliegenden Anwendungsfall nicht geeignet sind. Die abgeleiteten Anforderungen können in ihrer Gesamtheit nur in der Simulation berücksichtigt werden. So können nur bei der Simulation komplette Fabrikabläufe nachgebildet, die dynamischen Zusammenhänge berücksichtigt und alle Fertigungslayoutvarianten abgebildet werden. Große Defizite bei der Anwendung der Simulationstechnik bestehen aufgrund der großen und komplexen Simulationsmodelle in dem hohen Zeitbedarf für die Simulationsdurchführung, dem Aufwand für die Modellerstellung und Modelländerung sowie bei der Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse.

Die Anwendung der Simulationstechnik ist aufgrund der großen Defizite bei der Berücksichtigung der ermittelten Anforderungen derzeit nur stark eingeschränkt und mit großem Aufwand möglich. Die durchgeführten Untersuchungen und Analysen belegen eindeutig die dringende

Notwendigkeit zur Entwicklung eines Simulationsbaukastens, der die gestellten Anforderungen aus der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung berücksichtigt und mit dem aussagefähige Ergebnisse für eine wirtschaftlich Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme bei einem vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand erzielt werden können.

In *Bild 18* sind die Anforderungen an die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme, die aus Kapitel 2 und der Analyse der Einflussgrößen formuliert wurden, sowie die auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen und Analysen abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkte zusammengefasst. Um eine strukturierte und realitätsbezogene Lösungsfindung zu gewährleisten, werden die Entwicklungsschwerpunkte in die nachfolgenden Kategorien unterteilt:

- In der Kategorie **Leistungsbewertung** sollen im Folgenden die Vor- und Nachteile einer Lösungs- oder Optimierungsvariante bei vorgegebenen Einsatzfällen ermittelt und auf der Basis der gestellten Anforderungen oder der durchgeführten Untersuchungen Bewertungsmöglichkeiten für eine optimale Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme abgeleitet werden.
- Die zu entwickelnden **Lösungskonzepte** basieren auf den erstellten Lösungs- oder Optimierungsvarianten und sollen die Grundlage für die Entwicklung des Simulationsbaukastens und die Automatisierung der Materialflusssysteme darstellen. Zudem sollen sie die wirtschaftliche Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ermöglichen.
- Als Ergebnis der Entwicklungsarbeiten sollen **Leitlinien** erarbeitet werden, die den Planungsablauf unterstützen und vereinfachen. Die zu entwickelnden Leitlinien sollen im Zusammenwirken mit dem Simulationsbaukasten zukünftig die Basis für eine vereinfachte Planung und Auslegung und für eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei der Automatisierung der Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung bilden.
- Die zu entwickelnden **Optimierungsstrategien** werden anhand konkreter Simulationsuntersuchungen auf der Basis einer Modellfabrik abgeleitet und sollen die Optimierung einzelner Teilsysteme sowie des gesamten Materialflusssystems im Sinne der geforderten Zielkriterien bewirken. Die zu entwickelnden Strategien geben Anhaltspunkte für eine wirtschaftliche Optimierung automatisierter Materialflusssysteme und sind damit ein wichtiger Bestandteil bei der Systemoptimierung.

Da für die abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkte derzeit nur unvollständige und unzureichende Lösungsansätze existieren, gelten sie als Mussanforderungen, die im Rahmen der nachfolgenden Entwicklungsarbeiten möglichst vollständig betrachtet und unterstützt werden müssen. Zur Lösungskonzeption werden Methoden eingesetzt, die eine strukturierte Beschreibung der Wirkzusammenhänge sowie der Aufbau- und der Ablaufstrukturen für die einzelnen Teilsysteme ermöglichen. Diese Methoden beeinflussen die Vorgehensweise bei der Entwicklung und haben somit Auswirkungen auf die Wirkungsweise und die spätere Anwendung des Simulationsbaukastens.

Anforderungen an die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung		Entwicklungsschwerpunkte			
		Leistungs- bewertung	Lösungs- konzeption	Leitlinien	Optimierungs- strategien
Materialfluss- automatisierung	Minimierung der Transportvorgänge	X	X	X	
	Minimierung der Speichervorgänge	X	X	X	
	Minimale Loshandhabungen	X	X	X	
	Kleine Wartezeitanteile	X	X	X	
	Geringe Anzahl an Automatisierungssystemen	X	X	X	
	Niedrige Investitionskosten	X	X	X	
	Hybride Systemlösungen in einem Gesamtsystem	X		X	
	Geringe Transportzeiten	X		X	
	Anwendbarkeit für unterschiedliche Layouts	X			
	Flexibilität bei Systemausfall	X			
Transportsysteme	Minimaler Flächenbedarf	X		X	
	Hoher Durchsatz an Fertigungslosen	X		X	
	Minimierung der Transportzeit	X		X	
	Eignung für lange oder kurze Transportstrecken	X		X	
	Höhe der variablen oder fixen Investitionskosten	X		X	
	Flexibilität der Transporttrassen	X		X	
	Einfache Beladung der Fertigungsgeräte	X		X	
	Transport hoher Substratgewichte	X		X	
Speicher- und Handhabungs- systeme	Hohe Frequentierungshäufigkeit	X	X	X	
	Zwischenlagerung bei langen Störungen	X	X	X	
	Speicherkapazitäten für unproduktive Lose	X	X	X	
	Sammlungsmöglichkeiten für Losblöcke	X	X	X	
	Minimierung des Flächenbedarfs im Reinraum	X			
	Optimale Anordnung der Ein-/Ausgabestationen	X	X	X	
	Minimierung der Wartezeit bis zur Einlagerung	X	X	X	
	Überschlägige Berechnung der Kapazitäten	X	X	X	
Automatisierungs- systeme	Optimale Anzahl an Ein-/Ausgabestationen	X	X		X
	Optimierung der Fahrzeugdisposition	X	X		X
	Berücksichtigung von Fahrbereichen	X	X		X
Materialfluss- system	Minimierung der Investitionskosten	X	X		X
	Optimierung der Eingabemenge an Losen	X			X
	Optimierung der Höhe des Umlaufbestandes	X			X
	Berücksichtigung von Prioritätenlose	X			X
Materialfluss- steuerung	Optimierte Auswahl des nachfolgenden Gerätes		X		X
	Optimierte Auswahl des nächsten Loses		X		X

Bild 18: Ableitung und Untergliederung der Entwicklungsschwerpunkte bezogen auf die Kategorien Leistungsbewertung, Lösungskonzeption, Leitlinien und Optimierungsstrategien bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung

3.6 Abgleich der Entwicklungsschwerpunkte mit dem Vorgehen bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung

In *Bild 19* sind das Vorgehen zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung sowie die vorhandenen Hilfsmittel nach dem heutigen Stand dargestellt /Park 2001, Haris 2001a, Bader 1999, Atherton 1996/. Die Ergebnisse basieren auf praktischen Planungsarbeiten und durchgeführten Untersuchungen.

Nr.	Planungsschritte	Planungshilfsmittel	
1	Ermittlung der notwendigen Kapazität an Fertigungsgeräten anhand der Prozessflüsse und des geforderten Substratdurchsatzes	Analytische Verfahren, dynamische Kapazitätssimulationen	X
2	Ermittlung von Layoutvarianten und Auswahl eines Fertigungslayouts unter Berücksichtigung der Reinraumanforderungen	Baurichtlinien, CAD-Systeme, Planungssoftware und Layoutsimulationen	X
3	Ermittlung von Systemlösungen zur Automatisierung der Materialflusssysteme		
3.1	Entwicklung wirtschaftlicher Lösungskonzepte zur Transportautomatisierung	Leistungsbewertung, Lösungskonzepte, Leitlinien	O
3.2	Überschlägige Planung und Auslegung automatisierter Transportsysteme	Analytische Verfahren, Materialflussrechnung	X
3.3	Entwicklung geeigneter Lösungskonzepte zur Integration der Speicher- und Handhabungssysteme	Leistungsbewertung, Lösungskonzepte, Leitlinien,	—
3.4	Überschlägige Planung und Auslegung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme	Berechnungsverfahren	—
3.5	Erstellung der Simulationsmodelle sowie Simulation der entwickelten Lösungskonzepte und des gesamten Produktionsumfeldes	Simulationsbaukasten	—
3.6	Bewertung der unterschiedlichen Lösungskonzepte und Auswahl eines wirtschaftlichen Automatisierungskonzeptes	Leistungsbewertung, Lösungskonzepte, Leitlinien	O
3.7	Optimierung der automatisierten Materialflusssysteme	Leistungsbewertung, Konzepte, Optimierungsstrategien	—
4	Abgleich und Optimierung des ausgewählten Automatisierungskonzeptes mit den Ergebnissen der Kapazitäts-, Layout- und Reinraumplanung	CAD-Systeme, Richtlinien und Planungssoftware	X
5	Festlegung eines Stufenplans für die Realisierung der ausgewählten Automatisierungslösung mit allen Fabrikplanungsteams	Ausschreibungsunterlagen, Baupläne, Richtlinien	X
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">X Hilfsmittel vorhanden</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">O Ansätze vorhanden</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">— keine Hilfsmittel vorhanden</div> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">Die dunkel hinterlegten Felder markieren den Entwicklungsbedarf</p>			

Bild 19: Vorgehensweise bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme und Bewertung bestehender Planungshilfsmittel

Die Planung automatisierter Materialflusssysteme wird in einzelnen Planungsschritten durchgeführt, die zum Teil parallel verlaufen und bis zur Erzielung eines optimalen Planungsergebnisses sukzessive wiederholt und detailliert werden. Für die Abarbeitung jedes einzelnen Planungsschrittes werden Planungshilfsmittel benötigt, die den Planungsablauf unterstützen und vereinfachen.

Die dunkel hinterlegten Felder zeigen den aus den durchgeführten Analysen abgeleiteten derzeitigen Entwicklungsbedarf bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an diesem Entwicklungsbedarf und verfolgt mit ihren Entwicklungsschwerpunkten das Ziel, durch die Entwicklung neuer Lösungen oder die Weiterentwicklung bestehender Lösungsansätze leistungsfähige Hilfsmittel und Softwarewerkzeuge für die einzelnen Planungsschritte zur Verfügung zu stellen. Auf der Basis der durchgeführten Entwicklungsarbeiten ist es zukünftig möglich, die Automatisierung der Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung im Sinne der vorgegebenen Zielkriterien wirtschaftlicher zu gestalten und die Investitionskosten zu minimieren.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass bei der Durchführung der einzelnen Planungsschritte große Defizite bestehen und neu zu entwickelnde Hilfsmittel dringend benötigt werden. Um die vorhandenen Defizite bei der Integration automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme in das Materialflusssystem einer Halbleiter- oder Flachbildschirmfertigung zu beseitigen, müssen Leistungsbewertungen durchgeführt, effiziente neue Lösungskonzepte entwickelt und Leitlinien für eine wirtschaftliche Systemplanung abgeleitet werden. Für die Grobplanung der Speicher- und Handhabungssysteme muss, basierend auf den abgeleiteten Anforderungen, ein Berechnungsverfahren entwickelt werden, das auch aussagefähige Eingangsdaten für die Simulationsuntersuchungen liefert.

Wie die durchgeführten Analysen belegen, muss für die Erstellung der Simulationsmodelle und für die Simulation der entwickelten Automatisierungskonzepte ein Simulationsbaukasten entwickelt werden, der die ermittelten Anforderungen berücksichtigt und das gesamte Produktionsumfeld abbildet. Um wirtschaftliche Konzepte zur Transportautomatisierung erstellen und aus den während des Planungsablaufs erstellten Lösungskonzepten ein wirtschaftliches Automatisierungskonzept auswählen zu können, müssen auch hier teilweise bestehende Leistungsbewertungen, Lösungskonzepte und Leitlinien vertieft und weiterentwickelt werden, damit eine effizientere Ausführung der einzelnen Planungsschritte ermöglicht wird.

Für die Optimierung der automatisierten Materialflusssysteme müssen anhand der ermittelten Anforderungen Leistungsbewertungen durchgeführt sowie Lösungskonzepte und Optimierungsstrategien entwickelt werden, um die Systeme hinsichtlich der geforderten Zielkriterien optimieren zu können. Der Abgleich der Entwicklungsschwerpunkte mit dem Vorgehen bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung zeigt eindeutig, dass die Untergliederung der Entwicklungsschwerpunkte in die Kategorien Leistungsbewertung, Lösungskonzeption, Leitlinien und Optimierungsstrategien notwendig ist und wesentlich zur Erreichung der gestellten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beiträgt.

4 Entwicklung des Simulationsbaukastens zur Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme

4.1 Vorgehensweise zur Entwicklung des Simulationsbaukastens und der Teilsysteme

4.1.1 Modellierungsmethode zur Darstellung der Aufbaustrukturen

Die in *Bild 17* durchgeführte Bewertung bestehender Lösungsverfahren und Simulationssysteme zeigt, dass für die Darstellung der Aufbaustrukturen des Simulationsbaukastens eine objektorientierte Modellierungsmethode am besten geeignet ist. In der Literatur existieren hierfür eine Reihe verschiedener Methoden /Stein 1997/. Die Anforderungen eines bestimmten Problembereiches können durch die Anwendung einer objektorientierten Modellierungsmethode identifiziert, analysiert und spezifiziert werden, wozu sich die Modellierungsmethoden OOA, OOD /Coad 1998, Coad 1994/ und OMT /Rumbaugh 1993/ als besonders geeignet erweisen.

Um einen Problembereich in Form von Objektmodellen abbilden zu können, wird vom internationalen Verband der Halbleiterindustrie (SEMI) insbesondere die Anwendung der Modellierungsmethode OMT /SEMI 2000a/ mit der international standardisierten Beschreibungssprache UML /OMG UML 2001, Burkhardt 1999/ empfohlen. Ein Objektmodell umfasst dabei für einen konkreten Anwendungsfall eine Anzahl integrierter, wieder verwendbarer und erweiterbarer Objektklassen, welche durch Relationen (Vererbung, Assoziation und Aggregation) miteinander verbunden werden. Aus Objektklassen abgeleitete Objekte werden als Objektinstanzen bezeichnet.

Da der zu entwickelnde Simulationsbaukasten mit seinen Teilsystemen ausschließlich in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung eingesetzt wird, wird für die weiteren Entwicklungsarbeiten der objektorientierte Modellierungsansatz nach der Object Modeling Technique (OMT) mit der Beschreibungssprache Unified Modeling Language (UML) ausgewählt und eingesetzt.

Das folgende *Bild 20* verdeutlicht die Anwendung der UML-Notation.


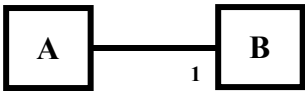
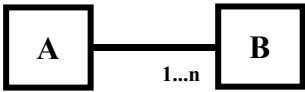
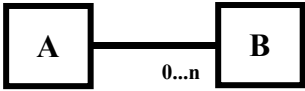
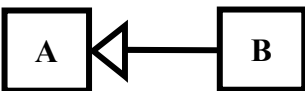
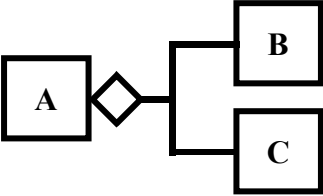
Klassen und Relationen	Aufbaustruktur	Beschreibung
Klasse		<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung von Eigenschaften durch Attribute Zuordnung eines bestimmten Verhaltens über Methoden
Assoziation		<ul style="list-style-type: none"> Ein A ist genau einem B zugeordnet
		<ul style="list-style-type: none"> Ein A ist einem oder mehreren B zugeordnet
		<ul style="list-style-type: none"> Ein A ist keinem, einem oder mehreren B zugeordnet
Vererbung		<ul style="list-style-type: none"> B erbt die Eigenschaften von A
Aggregation		<ul style="list-style-type: none"> A setzt sich aus B und C zusammen

Bild 20: Aufbaustruktur und Beschreibung der UML-Notation

4.1.2 Funktionale Beschreibung der Ablaufstrukturen

Mit Hilfe einer funktionalen Betrachtungsweise wird die Ablaufstruktur automatisierter Materialflusssysteme in einzelne Funktionen und Funktionssequenzen unterteilt, um Rückschlüsse auf die Teilfunktionen "Transportieren", "Speichern" und "Handhaben" gewinnen zu können. Damit ist es möglich Ablaufanalysen durchzuführen, mit denen Aussagen zur optimalen Verknüpfung automatisierter Einzelfunktionen zu einem optimierten Gesamtsystem getroffen werden können /Martin 1998, Westkämper 1977, Junghans 1971/. Eine Funktion beschreibt dabei den allgemeinen Wirkzusammenhang zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems zum Erfüllen einer Aufgabe, während eine Funktionssequenz eine Gruppe von Funktionen umfasst, die in einem zeitlichen bzw. logischen Zusammenhang stehen /VDI 1974/. Dabei werden die Eigenschaftsmerkmale einer Funktion durch ihre Funktionsattribute beschrieben. Die Verknüpfung aller Funktionen bzw. Funktionssequenzen eines oder mehrerer Automatisierungssysteme zur Erfüllung einer Gesamtfunktion wird als Funktionsnetz bezeichnet und die Gesamtheit aller Funktionen, Funktionssequenzen und Funktionsnetze als Funktionsstruktur /Kaun 1997/.

Die verwendeten Einzelfunktionen und die zugehörigen Symbole zur funktionalen Beschreibung der Materialflussabläufe sind in Bild 21 dargestellt /Martin 1998, VDI 1990, VDI 1974/.

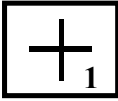
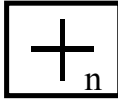
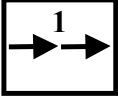
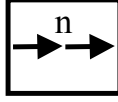

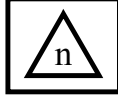
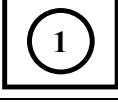
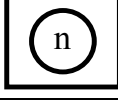
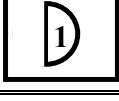
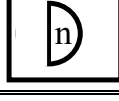
Materialflussfunktionen		Ablaufstruktur
Einzelfunktionen	Materialflussrichtung	→
	Fertigen	 ... 
	Transport	 ... 
	Speichern	 ... 
	Handhabung	 ... 
	Warten	 ... 

Bild 21: Funktionale Gliederung der Materialflussabläufe zur Beschreibung der Ablaufstruktur

Zur zeitlichen Beschreibung der Materialflussabläufe werden die Elementarfunktionen “Fertigen“, “Transport“, “Speichern“, “Handhaben“ und “Warten“, eingeführt und fortlaufend durchnummeriert. Sie charakterisieren die zur Automatisierung der Materialflüsse eingesetzten Systeme:

- Fertigungsgeräte (für Bearbeitungs- und/oder Prüfaufgaben)
- Transportsysteme (siehe Lösungsvarianten 9, 10 und 11)
- Speichersysteme (siehe Lösungsvarianten 12, 13 und 14)
- Handhabungssysteme
- Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten und Speichersystemen

Handhabungssysteme können dabei entweder als autonom arbeitendes System ausgeführt sein (z.B. als Liftstation) oder integrierter Bestandteil in einem Speichersystem oder einem Transportfahrzeug sein.

4.2 Konzeption des Simulationsbaukastens

Im Folgenden werden mit Hilfe der ausgewählten Modellierungsmethode Lösungsvarianten entwickelt, um den Aufbau und die Strukturierung der Simulationsmodelle festzulegen. Die Entwicklung des Simulationsbaukastens erfolgt durch die schrittweise Entwicklung der Lösungsvarianten, welche anhand der gestellten Anforderungen bewertet werden. In *Bild 22* ist der prinzipielle Aufbau des Simulationsbaukastens mit seinen wichtigsten Teilsystemen dargestellt.

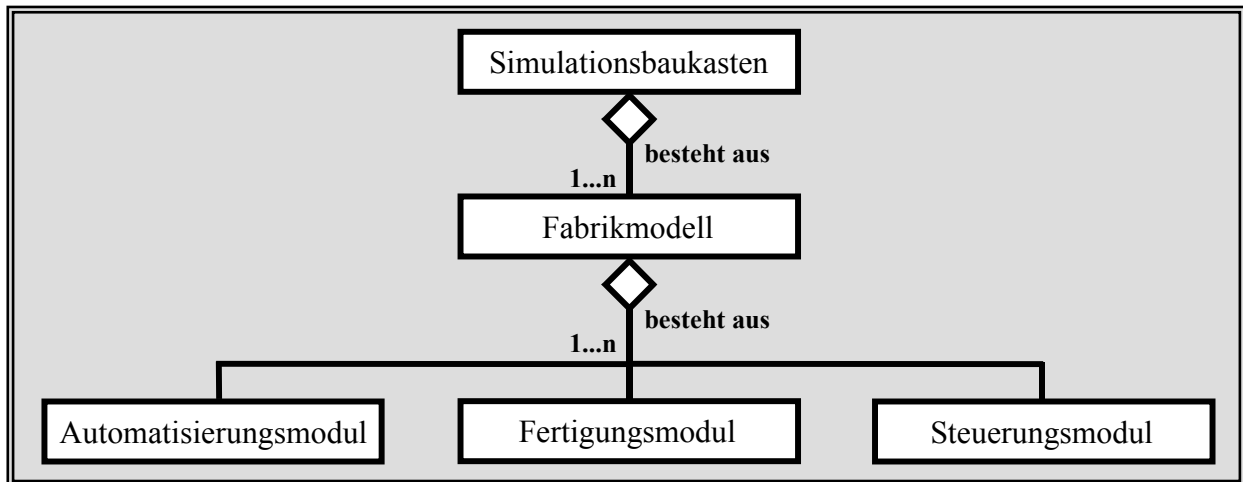


Bild 22: Allgemeiner Aufbau des Simulationsbaukastens

Der *Simulationsbaukasten* besteht aus einem oder mehreren *Fabrikmodellen*. Diese Fabrikmodelle bilden die Produktions- und Materialflusssysteme in ihrer Gesamtheit ab. Sie setzen sich aus einem oder mehreren Modulen der Objektklassen *Automatisierung*, *Fertigung* und *Steuerung* zusammen. Diese Modellierung ermöglicht die Vererbung wesentlicher und gleicher Attribute auf weitere Subklassen. Das *Automatisierungsmodul* bildet den Kernpunkt der Entwicklungsarbeiten und repräsentiert sämtliche zur Organisation, Durchführung und Steuerung der Materialflussabläufe notwendigen Automatisierungssysteme, Transporthilfsmittel und Steuerungssysteme, wie z.B. Transportfahrzeuge, Transportbehältnisse, Speichersysteme, Materialflussteuerung, Dispositionsstrategien oder Ein-/Ausgabesysteme.

Im *Fertigungsmodul* sind alle wichtigen Einflussgrößen aus der Produktion enthalten, die zur Durchführung der Fertigungsaufgaben notwendig sind, wie z.B. Fertigungsgeräte, Fertigungslayout, Prozesstechnik und Maschinensteuerungen. Das *Steuerungsmodul* beinhaltet alle notwendigen Steuerungssysteme, Informationen und Daten, die auf übergeordneter Ebene für Organisation, Steuerung, und Überwachung des Produktionsablaufes notwendig sind, wie z.B. Fertigungsdaten, Arbeitspläne, Produktionsplanung und -steuerung oder Fertigungssteuerung. Bei den weiteren Arbeiten liegt der Fokus gemäß den abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkten in der Entwicklung und Strukturierung des Moduls zur Materialflussautomatisierung.

4.2.1 Entwicklung von Lösungsvarianten zur Abbildung automatisierter Materialflusssysteme

Lösungsvariante 1: Vereinfachte Abbildung der Transport- und Speichersysteme

Der hier gewählte Modellierungsansatz zur Strukturierung des Simulationsbaukastens basiert auf der vereinfachten Darstellung der Transport- und Speichersysteme im Automatisierungsmodul. Bei dieser Lösungsvariante werden die Transport- und Speichervorgänge nur vereinfacht auf der Basis von Durchschnittswerten für die zeitlichen Abläufe abgebildet (*Bild 23*).

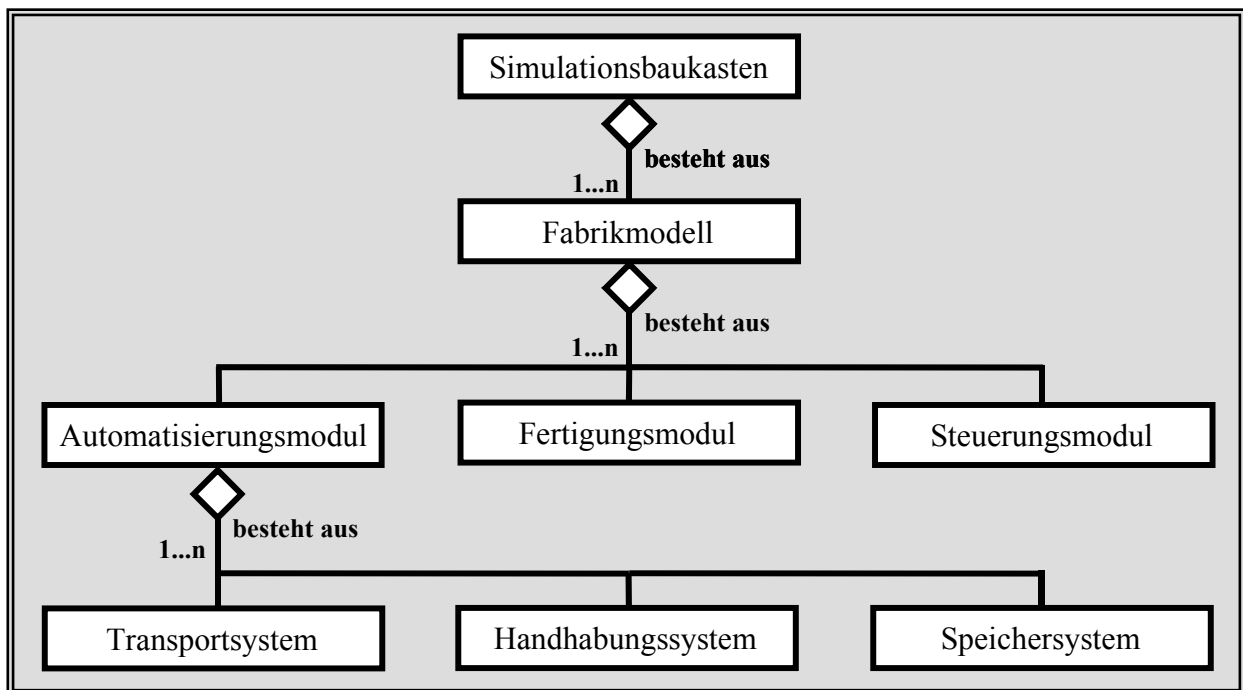


Bild 23: Vereinfachte Abbildung der Transport- und der Speichersysteme

Der hier entwickelte Lösungsansatz erweitert das Modul zur Materialflussautomatisierung des Simulationsbaukastens um die Objektklassen *Transportsysteme*, *Speichersysteme* und *Handhabungssysteme*, die bei Bedarf in ihrer Funktionalität weiter detailliert werden können. Das *Transportsystem* führt die Materialtransporte auf definierten Wegstrecken zwischen den Fertigungsgeräten und Speichersystemen durch. In dieser Lösungsvariante wird der Materialtransport vereinfacht durch die Transportstrecke, die mittlere Transportzeit und die Transportkapazität im Simulationsmodell abgebildet.

Das *Speichersystem* wird ebenfalls vereinfacht durch seine Lagerkapazität und eine mittlere Handhabungszeit für die Ein- und Auslagerungsvorgänge im Modell abgebildet. *Handhabungssysteme* in der Ausführungsform als Automatisierungssystem für die Einzelscheibehandhabung werden in ihrer Funktionalität einem Fertigungsgerät mit einem definierten Ablauf, einer vorgegebenen Kapazität und einem definiertem Zeitverbrauch gleichgesetzt und im Folgenden nicht weiter betrachtet. Für diese Systeme existieren in der Literatur Lösungsansätze zur Handhabung

und Sortierung von Substraten mit einem Handhabungssystem /Kaufmann 2002, Herzog 1997, Kaun 1997/.

Lösungsvariante 2: Detaillierte Abbildung der Transportsysteme und vereinfachte Abbildung der Speichersysteme

Die Grundlage dieser Lösungsvariante ist die detaillierte Abbildung der Transportsysteme mit ihren Einzelelementen und die vereinfachte Darstellung der Speichersysteme. Die aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Transportsysteme besitzen ein oder mehrere *Transportressourcen* (Bild 24). Die Anwendung dieser Lösungsvariante erlaubt die detaillierte Abbildung der Transportressourcen und ist für die Planung und Auslegung automatisierter Transportsysteme besonders gut geeignet.

Die entwickelte Lösungsvariante 2 ermöglicht durch die Einführung der Objektklasse *Transportressource* die detailgenaue Darstellung und Untergliederung eines Transportsystems in seine einzelnen Bestandteile und Transportfunktionen. Aus mehreren Teilsystemen und Einzelkomponenten bestehende Transportsysteme beinhalten dementsprechend auch ein oder mehrere verschiedene Transportressourcen. Eine Transportressource stellt die abstrakte Oberklasse für modulare und wieder verwendbare Systemeinheiten eines Transportsystems dar. Diese Zusammenhänge gelten auch für alle weiteren Entwicklungsschritte im Rahmen der Entwicklung des Simulationsbaukastens, bei denen eine Oberklasse *Ressource* zur Beschreibung elementarer Zusammenhänge und Funktionen eingeführt wird und die ebenfalls wesentliche Eigenschaften an weitere Subklassen vererbt.

Die Transportressource vererbt wesentliche Eigenschaften an die Subklassen *Transportkurs*, *Fahrzeugressource*, *Rollenbahn*, *Transportsteuerung*, *Handhabungsressource* und *Ein-/Ausgabe-ressource*. Der *Transportkurs* definiert den Transportweg und die Wegstrecke der durchzuführenden Transporte. Die Transporte werden unstetig mit Hilfe von *Fahrzeugressourcen* oder stetig durch den Einsatz einer *Rollenbahn* durchgeführt. Die *Transportsteuerung* steuert und überwacht alle am Transportablauf beteiligten Teilsysteme und beinhaltet Strategien für eine optimale Fahrzeugauswahl, Streckenplanung, Batterieladung, etc. Für den Transport der Substrate werden spezielle Kassetten und Transportbehälter eingesetzt, die von einer in das Transportfahrzeug integrierten *Handhabungsressource* an die *Ein-/Ausgaberessourcen* von Fertigungsgeräten und Speichersystemen übergeben werden.

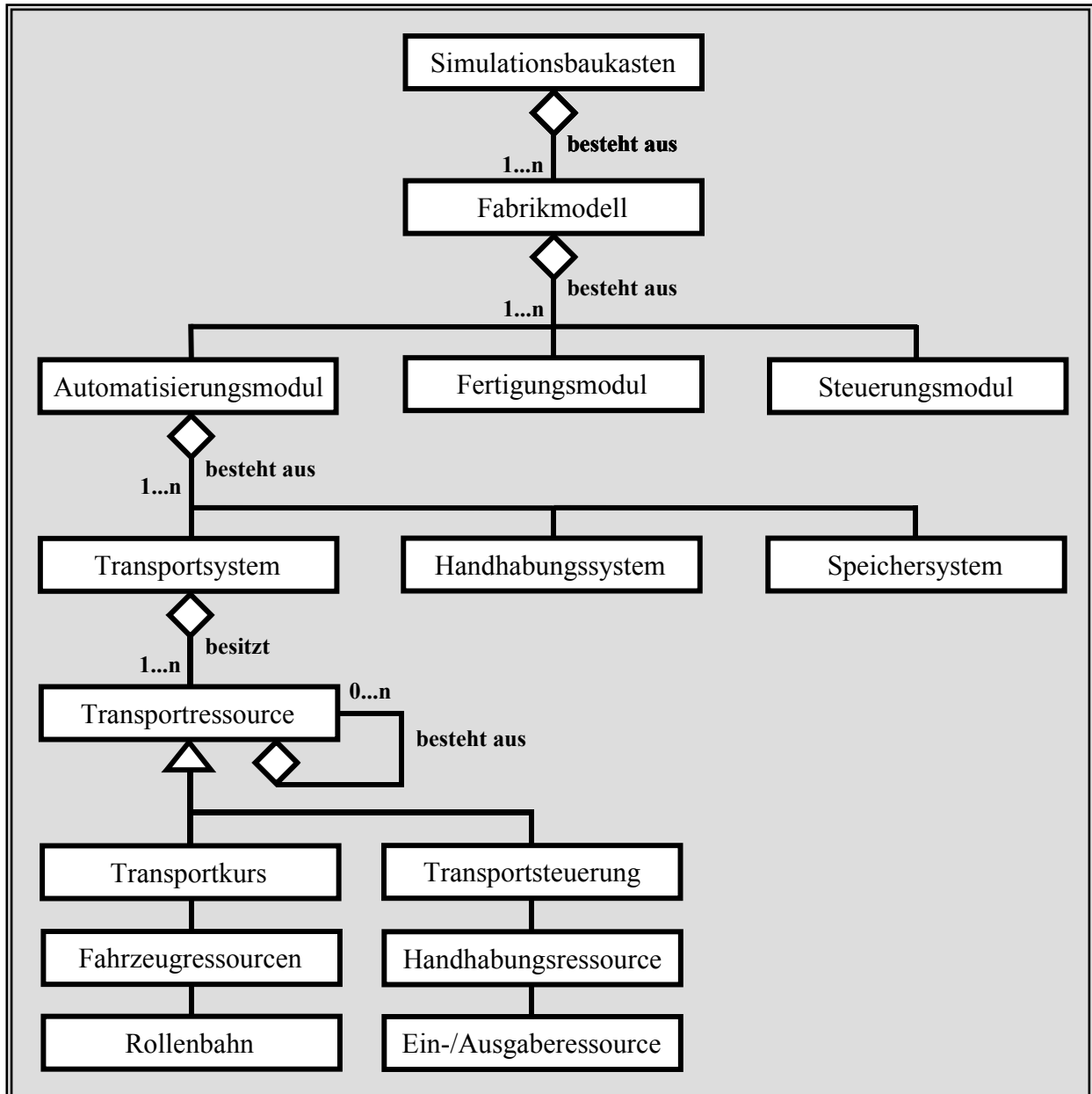


Bild 24: Detaillierte Abbildung der Transport- und vereinfachte Abbildung der Speichersysteme

Lösungsvariante 3: Detaillierte Abbildung der Transport- und Speichersysteme

Der Schwerpunkt dieser entwickelten Lösungsvariante liegt in der detaillierten Abbildung sowohl der Transport- als auch der Speichersysteme mit allen notwendigen Einzelressourcen in einem Fabrikmodell (Bild 25). Für die Planung und Auslegung der Transport- und Speichersysteme wird durch diese Maßnahme ein Optimum an Detaillierung erzielt.

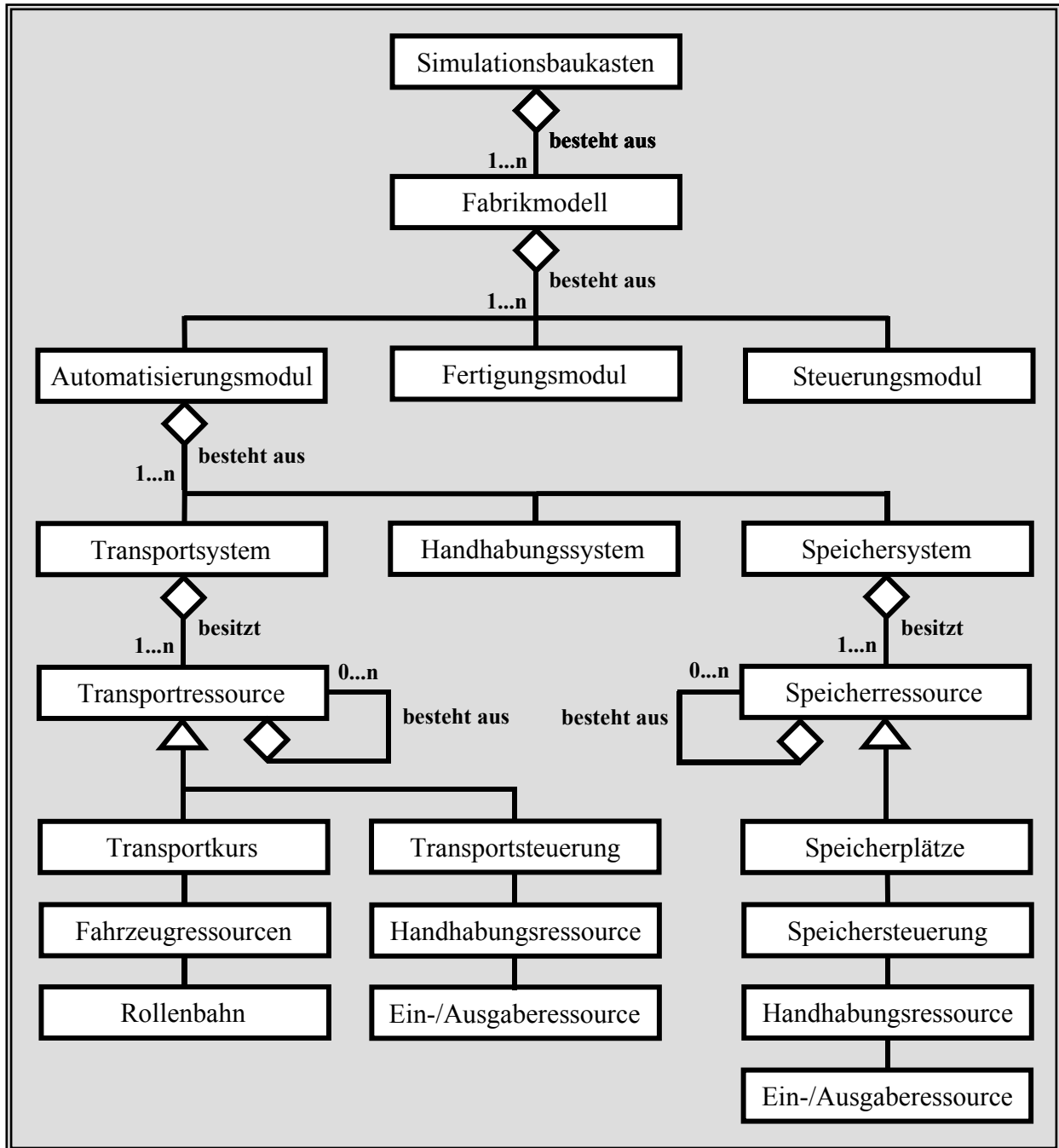


Bild 25: Detaillierte Abbildung der Transport- und Speichersysteme

Zusätzlich zur Lösungsvariante 2 werden in diesem Modellierungsansatz die Speichersysteme entsprechend ihren Einzelementen in unterschiedliche *Speicherressourcen* unterteilt, mit deren Hilfe die Speicher- und Handhabungsvorgänge detailliert abgebildet werden können. Die Oberklasse *Speicherressource* vererbt wesentliche Eigenschaften an die Subklassen *Speicherplätze*, *Speichersteuerung*, *Handhabungsressource* und *Ein-/Ausgaberessource*.

Die *Speicherplätze* dienen zur Aufnahme und Zwischenlagerung der Kassetten und Transportbehältnisse, wobei eine Speicherressource eine bestimmte Anzahl an Speicherplätzen besitzt. Die Behältnisse werden an den *Ein-/Ausgaberessourcen* zur Einlagerung in die Speicherplätze bereit-

gestellt. Die Handhabungsvorgänge zwischen der Ein-/Ausgaberesource und den Speicherplätzen bzw. zwischen zwei Ein-/Ausgaberesourcen werden von der *Handhabungsressource* ausgeführt. Die *Speichersteuerung* steuert und überwacht die Speicher- und Handhabungsvorgänge und wählt die optimale Handhabungsstrategie aus.

Lösungsvariante 4: Detaillierte Abbildung der Transport- und vereinfachte Abbildung der Speichersysteme im Fabrikmodell in Kombination mit einer detaillierten Abbildung der Speichersysteme in einem Speichermodell

Der Kernpunkt der entwickelten Lösungsvariante ist die detaillierte Abbildung der Transportsysteme mit allen Einzelementen und die vereinfachte Darstellung der Speichersysteme in einem Fabrikmodell analog zur Lösungsvariante 2. Die Ungenauigkeiten bei der vereinfachten Darstellung der Speicher- und Handhabungsvorgänge werden durch den kombinierten Einsatz eines Speichermodells parallel zum Fabrikmodell kompensiert, mit dem ein oder mehrere Speichersysteme zusätzlich detailgenau abgebildet und simuliert werden können (*Bild 26*).

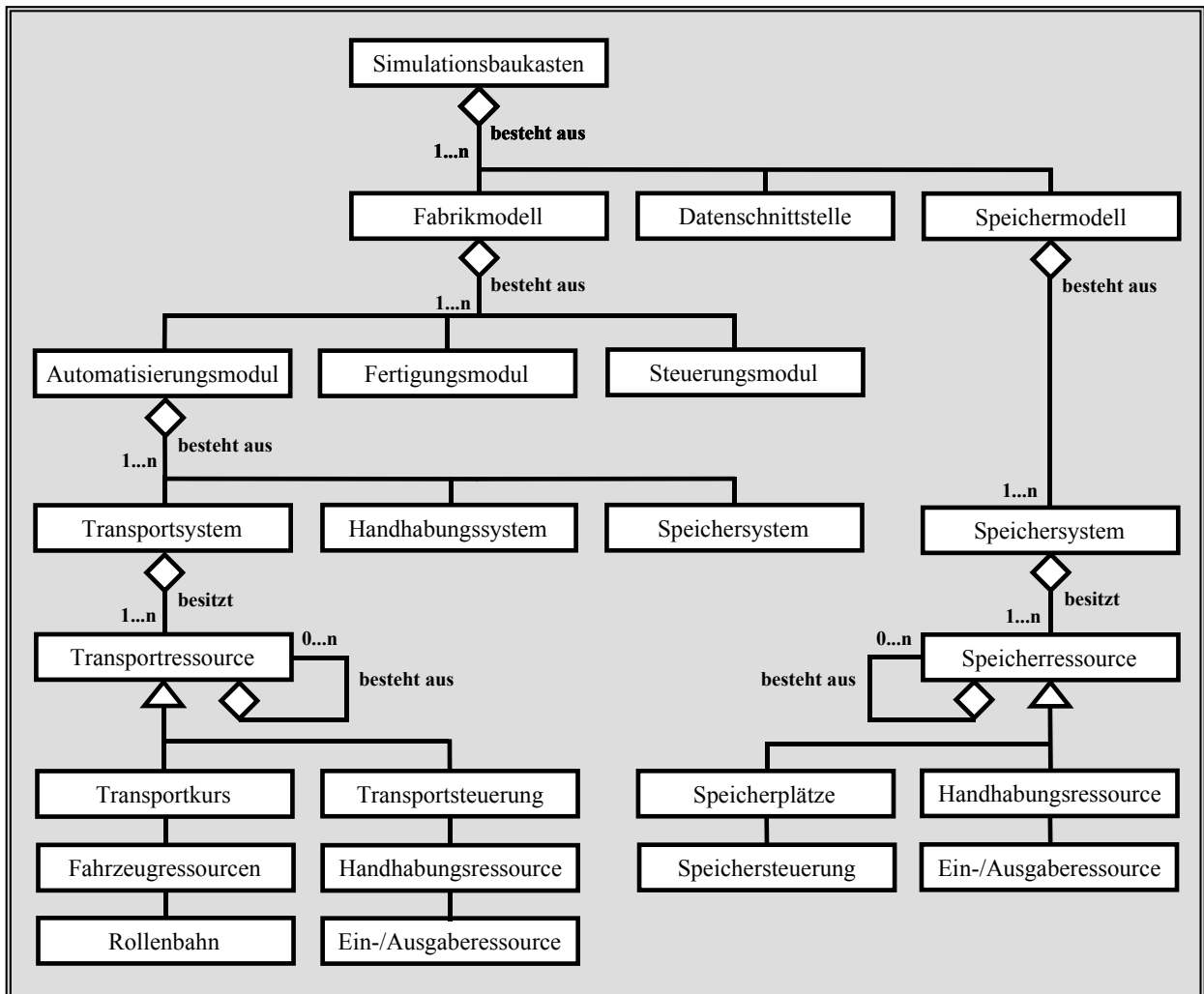


Bild 26: Detaillierte Abbildung der Transportsysteme in einem Fabrikmodell in Kombination mit einer detaillierten Abbildung der Speichersysteme in einem Speichermodell

Zur besseren Untergliederung werden zusätzlich die Objektklassen *Speichermodell* und *Datenschnittstelle* eingeführt, die über definierte Schnittstellen Daten miteinander austauschen können. Im *Speichermodell* sind die Speichersysteme analog zur Lösungsvariante 3 mit allen notwendigen Einzelressourcen abgebildet. Dadurch können hoch ausgelastete Speichersysteme zusätzlich detailgenau im Speichermodell simuliert werden, wobei die Zeitpunkte der Ein- und Auslagerungsvorgänge in ein Speichersystem mit Hilfe einer spezifizierten *Datenschnittstelle* vom Fabrikmodell zum Speichermodell übertragen werden. Die genaueren Simulationsergebnisse des Speichermodells werden dann mit den Ergebnissen des Fabrikmodells abgeglichen, um eine optimale Planung und Auslegung der Speichersysteme zu gewährleisten.

Um Überlastungen des Speichersystems darstellen zu können, wird ein Nachlauffaktor definiert. Dieser Faktor beschreibt die zeitliche Verzögerung zwischen dem Speichermodell und dem Fabrikmodell bei der Ein- und Auslagerung der Fertigungslose. Besitzt der Nachlauffaktor den Wert Null, tritt keine zeitliche Verzögerung auf und die Kapazität des simulierten Speichersystems ist ausreichend, wobei eine Überdimensionierung vermieden werden muss.

4.2.2 Leistungsbewertung und Auswahl einer geeigneten Lösungsvariante

Die Leistungsbewertung der vier Lösungsvarianten zur Entwicklung des Simulationsbaukastens erfolgt anhand der ermittelten Anforderungen und ist in *Bild 27* dargestellt. Nur die Lösungsvarianten 3 und 4 unterstützen die Forderungen nach der Abbildung aller Transport- und Speichersysteme sowie der genauen Abbildung automatisierter Materialflusssysteme und sind deshalb als Basis für die Entwicklung des Simulationsbaukastens geeignet. Trotz der dadurch bedingten Modellgröße ist eine schnelle Erstellung der Simulationsmodelle für die praktische Arbeit mit dem Simulationsbaukasten unverzichtbar. Um neue Erkenntnisse und Simulationsergebnisse während des Planungsablaufs berücksichtigen zu können, besteht zusätzlich die Forderung nach einem geringen Aufwand für die Erstellung und die Änderung der Simulationsmodelle. Diese Anforderung schließt die Anwendung der Lösungsvariante 3 aus.

Während des Planungsablaufs zur Auslegung der Transport- und Speichersysteme müssen iterativ sehr viele Simulationsläufe zur Optimierung der erstellten Simulationsmodelle durchgeführt werden. Ein begrenzter Zeitbedarf für die Simulationsdurchführung in Verbindung mit der Ermittlung aussagefähiger Simulationsergebnisse sind weitere wichtige Anforderungen, die von der Lösungsvariante 3 nicht oder nur teilweise erfüllt werden. Als Folgerung aus der durchgeführten Bewertung ergibt sich, dass der Aufbau des Simulationsbaukastens nach dem Prinzip der Lösungsvariante 4 mit einem Fabrik- und einem Speichermodell für die Planung und Auslegung der Transport- und Speicherkapazitäten am besten geeignet ist. Die Leistungsfähigkeit der Simulationssoftware und der eingesetzten Hardware steigt in der Zukunft weiter stark an, so dass auch die Anforderungen an eine schnelle Modellerstellung und Modelländerung sowie an einen möglichst kurzen Zeitbedarf für die Simulationsdurchführung absehbar vollständig erfüllt werden.

Anforderungen an die Entwicklung des Simulationsbaukastens	Lösungsvarianten			
	Variante 1: Vereinfachte Abbildung von Transport- und Speichersystemen	Variante 2: Detaillierte Abbildung der Transportsysteme	Variante 3: Detaillierte Abbildung von Transport- und Speichersystemen	Variante 4: Detaillierte Abbildung der Transportsysteme und zusätzliches Speichermodell
Begrenzter Zeitbedarf zur Simulationsdurchführung	+	0	-	0
Abbildung aller Transport- und Speichersysteme	-	0	+	+
Geringer Aufwand für die Modellerstellung und Modelländerung	+	0	-	0
Genaue Abbildung automatisierter Materialflusssysteme	-	0	+	+
Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse	-	-	0	+
Anforderungen	+ erfüllt	0 teilweise erfüllt	- nicht erfüllt	
Die ausgewählte Lösungsvariante ist dunkel hinterlegt				

Bild 27: Leistungsbewertung der entwickelten Lösungsvarianten zur Konzeption des Simulationsbaukastens anhand der ermittelten Anforderungen

4.3 Entwicklung von Lösungskonzepten zur wirtschaftlichen Automatisierung der Materialflusssysteme

4.3.1 Entwicklung von Funktionssequenzen und Funktionsketten

Um die Materialflussabläufe wirkungsvoll beschreiben zu können, müssen Funktionssequenzen und Funktionsketten entwickelt werden, die auf den in *Bild 21* beschriebenen, elementaren Materialflussfunktionen basieren und eine Strukturierung des Gesamtablaufes in seine zeitlichen und funktionellen Bestandteile ermöglichen. Diese Funktionssequenzen sind abhängig von der Ausführung und Auslegung der Automatisierungssysteme und müssen für jeden Einsatzfall angepasst werden. Dazu wird die Ablaufstruktur des Materialflusses aus der Sicht eines Fertigungsloses betrachtet und in einzelne Fertigungs-, Transport-, Speicher-, Handhabungs- und Wartezeitvorgänge zerlegt, die beim Durchlauf eines Loses durch die Fertigung ausgeführt werden.

Die Entwicklung eines geeigneten Automatisierungskonzeptes erfolgt anhand einer Funktionskette, welche alle Funktionselemente und Funktionssequenzen von der Bereitstellung eines Loses an einem Fertigungsgerät bis zur Bereitstellung am nächsten Fertigungsgerät beinhaltet und sämtliche Übergabeschnittstellen zwischen den Automatisierungssystemen und den Fertigungsgeräten berücksichtigt. Die strukturelle Beschreibung der Funktionssequenzen ermöglicht den Aufbau von Funktionsketten und die Entwicklung von Lösungsvarianten zur Automatisierung der Materialflusssysteme. Auf der Basis der entwickelten Funktionsketten werden dann Lösungsvarianten konzipiert, deren Leistungsfähigkeit anhand der vorgegebenen Anforderungen bewertet und ein geeignetes Automatisierungskonzept ausgewählt.

4.3.2 Entwicklung von Lösungsvarianten

Im Folgenden werden Lösungsvarianten für die Automatisierung der Materialflussabläufe entwickelt, welche die wirtschaftliche Planung und Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme ermöglichen. Die Grundlage der Entwicklungsarbeiten bilden die für die Automatisierung der Materialflusssysteme am besten geeigneten und am meisten eingesetzten Tunnelreindräume. Die angewandte Vorgehensweise zur Entwicklung der Lösungsvarianten kann auch für andere Layoutvarianten angewandt werden. Die Zielsetzung bei der Entwicklung dieser Varianten ist die Verringerung der notwendigen Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge für den automatisierten Materialtransport von einem Fertigungsgerät zum nächsten.

Die Entwicklung der Varianten erfolgt anhand der auf den Elementarfunktionen basierenden Funktionssequenzen und Funktionsketten, die für die Beschreibung der unterschiedlichen Materialflussabläufe eingesetzt werden. Um die Leistungsbewertung der entwickelten Lösungsvarianten zu unterstützen, wird für alle entwickelten Lösungsvarianten die notwendige Anzahl an Elementarfunktionen ermittelt.

Lösungsvariante 5: Autonome Transportsysteme in den Fertigungsbereichen und im Zentralkorridor

Die Lösungsvariante 5 ist durch den Einsatz autonomer Transportsysteme in jedem Fertigungsbereich und im Zentralkorridor gekennzeichnet (*Bild 28*). Für die Losübergabe zwischen den verschiedenen Transportsystemen werden Speichersysteme eingesetzt, die über eine hohe Handhabungsgeschwindigkeit verfügen und eine Verknüpfung der Transportsysteme auch bei einer großen Anzahl an Handhabungen ermöglichen. Wie der Aufbau der Funktionskette zeigt, werden für den Lostransport zwischen den beiden Fertigungsgeräten drei Transportsysteme und zwei Speichersysteme mit insgesamt 21 Einzelfunktionen zur Durchführung der Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge benötigt.

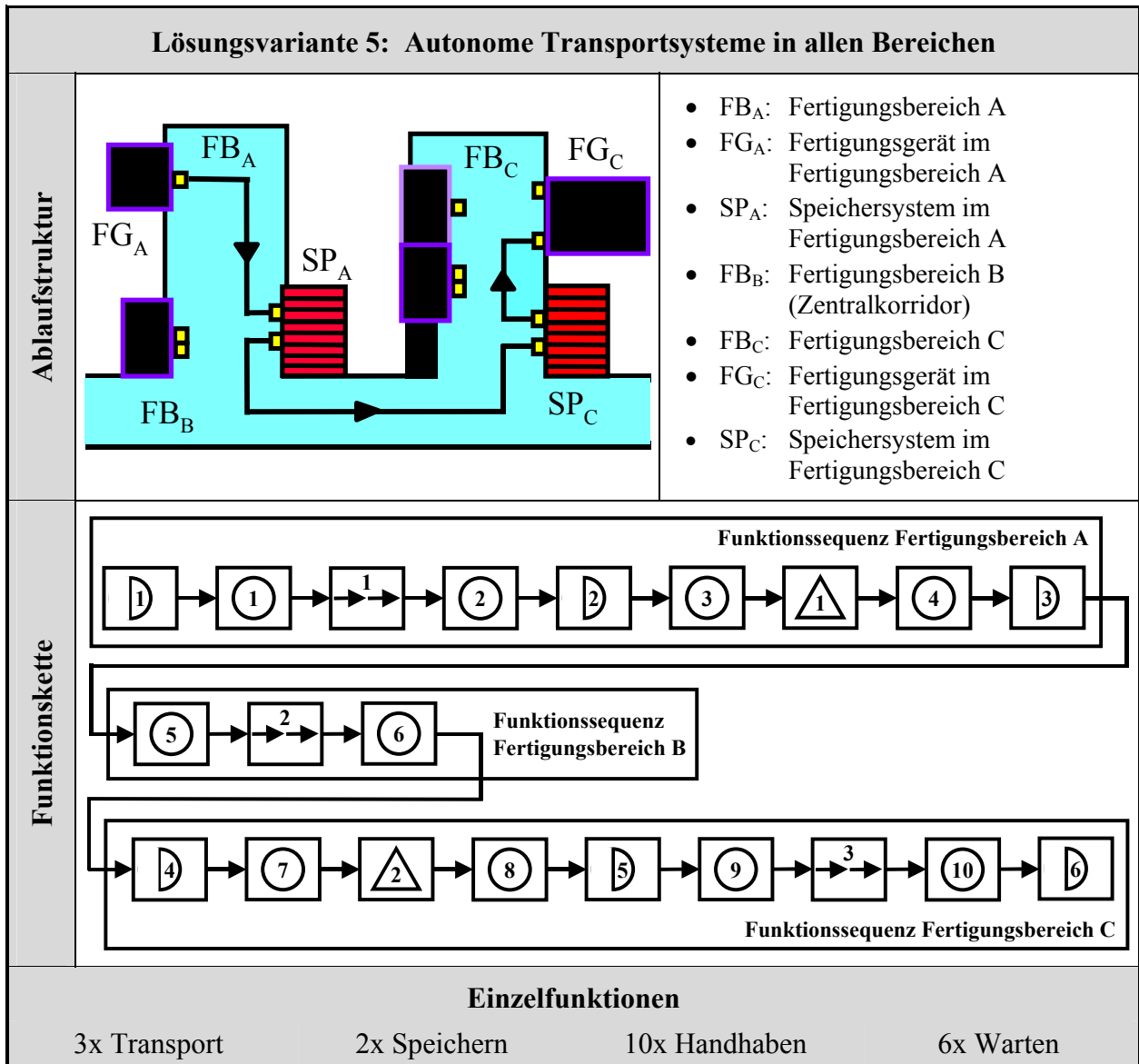


Bild 28: Funktionskette zur Darstellung der Ablaufstruktur beim Einsatz autonomer Transportsysteme in jedem Fertigungsbereich und im Zentralkorridor

Lösungsvariante 6: Autonome Transportsysteme in den Fertigungsbereichen und Speichersysteme zur Transportverknüpfung im Zentralkorridor

Bei der Lösungsvariante 6 werden in den Fertigungsbereichen autonome Transportsysteme eingesetzt, wobei im Gegensatz zur Lösungsvariante 5 kein Transportsystem im Zentralkorridor vorhanden ist. Hier werden die anfallenden Transportaufgaben von Speichersystemen ausgeführt, die auch für die Verknüpfung der Transportsysteme in den Fertigungsbereichen zuständig sind. Die graphische Darstellung der Ablaufstruktur und die zugehörige Funktionskette zeigt Bild 29.

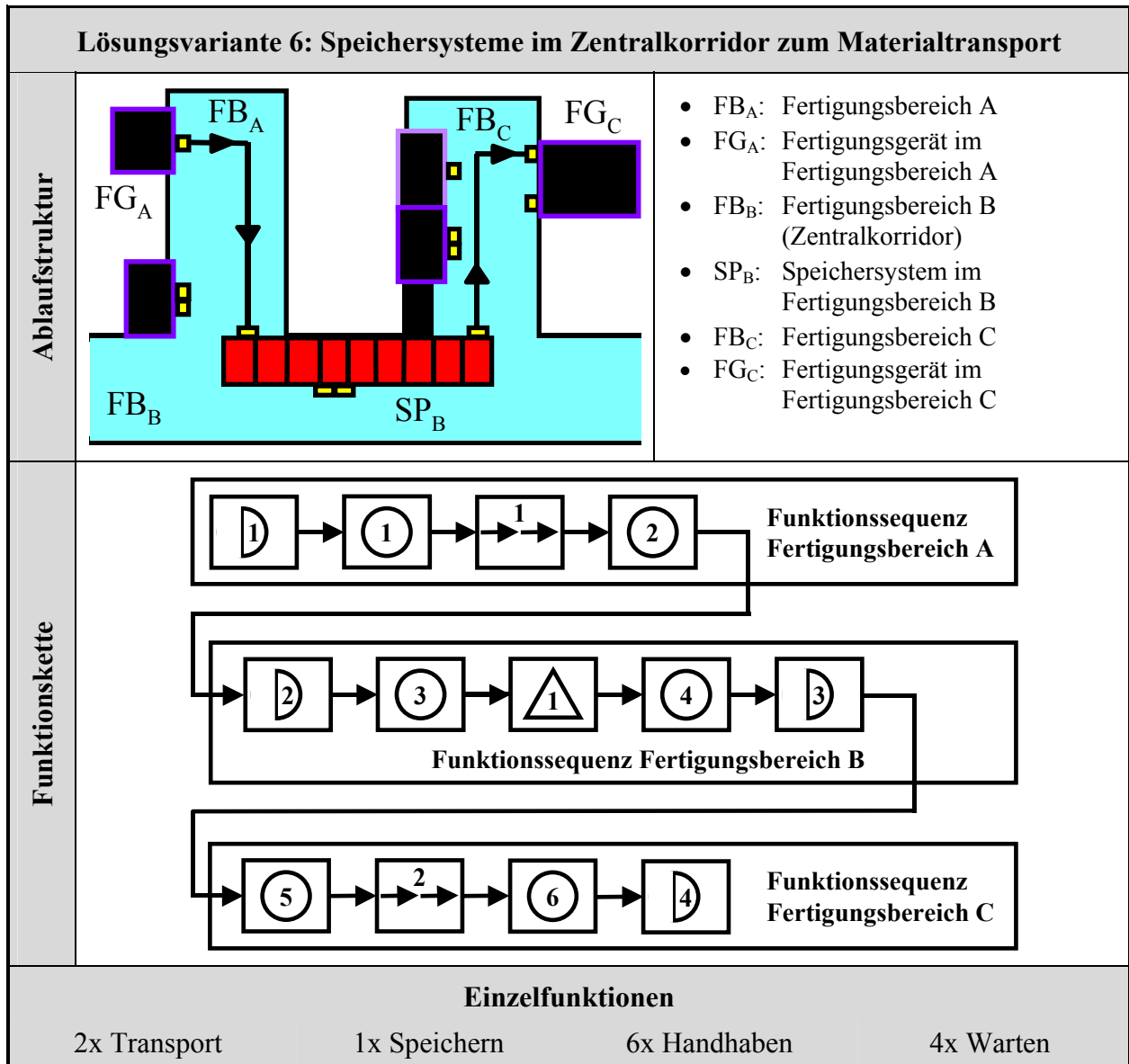


Bild 29: Funktionskette zur Darstellung der Ablaufstruktur beim Einsatz von Speichersystemen im Zentralkorridor zur Verknüpfung der bereichsinternen Transportsysteme

Aus dem Aufbau der Funktionskette ergibt sich, dass für einen Lostransport zwischen zwei Fertigungsgeräten bei der Lösungsvariante 6 zwei Transportsysteme und ein Speichersystem benötigt werden, die insgesamt 13 Einzelfunktionen ausführen.

Lösungsvariante 7: Lostransport zu einem Speichersystem vor dem nächsten Fertigungsgerät durch ein Transportsystem

Bei der Lösungsvariante 7 ist in der Fertigung nur ein Transportsystem installiert, das die einzelnen Fertigungsbereiche direkt miteinander verbindet. Die Lose werden bei dieser Variante vom Fertigungsgerät A abgeholt und immer in dem Speichersystem zwischengelagert, das sich möglichst in der Nähe des nachfolgenden Fertigungsgerätes befindet. Von diesem Speichersystem aus werden die Lose dann in einem weiteren Transportschritt zum nächsten Fertigungsgerät transportiert. Die Ablaufstruktur und die Funktionssequenzen für die Lösungsvariante 7 sind in Bild 30

dargestellt. Die entwickelte Ablaufstruktur zeigt, dass zur Durchführung der Materialflussabläufe bei dieser Lösungsvariante nur ein Transport- und ein Speichersystem benötigt und insgesamt 13 Einzelfunktionen ausgeführt werden.

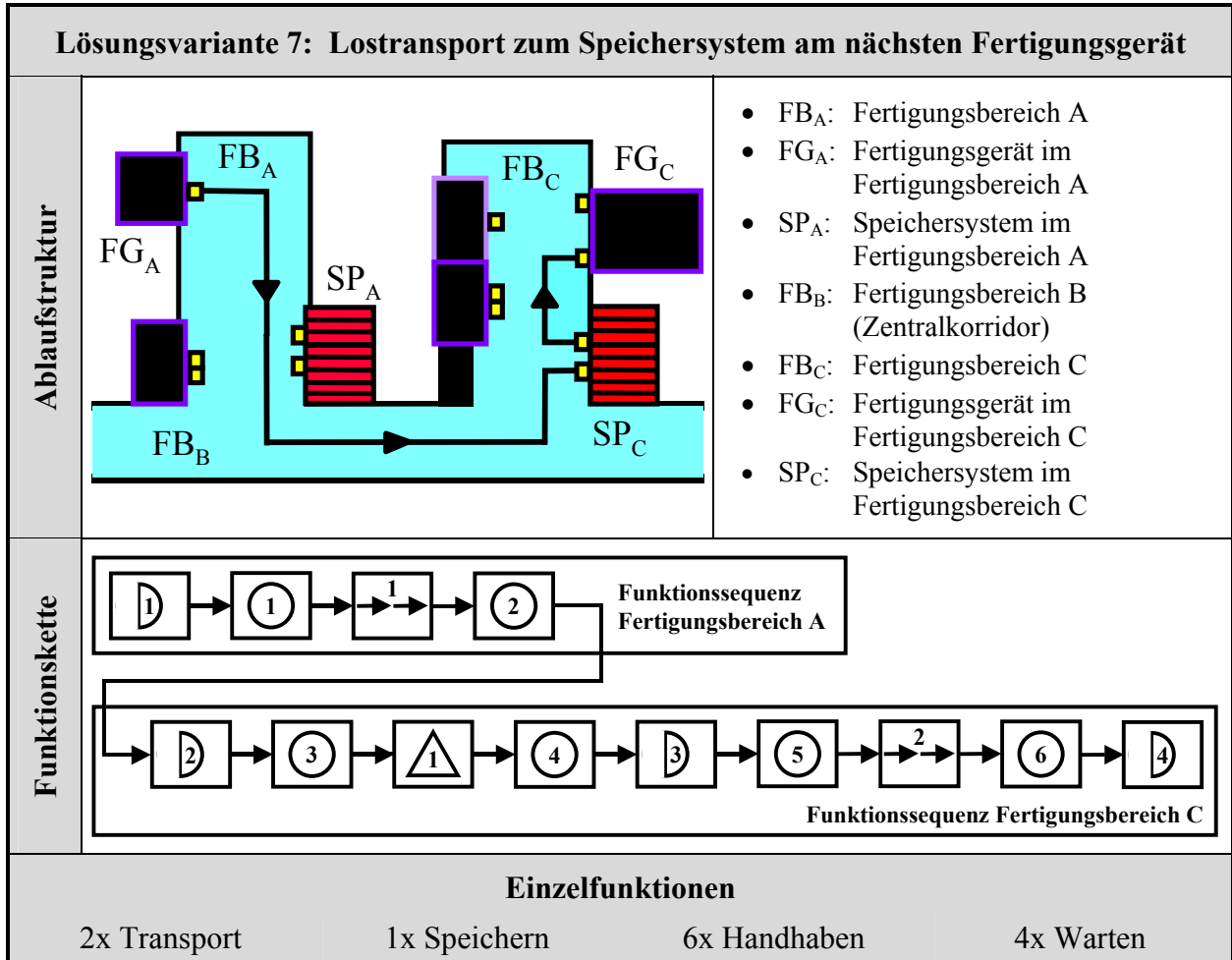


Bild 30: Ablaufstruktur und Funktionskette beim Einsatz eines Transportsystems für den Lostransport zu einem Speichersystem vor dem nächsten Fertigungsgerät

Lösungsvariante 8: Direkter Lostransport mit einem Transportsystem von einem Fertigungsgerät zum nächsten

Die Lösungsvariante 8 entspricht in ihrem grundsätzlichen Aufbau der Lösungsvariante 7. Im Unterschied zur Lösungsvariante 7 wird bei freien Bearbeitungskapazitäten am nachfolgenden Fertigungsgerät das Transportlos ohne Zwischenlagerung direkt von einem Transportsystem zum nächsten Fertigungsgerät transportiert. Falls keine freien Bearbeitungskapazitäten am nachfolgenden Fertigungsgerät verfügbar sind, wird das Transportlos wie bei der Lösungsvariante 7 in einem dem nachfolgenden Fertigungsgerät möglichst nahe gelegenen Speichersystem zwischengelagert. Bild 31 zeigt die graphische Darstellung der Ablaufstruktur und die Funktionskette für die Lösungsvariante 8.

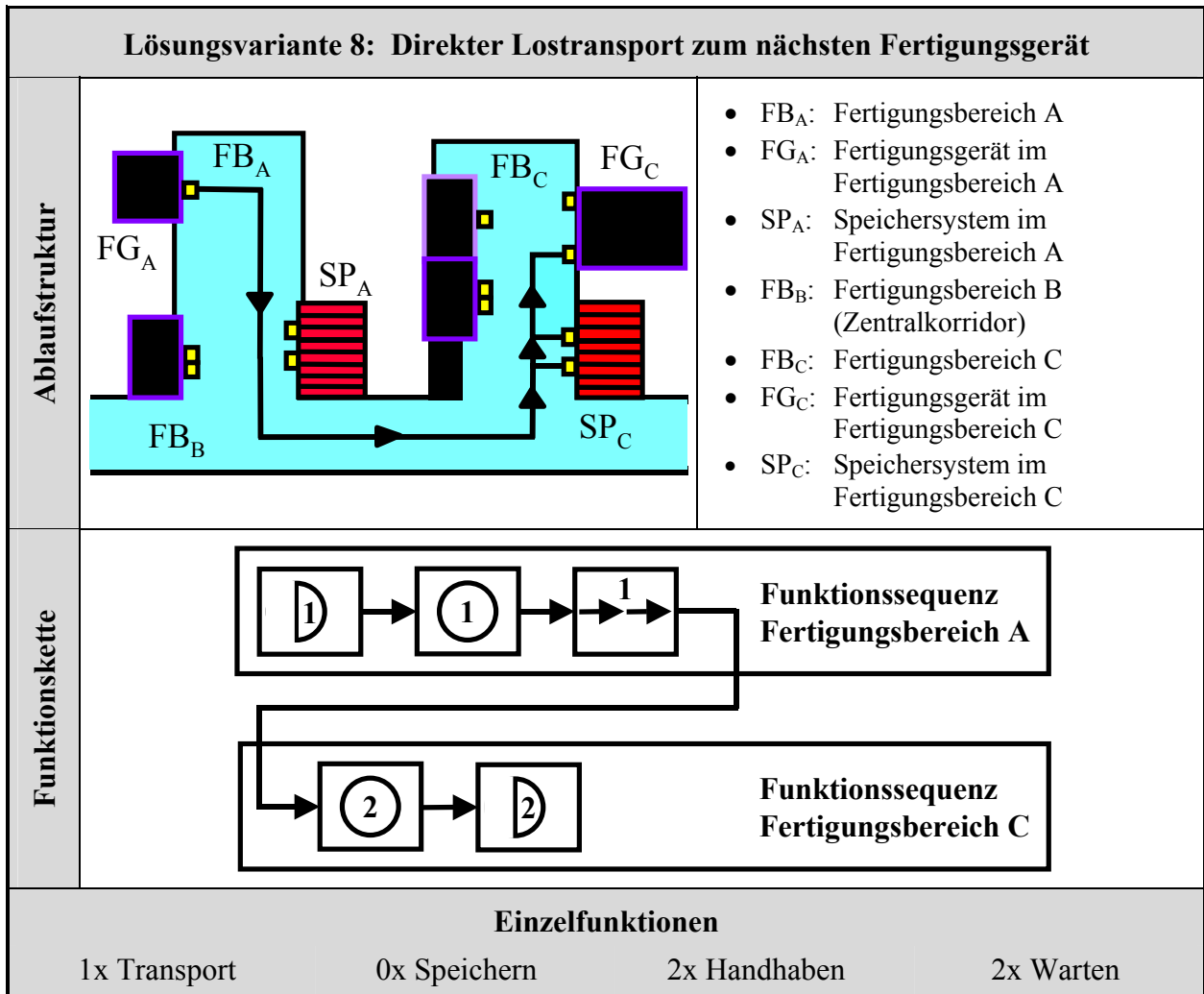


Bild 31: Ablaufstruktur und Funktionssequenzen beim direkten Lostransport mit einem Transportsystem von einem Fertigungsgerät zum nächsten

Die Ergebnisse belegen, dass bei dieser Variante für den Materialtransport zwischen zwei Fertigungsgeräten im Idealfall nur ein Transportsystem mit einer integrierten Handhabung benötigt wird und die Funktionskette insgesamt nur aus fünf Einzelfunktionen für die Durchführung der Transport- und Handhabungsvorgänge besteht. Der Einlagerung der Lose in ein Speichersystem kann entfallen, so dass im Vergleich zur Lösungsvariante 7 die Handhabungsvorgänge im Idealfall um 2/3 reduziert und die Wartezeitvorgänge halbiert werden.

4.3.3 Leistungsbewertung der Lösungsvarianten und Auswahl eines geeigneten Konzeptes zur Materialflussautomatisierung

In Bild 32 ist die Leistungsbewertung der entwickelten Lösungsvarianten zur Automatisierung der Materialflussabläufe auf der Basis der in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen dargestellt.

Anforderungen an die Materialflussautomatisierung	Lösungsvarianten			
	Variante 5: Autonome Transportsysteme in allen Bereichen	Variante 6: Speichersystem im Korridor zum Materialtransport	Variante 7: Transport zum Speichersystem am nächsten Fertigungsgerät	Variante 8: Direkter Lostransport zum nächsten Fertigungsgerät
Minimierung der Transportvorgänge	–	0	0	+
Minimierung der Speichervorgänge	–	0	0	+
Minimale Loshandhabungen	–	0	0	+
Kleine Wartezeitanteile	–	0	0	+
Geringe Anzahl an Automatisierungssystemen	–	0	+	+
Niedrige Investitionskosten	–	0	0	+
Hybride Systemlösungen in einem Gesamtsystem	–	–	+	+
Geringe Transportzeiten	–	–	0	+
Anwendbarkeit für unterschiedliche Layouts	–	0	+	+
Flexibilität bei Systemausfall	–	–	+	+
Anforderungen	+ erfüllt	0 teilweise erfüllt	– nicht erfüllt	
Die ausgewählte Lösungsvariante ist dunkel hinterlegt				

Bild 32: Leistungsbewertung der entwickelten Lösungsvarianten zur Automatisierung der Materialflusssysteme anhand der ermittelten Anforderungen

Bei der Lösungsvariante 5 ist ein Kapazitätsausgleich zwischen den Transportsystemen nicht möglich und es werden insgesamt 21 Einzelfunktionen zur Durchführung der Lostransporte benötigt. Bei der Lösungsvariante 6 sind für die Ausführung der Transportaufgaben im Korridorbereich zusätzliche Speichersysteme notwendig, wodurch es bei größeren Fertigungen zu Aufstauungen im Materialfluss kommen kann. Ein Ausgleich der Transportkapazitäten über unterschiedliche Fertigungsbereiche hinweg ist ebenfalls nicht möglich. Beide Lösungsvarianten eignen sich in erster Linie zum Einsatz in Fertigungen, die als Tunnelreinraum aufgebaut sind.

Die Lösungsvariante 7 ermöglicht den direkten Transport eines Loses von einem Fertigungsgerät zu einem Speichersystem vor dem nächsten Fertigungsgerät, wodurch nur ein Transportsystem und ein Speichersystem mit insgesamt 13 Einzelfunktionen benötigt werden. Weitere große Vorteile dieser Variante sind die Anwendbarkeit bei allen Fertigungslayouts und die Vernetzung der

verschiedenen Fertigungsbereiche und des Korridorbereiches mit nur einem Transport- und einem Speichersystem, wodurch ein besserer Ausgleich der Transportkapazitäten erfolgen kann.

Die Lösungsvariante 8 weist bei der durchgeführten Bewertung die besten Ergebnisse auf. Sie baut auf der Lösungsvariante 7 auf und beinhaltet wesentliche Vorteile bei der Durchführung der Lostransporte, da Lose bei freier Bearbeitungskapazität ohne Umladen direkt mit nur einem Transportsystem von einem Fertigungsgerät zum nächsten transportiert werden können. Sind keine freien Bearbeitungskapazitäten verfügbar, werden die Lose analog zur Lösungsvariante 7 in einem nahegelegenen Speichersystem zwischengelagert. Diese Strategie führt zu einer deutlichen Reduzierung der Durchlaufzeit und der Anzahl an notwendigen Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgängen, da der gesamte Transportablauf bei freier Kapazität an den Ein- und Ausgabestationen der Fertigungsgeräte mit nur fünf Einzelfunktionen durchgeführt werden kann. Bei beiden Lösungsvarianten ist der Einsatz einer hybriden Systemlösung mit verschiedenen Transportsystemvarianten in einem fabrikweiten Gesamtsystem denkbar, wodurch die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems optimiert wird und zusätzliche Synergien bei der Ausführung der Transportaufgaben entstehen.

Die Vernetzung der gesamten Fertigung mit im Idealfall nur einem Transportsystem ist für alle Fertigungslayouts anwendbar und ermöglicht einen idealen Ausgleich von Schwankungen in der Transportkapazität über das gesamte Materialflusssystem hinweg. Bei dieser Lösungskonzeption können erstmalig auch die Anforderungen von Transportlosen mit Eilprioritäten und definierten Liegezeiten in vollem Umfang berücksichtigt werden. Um ein Automatisierungskonzept entsprechend den Lösungsvarianten 7 oder 8 in einem Flächenreinraum anwenden zu können, muss die Aufstellung der Fertigungsgeräte an die Anforderungen beim Einsatz automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme angepasst und der Platzbedarf der Automatisierungssysteme berücksichtigt werden.

4.4 Planung und Auslegung automatisierter Transportsysteme

Die Planung und Auslegung automatisierter Transportsysteme muss sich an der Leistungsfähigkeit der einzelnen Systemvarianten orientieren. Um die Leistungsfähigkeit der Systeme quantifizieren zu können, wird im Folgenden die Aufbaustruktur der einzelnen Systemvarianten untersucht und anhand der ermittelten Anforderungen bewertet. Darauf aufbauend werden dann Leitlinien für einen bedarfsentsprechenden Einsatz abgeleitet. Die Strukturmodelle bauen auf der ausgewählten Lösungsvariante 4 (siehe *Bild 26*) für den Simulationsbaukasten auf und erweitern die abstrakte Oberklasse *Transportsystem* um die Objektklassen *Rollenbahn*, *Elektrohängebahn* und *Fahrerlose Transportsysteme*.

Die zu entwickelnden Strukturmodelle führen somit zu einer genauen Untergliederung der Transporttechnik im Simulationsbaukasten ab der Ebene der Transportsysteme. Gleichzeitig bilden sie die Basis für die detaillierte Abbildung der verschiedenen Transportsysteme im Simulationsbaukasten und für die Leistungsbewertung der einzelnen Transportsystemvarianten. Der gewählte Ansatz ermöglicht auch die schnelle Anpassung der Lösungsvarianten an neue Ausführungsformen und die Erweiterung des Simulationsbaukastens um neue Systemlösungen.

4.4.1 Aufbaustruktur der Transportsysteme

Lösungsvariante 9: Deckengebundene Rollenbahn mit einem stetigem Förderprinzip

Das entwickelte Strukturmodell für ein deckengebundenes Rollenbahnsystem mit einem stetigen Förderprinzip ist in *Bild 33* dargestellt. Die Oberklasse *Transportsystem* der ausgewählten Lösungsvariante 4 des Simulationsbaukastens wird um die Objektklasse *Rollenbahn* erweitert. Sie umfasst alle für den automatisierten Materialtransport notwendigen Komponenten und besteht aus den Objektklassen *Transportbahn*, *Transportsteuerung* und *Liftstation*.

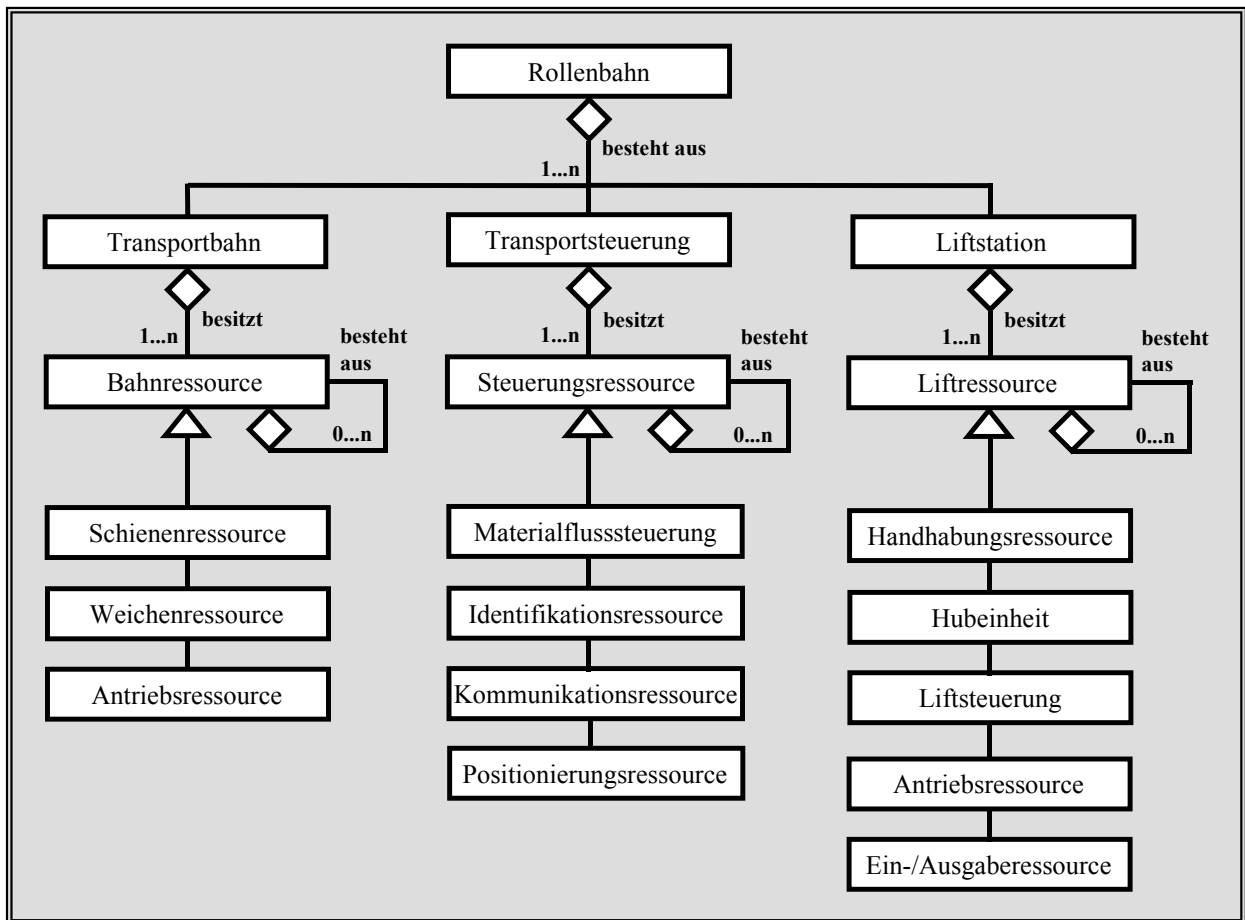


Bild 33: Aufbaustruktur deckengebundener Rollenbahnsysteme mit stetigem Förderprinzip

Die für die Durchführung der Transportvorgänge notwendigen Komponenten sind in der Klasse *Transportbahn* zusammengefasst. Die *Transportbahn* besitzt eine oder mehrere *Bahnressourcen*. Die *Bahnressource* vererbt wesentliche Eigenschaften an die Subklassen *Schienen-*, *Weichen-*, und *Antriebsressource*. Die *Transportsteuerung* mit ihren *Steuerungsressourcen* *Materialflusssteuerung*, *Identifikation*, *Kommunikation* und *Positionierung* steuert und überwacht die Transport- und Handhabungsabläufe, überwacht die Identifikation und Positionierung der Transportbehältnisse und ist verantwortlich für die Kommunikation mit allen Einzelkomponenten.

Die *Liftstation* bildet die Schnittstelle zwischen der Rollenbahn, den Fertigungsgeräten und den Speichersystemen. Sie besteht aus ein oder mehreren *Liftressourcen*, die ebenfalls weitere wic-

tige Eigenschaften an ihre Subklassen vererben. Die Liftressourcen *Handhabung*, *Hubeinheit*, *Liftsteuerung* und *Antrieb* ermöglichen es, die Transportbehältnisse vom Rollenbahnsystem zu übernehmen, Höhenunterschiede auszugleichen und an den *Ein-/Ausgaberesourcen* bereitzustellen. Diese Funktionen können anstelle einer Liftstation optional auch von einem Speichersystem ausgeführt werden. Eine weitere Untergliederung der Subklassen wird nicht durchgeführt, um die Unabhängigkeit von unterschiedlichen Systemherstellern sicherzustellen (gilt entsprechend auch für die Lösungsvarianten 10 und 11).

Lösungsvariante 10: Deckengebundene Elektrohängebahn mit einem un stetigem Förderprinzip

Die entwickelte Aufbaustruktur für eine deckengebundene *Elektrohängebahn* mit einem un stetigen Förderprinzip zur Erweiterung der Oberklasse *Transportsystem* der ausgewählten Lösungsvariante 4 ist in *Bild 34* dargestellt. Die Erweiterung besteht in diesem Anwendungsfall aus den Objektklassen *Transportbahn*, *Transportsteuerung*, *Transportfahrzeug* und *Liftstation*, die alle aus mehreren *Ressourcen* aufgebaut sein können. Diese Ressourcen vererben als Oberklassen wichtige Eigenschaften an ihre jeweiligen Subklassen.

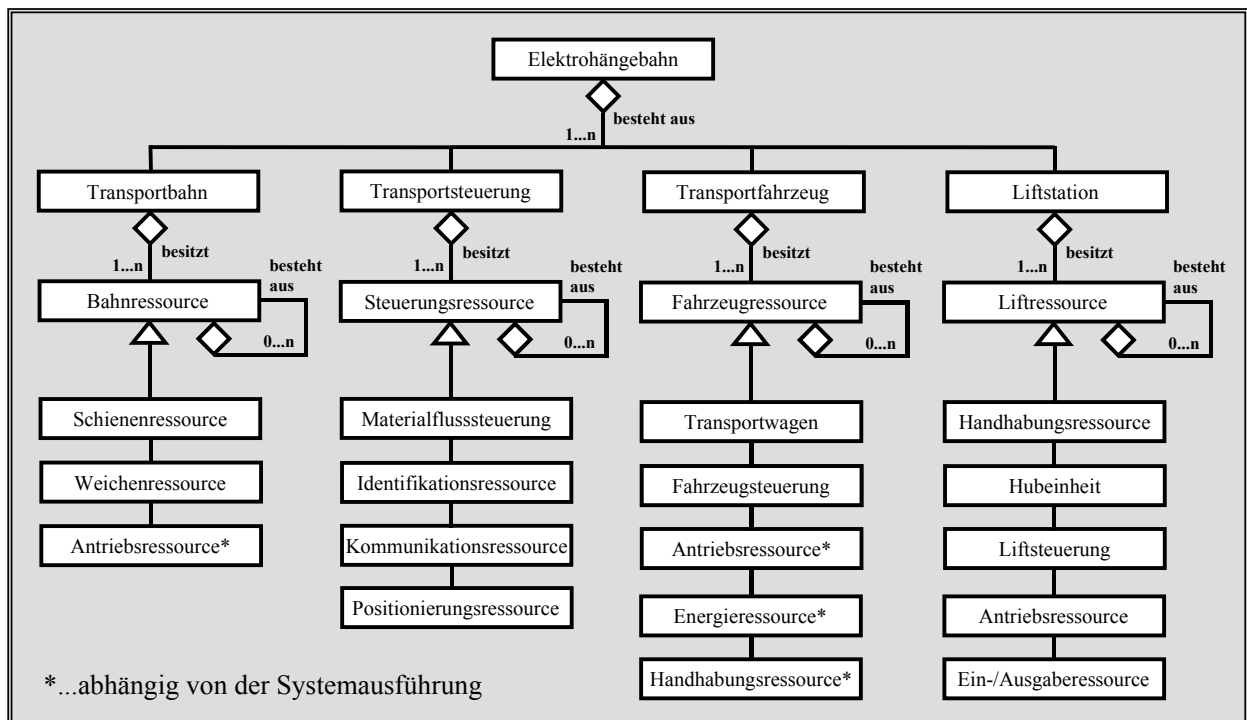


Bild 34: Aufbaustruktur deckengebundener Elektrohängebahnen mit un stetigem Förderprinzip

Im Unterschied zur Lösungsvariante 9 muss die Objektklasse *Transportbahn* keine *Antriebsressource* besitzen, da die Transportbewegung anstelle eines in die Transportschiene integrierten Linearmotors auch durch einen Elektromotor des *Transportfahrzeuges* erfolgen kann. Das *Transportfahrzeug* verfügt über einen *Transportwagen*, der den Aufbau und die Gestaltung des Transportfahrzeuges festlegt sowie je nach Systemausführung über eine *Antriebs-* und eine *Energieressource*, um die Materialtransporte durchzuführen. Optional ist die Ausführung der Fahrzeuge mit einer *Handhabungsressource* zur Übergabe der Transportbehältnisse möglich. Die *Fahrzeugsteuerung*

erung steuert und überwacht die am Transportvorgang beteiligten Einzelkomponenten der Fahrzeuge. Zur Beschreibung der Subklassen für die Objekte *Liftstation* und *Transportsteuerung* wird auf die Lösungsvariante 9 verwiesen.

Lösungsvariante 11: Bodengeführte Fahrerlose Transportsysteme mit einem unzeitigem Förderprinzip

Bei den in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung auf Flurebene eingesetzten unzeitigigen Transportsystemen handelt es sich um *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*, die entweder automatisch entlang einer Leitlinie, mit Hilfe eines Navigationssystems oder auf einer im Boden verlegten Schiene verfahren. Die entwickelte Modellierungsstruktur für die Fahrerlosen Transportsysteme, welche die Oberklasse *Transportsystem* in der ausgewählten Lösungsvariante 4 ergänzt, ist in *Bild 35* dargestellt.

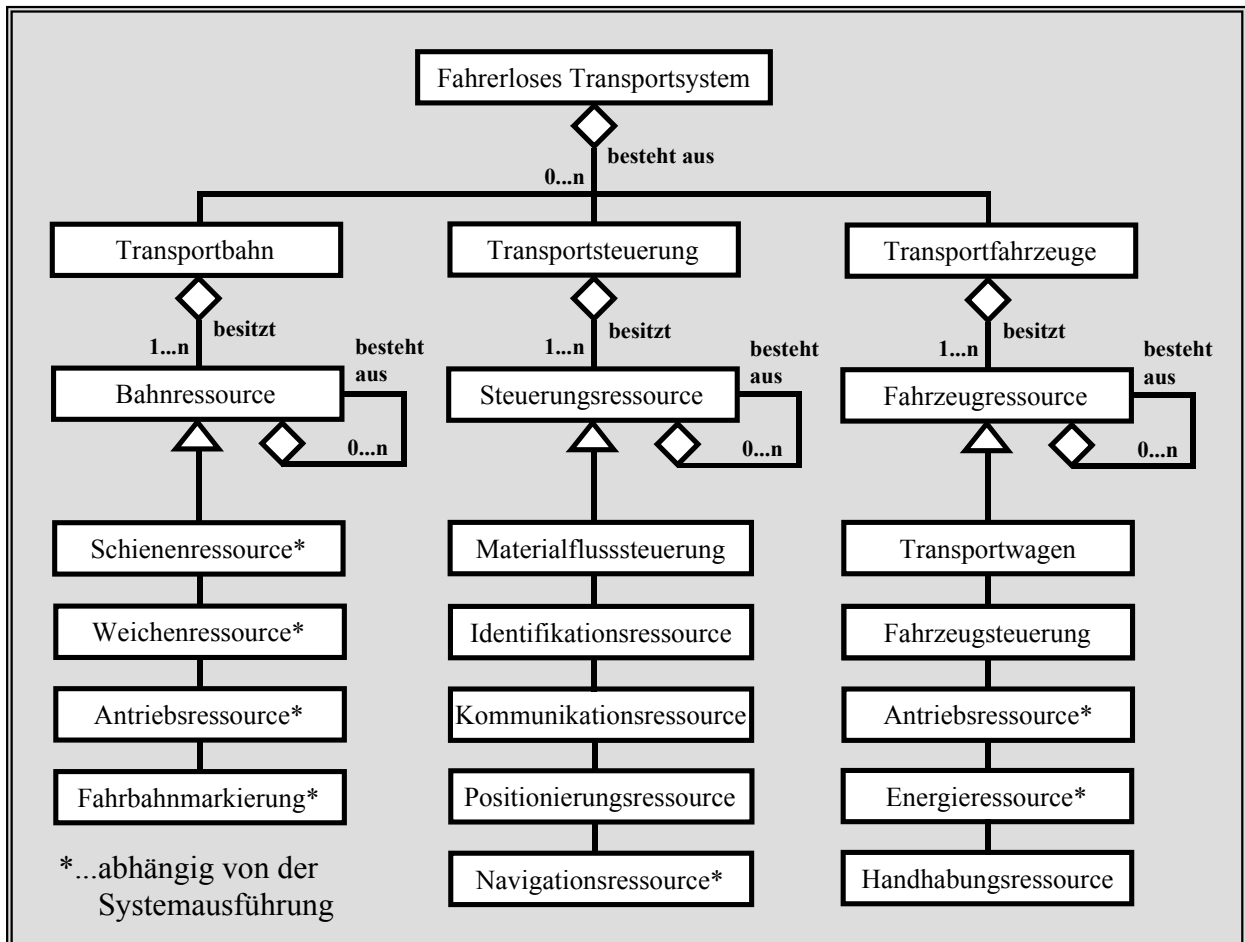


Bild 35: Aufbaustruktur bodengeführter Transportsysteme mit unzeitigem Förderprinzip

In dieser Lösungsvariante besteht die Oberklasse *Fahrerloses Transportsystem* aus den Objektklassen *Transportbahn*, *Transportsteuerung* und *Fahrzeugressource*. Alle drei Objektklassen entsprechen in der Funktionalität ihrer Ressourcen und deren Subklassen der Lösungsvariante 10, wobei ein *Transportwagen* bis zu 4 oder 6 Substratkassetten bzw. Transportbehältnisse aufnehmen kann, jedes Fahrzeug über ein Handhabungssystem verfügt und aufgrund des Einsatzes am

Boden die Objektklasse Liftstation entfällt. Bei den frei verfahrenen Systemen können je nach Systemausführung die *Bahnressourcen* um die Klasse *Fahrbahnmarkierung* oder die *Steuerungsressourcen* um die Klasse *Navigationsressource* ergänzt werden.

4.4.2 Leistungsbewertung automatisierter Transportsysteme

Die Leistungsbewertung automatisierter Transportsysteme bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen erfolgt anhand der ermittelten Anforderungen und der entwickelten Lösungsvarianten und ist in *Bild 36* dargestellt.

Anforderungen an die Transportsysteme	Lösungsvarianten				
	Variante 9: Rollenbahnsystem	Variante 10a: Hängebahn ohne Handhabung	Variante 10b: Hängebahn mit Handhabung	Variante 11a: Schienengeführtes FTS	Variante 11b: Automatisches FTS
Minimaler Flächenbedarf	+	+	+	-	0
Hoher Durchsatz an Fertigungslosen	+	+	0	0	0
Minimierung der Transportzeit	-	+	0	0	0
Eignung für lange Transportstrecken	+	+	0	-	0
Eignung für kurze Transportstrecken	-	-	0	+	+
Höhe der variablen Investitionskosten	-	-	0	+	+
Höhe der fixen Investitionskosten	+	+	0	-	-
Flexibilität der Transporttrassen	-	0	0	-	+
Einfache Beladung der Fertigungsgeräte	-	-	+	+	+
Transport hoher Substratgewichte	-	0	-	+	+
Anforderungen	+ erfüllt		0 teilweise erfüllt		- nicht erfüllt

Bild 36: Leistungsbewertung automatisierter Transportsysteme auf der Basis der ermittelten Anforderungen und der entwickelten Lösungsvarianten

Die Lösungsvariante 10 wird in Hängebahnsysteme ohne (10a) und mit (10b) Handhabung und die Lösungsvariante 11 in schienengeführte (11a) und automatisch (11b) verfahrenende Systeme unterteilt, da sich hier bei der Bewertung deutliche Unterschiede ergeben. Die durchgeführte Leistungsbewertung zeigt, dass insbesondere deckengebundene Transportsysteme ohne integrier-

te Handhabung (Lösungsvarianten 9 und 10a) für einen hohen Materialdurchsatz und den Einsatz bei langen Transportstrecken geeignet sind. Außerdem ist ihr Bedarf an kostenintensiver Reinraumfläche zur Installation der Transportsystemkomponenten sehr niedrig.

Der hohe fixe Anteil an den Investitionskosten für diese Systeme leitet sich aus der Tatsache ab, dass bei deckengebundenen Systemen die Kosten für die Installation des Transportkurses sowie für die notwendigen Handhabungsstationen und Speichersysteme zur Materialübergabe sehr hoch sind. Die Bewertung zeigt weiter, dass sich unstetige, deckengebundene Hängebahnsysteme ohne integrierte Handhabung (Lösungsvariante 10a) zur Minimierung der Transportzeiten am besten eignen.

Bodengebundene Fahrerlose Transportsysteme (Lösungsvarianten 11a und 11b) sind für den Einsatz bei einem geringeren Materialdurchsatz und für kurze Transportstrecken geeignet, wobei die automatisch verfahrenen Systeme eine große Flexibilität gegenüber Änderungen des Transportkurses aufweisen. Bei diesen Systemen überwiegt der variable Investitionskostenanteil, da der Hauptteil der Kosten auf die eingesetzten Fahrzeuge entfällt und die fixen Investitionskosten, die z.B. für die Gestaltung des Transportkurses anfallen, im Vergleich zu den variablen Kosten niedrig sind.

Ein weiterer Vorteil von bodengebundenen Fahrerlosen Transportsystemen ist ihre Eignung für hohe Substrat- und Handhabungsgewichte, wodurch sie sich insbesondere auch in der Flachbildschirmfertigung sehr gut eingesetzt werden können. Dies trifft auch auf deckengebundene Hängebahnsysteme ohne integrierte Handhabung zu (Lösungsvariante 10a), die durch einen Linear-motor in der Transportschiene sehr stabil ausgeführt werden können. Sie benötigen allerdings für das Be- und Entladen der Transportbehältnisse ein automatisches Speicher- oder Liftsystem.

Die Leistungsfähigkeit von deckengebundenen Hängebahnsystemen mit einer integrierten Handhabung (Lösungsvariante 10b) liegt prinzipiell zwischen den beiden oben beschriebenen Varianten, da sie sowohl bei längeren Transportstrecken als auch bei höheren Materialdurchsätzen eingesetzt werden können und über ein eigenes Handhabungssystem verfügen. Je nach Systemauslegung und der Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen können entweder die fixen oder auch die variablen Investitionskosten überwiegen.

Die durchgeführte Leistungsbewertung zeigt weiter, dass durch den Einsatz von Transportfahrzeugen mit einer integrierten Handhabung (Lösungsvarianten 10b, 11a und 11b) der Bedarf an Speichersystemen oder Liftstationen zur Materialübergabe reduziert wird, was bei der Systemauslegung und der Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Materialflussautomatisierung einen wichtigen Einflussfaktor darstellt.

4.5 Planung und Auslegung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme

Bei der Automatisierung der Materialflussabläufe hängt die Leistungsfähigkeit des gesamten Materialflusssystems von der bedarfsentsprechenden Planung und Auslegung der automatisierten

Speichersysteme ab. Durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass die Speichersysteme folgende drei Hauptaufgaben innerhalb des Materialflusssystems einer Halbleiter- oder Flachbildschirmfertigung wahrnehmen:

- Speicherung von Losen an den Fertigungsgeräten
- Zwischenlagerung von Losen im Fertigungsprozess
- Verknüpfung automatisierter Transportsysteme

Die Analyse der Ausgangssituation belegt außerdem, dass die nutzbare Lagerkapazität eines Speichersystems stark von der Geschwindigkeit des Handhabungssystems abhängt. Um die Planung und Auslegung der Speichersysteme zu vereinfachen, werden deshalb im Folgenden die Aufbaustrukturen der Speichersysteme untersucht, Strukturmodelle für unterschiedliche Einsatzformen entwickelt und deren Leistungsfähigkeit anhand der ermittelten Anforderungen bewertet. Die zu entwickelnden Strukturmodelle bauen auf der ausgewählten Lösungsvariante 4 (siehe *Bild 26*) des Simulationsbaukastens auf und erweitern die Oberklasse *Speichersystem* des *Speichermodells* um weitere Objektklassen.

Die zu entwickelnden Strukturmodelle führen zu einer genauen Untergliederung der Speichertechnik im Simulationsbaukasten ab der Ebene der Speichersysteme. Sie bewirken eine detaillierte Abbildung der Speichersysteme im Simulationsbaukasten und bilden die Grundlage für die Leistungsbewertung der einzelnen Speichersystemvarianten. Damit ist es einfach, bestehende Lösungsvarianten an neue Ausführungsformen anzupassen und die Struktur des Simulationsbaukastens um neue Varianten zu erweitern.

Mit Hilfe des Speichermodells und der entwickelten Strukturmodelle werden dann an konkreten Praxisbeispielen für eine unterschiedliche Anzahl an Handhabungen Untersuchungen zur optimalen Anordnung der Ein-/Ausgabestationen im Speichersystem durchgeführt und die Wartezeiten bis zur Einlagerung der Lose in das Speichersystem minimiert. Im nächsten Schritt wird ein Berechnungsverfahren entwickelt, welches eine Korrelation zwischen der Anzahl an durchzuführenden Handhabungen, der Geschwindigkeit des Handhabungssystems und den geometrischen Abmessungen des Speichersystems herstellt und mit dem wichtige Eingangsparameter für die Simulation bereits vorab überschlägig berechnet werden können.

4.5.1 Aufbaustruktur der Speicher- und Handhabungssysteme

Die prinzipielle Aufbaustruktur eines Speichersystems mit einem integrierten Handhabungssystem ist in *Bild 37* dargestellt. Das *Speichersystem* besteht aus den Oberklassen *Reinheitssystem*, *Speichersteuerung*, *Speichereinheit* und *Ein-/Ausgabesystem*, die sich jeweils aus ein oder mehreren Ressourcen zusammensetzen und abhängig vom Einsatzzweck und der Ausführung der Speichersysteme variieren können. Diese Ressourcen vererben als Oberklassen wesentliche Eigenschaften an ihre jeweiligen Subklassen.

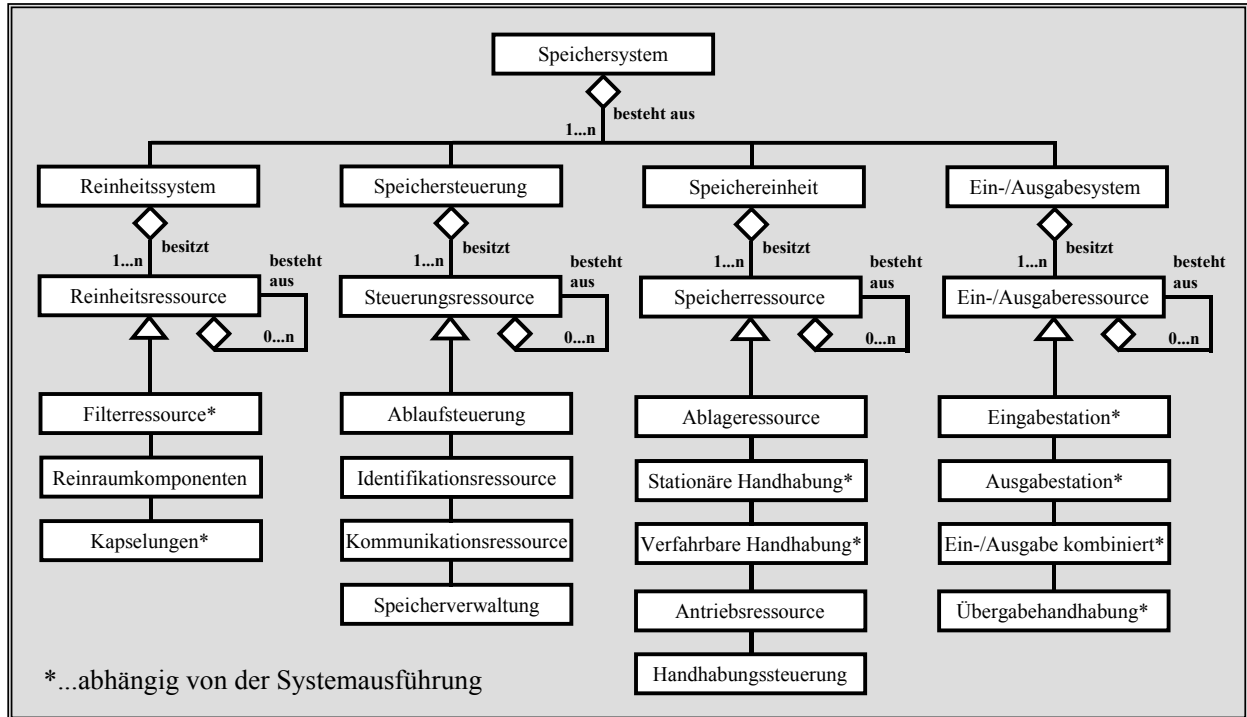


Bild 37: Aufbaustruktur automatischer Speichersysteme mit einem integrierten Handhabungssystem

Die *Reinheitsressourcen* stellen die geforderte Reinraumtauglichkeit des Speichersystems durch die Verwendung *reinraumtauglicher Komponenten*, die *Kapselung* kontaminationskritischer Bauteile und den Einsatz von *Filtersystemen* zur Luftreinigung sicher. Die *Steuerungsressourcen* steuern und organisieren die *Handhabungsabläufe*, überwachen die *Identifikation* der Kassetten und Transportbehältnisse und sind verantwortlich für die *Kommunikation* mit allen Einzelkomponenten des Speichersystems. Die *Speicherverwaltung* ordnet den Fertigungslosen die Regalplätze zu und ist zuständig für die Bestandsführung der Lose.

Die *Speicherressource* besteht aus *Ablageressourcen*, welche die Anzahl an Regalplätzen und die Kapazität des Speichersystems festlegen. Die Handhabungsvorgänge werden von einem *stationären* oder einem *verfahrbaren Handhabungssystem* mit einer schwenkbaren Greifeinheit ausgeführt. Für die Programmierung und Durchführung der Handhabungs- und Greifbewegungen ist die *Handhabungssteuerung* zuständig, während die *Antriebsressourcen* die Durchführung der einzelnen Achsbewegungen ermöglichen.

Das *Ein-/Ausgabesystem* bildet die Schnittstelle für die Losübergabe zwischen Speichersystem, Fertigungsgerät und Transportsystem. Das Ein-/Ausgabesystem kann in Abhängigkeit von Einsatzzweck und Ausführungsform als separate *Eingabe-* oder *Ausgabestation* oder als *kombinierte Ein-/Ausgabestation* ausgeführt werden. Die Kapazität der Ein-/Ausgabesysteme kann durch eine zusätzliche *Übergabehandhabung* erhöht werden, da durch den Einsatz eines solchen stationären Handhabungssystems an der Übergabeschnittstelle eine Entlastung des speicherintegrierten Handhabungssystems erzielt wird. Da die Aufbaustruktur der *Speichersteuerung* und des *Reinheitssystems* im Wesentlichen bei allen Speichersystemen gleich sind und der Schwerpunkt der

vorliegenden Arbeit auf der Planung und Auslegung der Speichersysteme liegt, wird auf eine weitere Betrachtung dieser Systeme im Folgenden verzichtet.

Lösungsvariante 12: Speichersysteme zur Losspeicherung an den Fertigungsgeräten

Die Speicherung von Losen direkt an den Fertigungsgeräten verfolgt das Ziel, Fertigungsgeräte mit hohen Investitionskosten, wie z.B. Nassbankanlagen, Lithographiecluster oder Diffusionsanlagen, durch die rechtzeitige Bereitstellung von Fertigungslosen an den Ein-/Ausgabestationen möglichst hoch auszulasten. Erfahrungen aus der Praxis belegen, dass bei der Konzeption von Gerätespeichern eine Kapazität der *Ablageressource* von bis zu 100 Regalplätzen in der Regel ausreicht (siehe *Bild 37*). Die niedrige Zahl an Regalplätzen ermöglicht einen einfachen Aufbau der *Speicherressource* mit einem *stationären Handhabungssystem* und einem schwenkbaren Greifersystem. Die *Ein-/Ausgaberesource* umfasst *kombinierte Ein-/Ausgabestationen* zum Fertigungsgerät und zum Transportsystem mit zumeist je einem Eingabe- und einem Ausgabeplatz.

Lösungsvariante 13: Speichersysteme zur Zwischenlagerung von Fertigungslosen

Die entwickelte Aufbaustruktur eines Speichersystems zur Zwischenlagerung unterscheidet sich von der Lösungsvariante 12 insbesondere durch eine unterschiedliche Auslegung der Objektklassen *Speicher-* und *Ein-/Ausgaberesource* (*Bild 37*). Untersuchungen zeigen, dass bei einer geringen Frequentierung der Speichersysteme Ausführungsformen mit einer *Ablageressource* von mehr als 200 Regalplätzen eingesetzt werden können. Gegenüber Lösungsvariante 12 wird ein auf einer Linearachse *verfahrbares Handhabungssystem* eingesetzt. Um die zeitliche Entkopplung des Handhabungssystems sicherzustellen verfügt das Speichersystem über ein oder mehrere *Eingabe-* und *Ausgabestationen*, die auch kombiniert werden können und aus mindestens einem Eingabe- und einem Ausgabeplatz bestehen.

Lösungsvariante 14: Speichersysteme zur Verknüpfung automatisierter Transportsysteme

Zur Materialübergabe zwischen zwei unterschiedlichen Transportsystemen werden Speichersysteme eingesetzt, die sehr häufig frequentiert werden und in denen die Fertigungslose in der Regel nur kurzfristig zwischengelagert werden. Die hierfür entwickelte Lösungsstruktur besteht aus einer *Ablageressource*, deren Kapazität, wie durchgeführte Untersuchungen belegen, auf 100 bis 200 Regalplätze beschränkt ist (*Bild 37*). Die Subklassen für die *Speicherressourcen* entsprechen in ihrem Aufbau der Lösungsvariante 13, wobei der Einsatz eines *verfahrbaren Handhabungssystems* mit einer hohen Geschwindigkeit erforderlich ist, um möglichst geringe Handhabungszeiten erzielen zu können.

Um eine Optimierung der Übergabevorgänge zwischen dem Transportsystem und dem integrierten Handhabungssystem des Speichers auch bei einer sehr hohen Systemauslastung zu erzielen, werden an den *Ein-/Ausgaberesourcen* bei Bedarf zusätzlich Systeme für die *Übergabehandhabung* eingesetzt, welche eine zeitliche Entkopplung der Losübergabe zwischen dem Transportsystem und dem speicherintegrierten Handhabungssystem sicherstellen. Ebenso wird die Kapazität der *Eingabe-* und der *Ausgabestationen* erhöht, so dass sie jeweils bis zu vier Fertigungslose aufnehmen können.

4.5.2 Leistungsbewertung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme

Die Leistungsbewertung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme für unterschiedliche Einsatzbedingungen erfolgt anhand der ermittelten Anforderungen auf der Basis der entwickelten Lösungsvarianten und ist in *Bild 38* dargestellt.

Anforderungen an die Speicher- und Handhabungssysteme	Lösungsvarianten		
	Lösungsvariante 12: Losspeicherung an den Fertigungsgeräten	Lösungsvariante 13: Zwischenlagerung von Fertigungslosen	Lösungsvariante 14: Verknüpfung automatisierter Transportsysteme
Hohe Frequentierungshäufigkeit	0	–	+
Zwischenlagerung bei langen Störungen	–	+	0
Speicherkapazitäten für unproduktive Lose	0	+	0
Sammlungsmöglichkeiten für Losblöcke	0	+	0
Minimierung des Flächenbedarfs im Reinraum	0	–	0
Anforderungen	+ erfüllt	0 teilweise erfüllt	– nicht erfüllt

Bild 38: Leistungsbewertung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme auf der Basis der ermittelten Anforderungen und der entwickelten Lösungsvarianten

Die durchgeführte Bewertung zeigt, dass Speichersysteme der Lösungsvariante 13 über eine große Speicherkapazität verfügen und insbesondere bei einer niedrigen Speicherfrequentierung voll ausgelastet werden können. Daraus folgt, dass sie für die mittel- bis langfristige Zwischenlagerung von Losen, wie z.B. beim Ausfall von Fertigungsgeräten aufgrund von Störungen und Wartungsarbeiten, zur Lagerung von unproduktiven Losen und zur Sammlung von Losblöcken besonders geeignet sind. Dies betrifft auch Fertigungslose, die aufgrund von Kapazitätsengpässen und Stauungen im Materialfluss nicht weitertransportiert oder bearbeitet werden können.

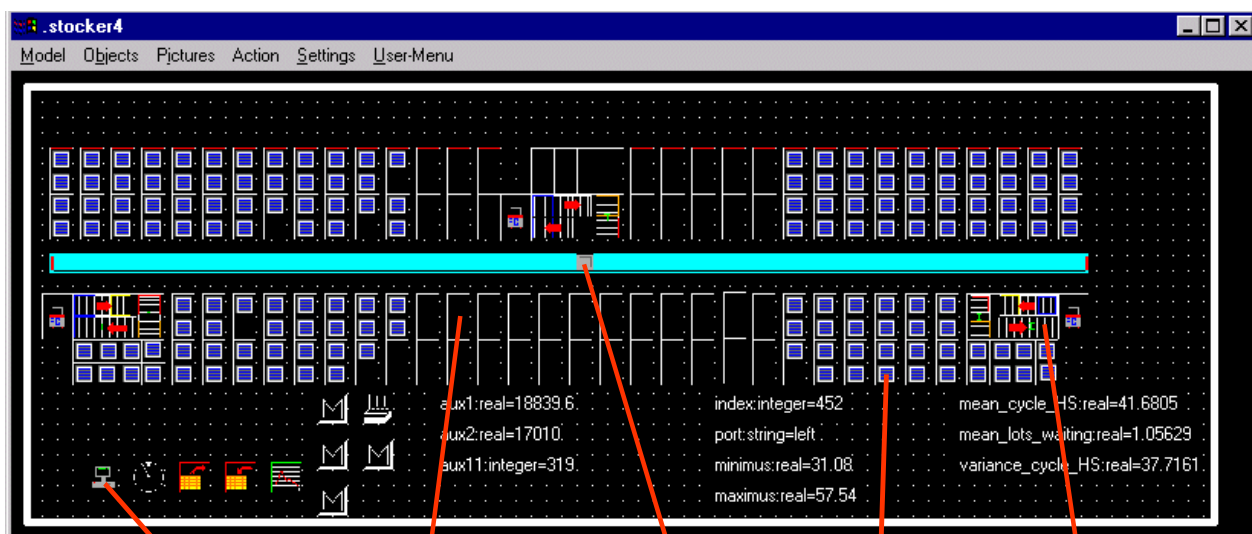
Es zeigt sich auch, dass Speichersysteme der Lösungsvariante 14 aufgrund ihrer großen Handhabungskapazität große Vorteile bei einer hohen Frequentierungshäufigkeit besitzen und für die Verknüpfung unterschiedlicher Transportsysteme mit einem hohen Materialdurchsatz am besten geeignet sind. Sie eignen sich auch zur kurz- bis mittelfristigen Zwischenlagerung von Losen bei Kapazitätsengpässen an den Fertigungsgeräten oder bei Stauungen im Materialfluss.

Die durchgeführte Bewertung zeigt weiter, dass Gerätespeicher entsprechend der Lösungsvariante 12 nur für Einsatzfälle direkt am Fertigungsgerät bei einer niedrigen Frequentierung und einem geringen Bedarf an Speicherkapazität geeignet sind. Dies umfasst die kurz- bis mittelfristige Zwi-

schenlagerung von Losen direkt am Fertigungsgerät vor und nach der Bearbeitung sowie die Speicherung leerer Transportbehältnisse während der Bearbeitung.

4.5.3 Simulationsgestützte Planung und Auslegung der Leistungsfähigkeit automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme

Auf der Basis der entwickelten Strukturmodelle wird ein Speichermodell erstellt, das automatisierte Speicher- und Handhabungssysteme im Detail abbildet (Bild 39). Das realisierte Speichermodell entspricht in seinem Aufbau der Lösungsvariante 4 (siehe Bild 26) und basiert auf der in Kapitel 4.5.1 entwickelten Aufbaustruktur für die Speicher- und Handhabungssysteme (siehe Bild 37). Es ergänzt die Funktionalitäten des Fabrikmodells und wird als Speichermodell in den entwickelten Simulationsbaukasten integriert. Das Speichermodell wurde mit dem objektorientierten Simulationssystem *eM-Plant* der *Fa. Tecnomatix* erstellt. Für die Untersuchungen werden Speichersysteme mit unterschiedlichen Speicherkapazitäten realitätsgetreu in einem Simulationsmodell nachgebildet. Die Zeitpunkte für die Einlagerung der Fertigungslose in das Speichersystem bzw. zur Auslagerung aus dem Speichersystem stammen aus dem Fabrikmodell einer Halbleiterfertigung und werden anhand der Datenschnittstelle in das Speichermodell transferiert.



Speichersteuerung Regalplätze Handhabungssystem Lose Ein-/Ausgabestation

Bild 39: Darstellung des für die Durchführung der Simulationsuntersuchungen erstellten Speichermodells mit seinen wichtigsten Teilsystemen

Bild 40 zeigt die Datenbasis des Speichermodells mit allen für die Simulation relevanten Teilsystemen und den wichtigsten Parametern, die zum Teil in Voruntersuchungen ermittelt wurden.

Die speicherintegrierten Handhabungssysteme sind bei einer starken Frequentierung häufig sehr hoch ausgelastet und bilden dann die Durchsatz begrenzende Komponente eines automatischen Speichersystems. Um die Auslastung der Handhabungssysteme zu verringern, werden im Folgenden Möglichkeiten zur Reduzierung der Handhabungszeiten durch eine optimale Anordnung

der Ein-/Ausgabestationen mit Hilfe des Speichermodells und der entwickelten Strukturmodelle simulativ untersucht und bewertet. Weitere durchzuführende Simulationsuntersuchungen umfassen die Minimierung der Wartezeitanteile für ein Los bis zur Einlagerung in ein Speichersystem bei unterschiedlich angeordneten Ein-/Ausgabestationen.

Datenbasis des Speichermodells	
Teilsysteme	Systemabbildung
Speicher-system	<ul style="list-style-type: none"> • Speichergröße: 256 Fertigungslose, Handhabungsgeschwindigkeit 1m/s • Definierte Zeitintervalle für die einzelnen Handhabungsvorgänge • Alle Verfahrsachsen einzeln programmierbar und parallel verfahrbar • Spezifikation der Speicherplätze durch Koordinaten, Einlagerungsseite, Losnummer und Regalnummer • Genaue Abbildung der geometrischen Maße des Speichersystems in Abhängigkeit von der Speichergröße
Ein-/Ausgabe-system	<ul style="list-style-type: none"> • Ein-/Ausgabestationen mit einer Kapazität von je 2 Losen für die Eingabe und die Ausgabe • Ausführung der Ein-/Ausgabestationen mit getrennten Bereichen für Eingabe und Ausgabe der Lose • Abbildung des Zeitverhaltens bei der Eingabe und Ausgabe der Lose • Beliebige Anordnung der Ein-/Ausgabestationen im Speichersystem • Anzahl der Ein-/Ausgabestationen frei wählbar
Speicher-steuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Verfahrswege durch Einlagerung der Lose möglichst in der Nähe der Ein-/Ausgabestationen • Simulationsdauer: 5 Tage • Die Zeitpunkte für die dynamische Ein- und Auslagerung der Lose werden mit Hilfe einer Datenschnittstelle als reale Daten aus dem Fabrikmodell einer Halbleiterfertigung in das Speichermodell übertragen • Abbildung der Steuerungsabläufe des Handhabungssystems und der Ein-/Ausgabestationen • Koordinierung und Überwachung der einzelnen Komponenten des Speichersystems • Automatische Verwaltung der eingelagerten Fertigungslose

Bild 40: Datenbasis des Speichermodells für die Simulationsuntersuchungen

Lösungsvariante 15: Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlich angeordneter Ein-/Ausgabestationen auf die Auslastung der Handhabungssysteme in Abhängigkeit von der Anzahl an durchzuführenden Handhabungen

Die Anordnung der Ein-/Ausgabestationen beeinflusst die Auslegung der Speichersysteme. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Leistungsfähigkeit unterschiedlich angeordneter Ein-/Ausgabestationen in Bezug zur Auslastung der Handhabungssysteme anhand eines Speichermodells mit 256 Speicherplätzen untersucht und bewertet, um Hinweise für eine optimale Anordnung der Stationen zu erhalten.

Für die Durchführung der Simulationsuntersuchungen zur Optimierung der Auslastung der Handhabungssysteme werden folgende Anordnungsvarianten ausgewählt:

- Anordnungsvariante A: Anordnung je einer Ein-/Ausgabestation an der linken und der rechten Seite des Speichersystems
- Anordnungsvariante B: Anordnung von zwei Ein-/Ausgabestationen an der linken Speicherseite
- Anordnungsvariante C: Anordnung von zwei Ein-/Ausgabestationen in der Mitte
- Anordnungsvariante D: Anordnung je einer Ein-/Ausgabestation an der linken und der rechten Seite des Speichersystems sowie in der Mitte
- Anordnungsvariante E: Anordnung von zwei Ein-/Ausgabestationen an der linken und einer Ein-/Ausgabestation an der rechten Seite des Speichersystems

Die Auslastung eines Handhabungssystems ergibt sich aus dem Verhältnis der Summe der Zeitanteile in denen das Handhabungssystem einen Ein-/Auslagerungsauftrag ausführt in Bezug zur Simulationszeit.

$$\text{Handhabungsauslastung (\%)} = \frac{\sum_1^n \text{Zeitdauer für die Ausführung eines Auftrags}}{\text{Simulationszeit}} * 100 \quad (1)$$

Die bei der Untersuchung der Anordnungsvarianten erzielten Simulationsergebnisse für eine unterschiedliche Anzahl an Handhabungen sind in *Bild 41* dargestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass die Auslastung der Handhabungssysteme stark von der Anzahl an durchzuführenden Handhabungen abhängt und bei einer Zunahme ansteigt. Zusätzlich belegen die Untersuchungen, dass die Anordnung der Ein-/Ausgabestationen die Auslastung der Handhabungssysteme ebenfalls stark beeinflusst. In Abhängigkeit von der Anordnung der Stationen kann im vorliegenden Fall bei einer Anordnung der Stationen in der Mitte des Speichersystems die Auslastung um bis zu 18% verringert werden, da bei dieser Anordnung die Verfahrswege kürzer sind als bei den anderen Varianten.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anordnung der Stationen an gegenüberliegenden Seiten aufgrund der längeren Verfahrswege zu einem Anstieg der Handhabungsauslastung führt. Aus den Ergebnissen folgt außerdem, dass neben der geometrischen Anordnung auch eine Erhöhung der Anzahl an Ein-/Ausgabestationen die Handhabungsauslastung beeinflusst. Die Ergebnisse belegen weiter, dass es bei der Planung und Auslegung automatisierter Speichersysteme sinnvoll ist, die Ein-/Ausgabestationen in der Mitte und nahe beieinander anzuordnen und sie in ihrer Anzahl zu begrenzen.

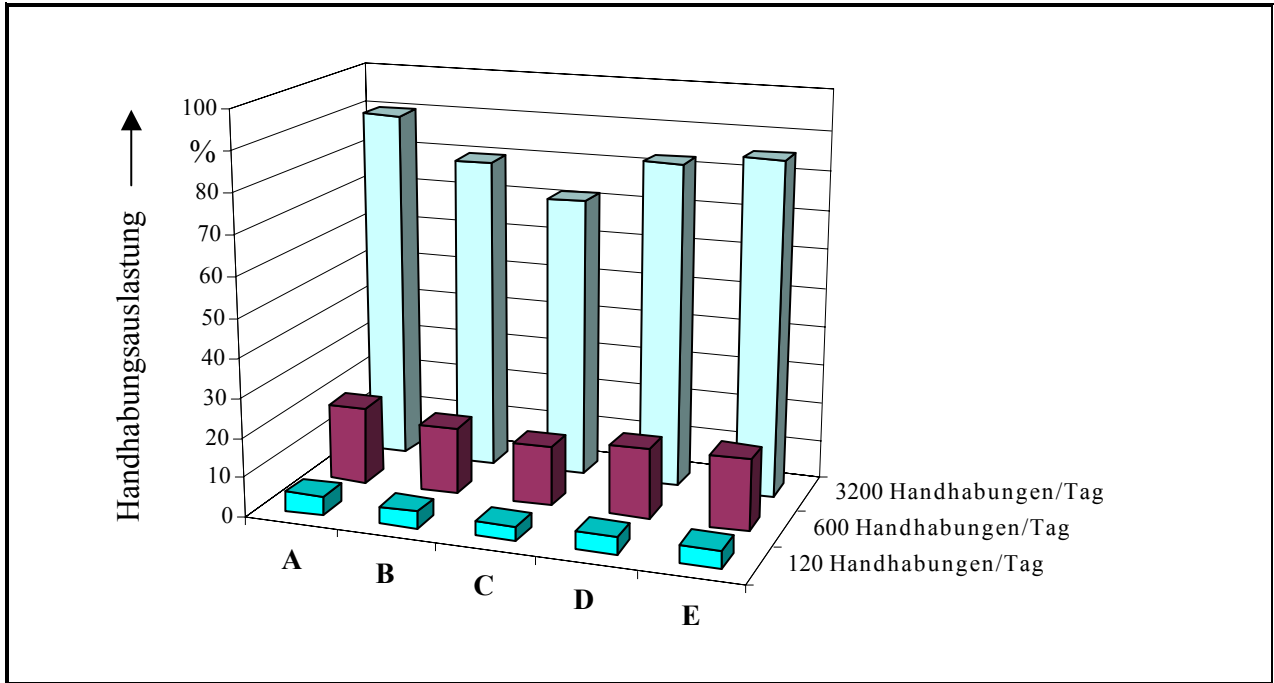


Bild 41: Auslastung der Handhabungssysteme in Abhängigkeit von der Anzahl an Handhabungen und der gewählten Anordnungsvariante

Lösungsvariante 16: Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlich angeordneter Ein-/Ausgabestationen auf die Wartezeiten bis zur Einlagerung oder Auslagerung der Lose

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Planung und Auslegung der Speicher- und Handhabungssysteme ist die Minimierung der Wartezeit eines Loses von der Bereitstellung an der Eingabestation bis zur Einlagerung in seinen Regalplatz bzw. vom Zeitpunkt der Auslösung eines Auslagerungsauftrages durch die Steuerung bis zur Bereitstellung des Loses an der Ausgabestation. Zur Bestimmung der Auswirkungen dieser Wartezeiten auf die Auslastung der Handhabungssysteme werden für die in der Lösungsvariante 15 beschriebenen Anordnungsvarianten ebenfalls Simulationsuntersuchungen für ein Speichersystem mit einer Kapazität von 256 Loses in Abhängigkeit von der Anzahl an Handhabungen durchgeführt und bewertet. Die Ergebnisse dieser Simulationsuntersuchungen sind in *Bild 42* zusammengefasst.

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Wartezeiten bis zur Einlagerung bzw. Auslagerung eines Loses von der Handhabungsanzahl abhängen und bei einer Zunahme der Handhabungen ansteigen. Außerdem bewirkt eine ungünstige Anordnung der Ein-/Ausgabestationen eine starke Erhöhung der Wartezeiten bis zur Einlagerung oder Auslagerung der Lose. Die Ergebnisse belegen, dass eine Erhöhung der Anzahl an Ein-/Ausgabestationen von zwei auf drei Stationen zu einer Verdoppelung der Wartezeiten führt. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse auch, dass die geometrische Anordnung der Ein-/Ausgabestationen die Wartezeiten nur geringfügig beeinflusst. Aus den ermittelten Ergebnissen lässt sich somit ableiten, dass durch eine Reduzierung der Anzahl an Ein-/Ausgabestationen die Wartezeiten bis zur Einlagerung oder Auslagerung der Lose deutlich verringert werden.

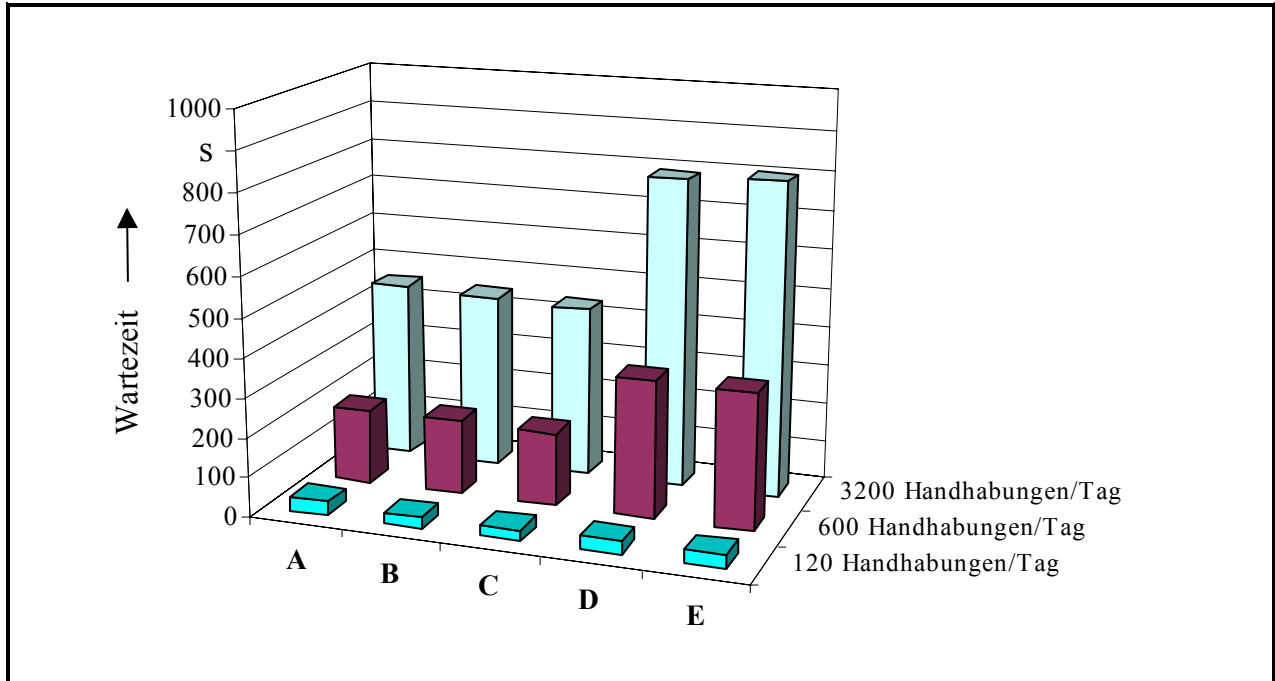


Bild 42: Durchschnittliche Wartezeiten bis zur Einlagerung oder Auslagerung der Fertigungslose bei einer unterschiedlichen Anordnung der Ein-/Ausgabestationen

4.5.4 Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur überschlägigen Auslegung der Speicher- und Handhabungskapazitäten

Der entscheidende Faktor für die Auslegung der Speicherkapazitäten in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ist die Leistungsfähigkeit des speicherintegrierten Handhabungssystems, welches die Ein- und Auslagerungsvorgänge der Kassetten und Transportbehältnisse durchführt. Wie die durchgeführten Analysen belegen existiert kein Berechnungsverfahren, mit dem die geometrische Speichergröße in Abhängigkeit von der Handhabungsgeschwindigkeit und der Anzahl an durchzuführenden Handhabungen überschlägig bestimmt werden kann. Deshalb werden im Folgenden mathematische Zusammenhänge für ein Berechnungsverfahren entwickelt, welche die ermittelten Anforderungen aus der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung berücksichtigen.

Der Zeitbedarf für die Durchführung eines gesamten Handhabungsablaufs t_{HHS} setzt sich zusammen aus den Zeitanteilen für das horizontale und vertikale Verfahren des Handhabungssystems entlang der einzelnen Speicherplätze in x- und z-Richtung sowie den Zeitanteilen für das Aufnehmen oder Absetzen eines Loses in y-Richtung hin zum einzelnen Regalplatz (siehe Bild 9). Die Zeitanteile für die Drehbewegungen des Greifsystems sind dabei aufgrund ihrer geringen Relevanz und ihrer zumeist zeitlichen Parallelität zu den Längs- und Horizontalverfahrbewegungen bezogen auf den gesamten Handhabungsablauf vernachlässigbar. Die Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten der Verfahrachsen sind aufgrund der Leistungsfähigkeit der Handhabungssysteme in der Regel sehr kurz. Um die einfache Anwendbarkeit des Berechnungs-

verfahrens für eine überschlägige Auslegung zu gewährleisten, werden die Beschleunigungswerte der einzelnen Verfahrachsen des Handhabungssystems nicht berücksichtigt.

Für die einzelnen Zeitanteile eines Handhabungsablaufes ergibt sich somit:

$$t_{HHS} = t_{\max}(t_x \cap t_z) + t_y \quad (2)$$

mit t_{\max} maximaler Zeitanteil, t_x Verfahrzeit in x-Richtung, t_y Verfahrzeit in y-Richtung, t_z Verfahrzeit in z-Richtung.

Dabei gilt für die einzelnen Zeitanteile:

$$t_x = \frac{s_x}{v_x} \quad (3)$$

$$t_y = \frac{s_y}{v_y} \quad (4)$$

$$t_z = \frac{s_z}{v_z} \quad (5)$$

mit s_x Verfahrweg in x-Richtung, v_x Geschwindigkeit in x-Richtung, s_y Verfahrweg in y-Richtung, v_y Geschwindigkeit in y-Richtung, s_z Verfahrweg in z-Richtung, v_z Geschwindigkeit in z-Richtung.

Mit (3), (4) und (5) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$t_{HHS} = \max\left(\frac{s_x}{v_x} \cap \frac{s_z}{v_z}\right) + \frac{s_y}{v_y} \quad (6)$$

Die durchschnittliche Belegung eines Speichersystems mit Losen in einem definierten Zeitintervall N_{SPint} ergibt sich aus der Anzahl an eingelagerten Losen und den bereits im Speichersystem vorhandenen Losen abzüglich der in diesem Zeitintervall ausgelagerten Lose.

$$N_{SPint} = N_{SPinhalt} + N_{SPein} - N_{SPaus} \quad (7)$$

mit $N_{SPinhalt}$ Anzahl im Speicher vorhandener Lose, N_{SPein} Anzahl in den Speicher eingelagerter Lose, N_{SPaus} Anzahl aus dem Speicher ausgelagerter Lose.

Für die Einlagerung einer durchschnittlich im Speicher vorhandenen Anzahl an Losen wird ein Speichersystem mit folgenden minimalen geometrischen Abmessungen M_{SP} benötigt:

$$M_{SP} = l_x * b_y * h_z \quad (8)$$

mit l_x Speicherlänge in x-Richtung, b_y Speicherbreite in y-Richtung, h_z Speicherhöhe in z-Richtung.

Für die geometrischen Abmessungen des Regalfaches 1 M_{Fach1} folgt:

$$M_{Fach1} = x_1 * y_1 * z_1 \quad (9)$$

mit x_1 Länge des Regalfaches 1 in x-Richtung, y_1 Breite des Regalfaches 1 in y-Richtung, z_1 Höhe des Regalfaches 1 in z-Richtung.

Bei Berücksichtigung der Anordnung von 2 Reihen von Regalfächern in x-Richtung, der Breite des mittig angeordneten Handhabungssystems HHS_y in y-Richtung und der Berücksichtigung der Standardhöhe für einen Reinraum RRH_{Std} von 3,5m gelten die folgenden Zusammenhänge:

$$l_x = \sum_1^l x_l \quad (10)$$

$$b_y = 2y_{max} + HHS_y \quad (11)$$

$$h_z = \sum_1^n z_n \leq RRH_{Std} \leq 3,5m \quad (12)$$

mit y_{max} maximale Regalfachbreite in y-Richtung.

Daraus ergibt sich für die Gesamtabmessungen eines Speichersystems unter Berücksichtigung von (9) folgender Zusammenhang:

$$M_{SP} = \sum_1^l x_l * (2y_{max} + HHS_y) * \sum_1^n z_n \quad (13)$$

Bei der Anordnung der Ein-/Ausgabestation an der Seite des Speichersystems beginnt der maximale Verfahrweg s_{xmax} in x-Richtung mittig im ersten Regalfach und endet mittig im letzten Regalfach. Der maximale Verfahrweg s_{zmax} in z-Richtung beginnt auf Bodenhöhe im ersten Fach und endet auf Bodenhöhe im letzten Regalfach. Mit (10) und (12) ergeben sich folgende Beziehungen:

$$s_{xmax} = \sum_1^{l-1} x_l \quad (14)$$

$$s_{zmax} = \sum_1^{n-1} z_n \leq 3,5m - z_n \quad (15)$$

Für den maximalen Verfahrweg s_{ymax} in y-Richtung bei 2 Reihen von Regalfächern gilt:

$$s_{y_{\max}} = \frac{1}{2} b_y = y_{\max} + \frac{1}{2} HHS_y \quad (16)$$

Daraus ergibt sich für die maximale Zeit zur Ausführung eines gesamten Handhabungsablaufes $t_{HHS_{\max}}$ unter Berücksichtigung von (6) folgende Beziehung:

$$t_{HHS_{\max}} = \max\left(\frac{\sum_{l=1}^{l-1} x_l}{v_x} \cap \frac{\sum_{n=1}^{n-1} z_n}{v_z}\right) + \frac{y_{\max} + \frac{1}{2} HHS_y}{v_y} \quad (17)$$

Die Zeit für die Ausführung eines Handhabungsablaufes beträgt bei mittlerer Belegung und mittleren Verfahrenswegen:

$$t_{HHS} = \frac{1}{2} t_{HHS_{\max}} \quad (18)$$

Die tatsächlich ausführbare Summe an Handhabungsvorgängen N_{HH} in einem definierten Zeitintervall ist:

$$N_{HH} = \frac{t_{\text{int}}}{t_{HHS}} \quad (19)$$

mit t_{int} Länge des Zeitintervalls.

Mit (17) und (18) folgt:

$$N_{HH} = \frac{2 * t_{\text{int}}}{\max\left(\frac{\sum_{l=1}^{l-1} x_l}{v_x} \cap \frac{\sum_{n=1}^{n-1} z_n}{v_z}\right) + \frac{y_{\max} + \frac{1}{2} HHS_y}{v_y}} \quad (20)$$

wobei mit (12) und (15) für einen Reinraum mit einer Standardhöhe von 3,5m gilt:

$$\sum_1^{n-1} z_n \leq 3,5m - z_n \quad (21)$$

Das entwickelte Berechnungsverfahren erlaubt, die Kapazitäten des Speicher- und Handhabungssystems in Abhängigkeit von der Anzahl an durchzuführenden Handhabungen bereits in der Grobplanungsphase überschlägig zu ermitteln. Die Berechnung erfolgt auf der Grundlage der bekannten geometrischen Maße der Regalfächer. Da die maximale Höhe des Speichersystems durch die Höhe der Reinraumdecke und die Speicherbreite durch 2 Regalfachreihen entlang eines mittig angeordneten Handhabungssystems vorgegeben sind (siehe Gleichungen (15) und (16)) kann die maximale Länge und damit auch die Kapazität des Speichersystems in Abhängigkeit von der Handhabungsanzahl bei vorgegebenen Verfahrensgeschwindigkeiten des Handhabungssystems berechnet werden. Das entwickelte Berechnungsverfahren ermöglicht auch die Bestimmung der

Geschwindigkeiten der einzelnen Verfahrsachsen des Handhabungssystems bei vorgegebener Speichergröße und Handhabungsanzahl. Ebenso kann bei der Vorgabe von Speichergröße und Verfahrgeschwindigkeiten die maximal mögliche Anzahl an Handhabungen in einem bestimmten Zeitintervall berechnet werden.

Die entwickelten mathematischen Zusammenhänge belegen, dass die maximal mögliche Frequentierungshäufigkeit eines Speichersystems von der Kapazität des integrierten Handhabungssystems abhängt. Die Kapazität des Handhabungssystems ist von den Geschwindigkeiten der einzelnen Verfahrsachsen und der Größe des Speichersystems in horizontaler und vertikaler Richtung abhängig. Daraus lässt sich ableiten, dass die Größe und die durchschnittliche Belegung eines Speichersystems sowie die Geschwindigkeit des Handhabungssystems ausschlaggebend sind, wie viele Lose in einem bestimmten Zeitintervall in ein Speichersystem ein- und ausgelagert werden können.

4.6 Zusammenfassung der Entwicklungsergebnisse und Ableitung von Leitlinien für die Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme

Die Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme muss sich an der durchgeführten Leistungsbewertung der einzelnen Systemvarianten orientieren und die entwickelten Lösungskonzepte berücksichtigen. Um den Planungsablauf zu vereinfachen und die Anwendung des Simulationsbaukastens zu optimieren, werden im Folgenden Leitlinien aus den erzielten Entwicklungsergebnissen abgeleitet, die auf der Grundlage der ermittelten Anforderungen die wirtschaftliche Planung und die bedarfsentsprechende Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ermöglichen.

■ Leitlinien zur Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme (Kapitel 4.3)

- Der **Transport der Fertigungslose direkt zum nächsten Fertigungsgerät** ist für die Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung **am besten geeignet** (Lösungsvariante 8, *Bild 31*).
- Sind am nachfolgenden Fertigungsgerät **keine freien Bearbeitungskapazitäten** vorhanden, ist es sinnvoll, die Fertigungslose in einem **dem nachfolgenden Fertigungsgerät** möglichst **nahe gelegendem Speichersystem zu lagern**.
- Die **Anzahl der Funktionselemente** im Materialfluss **reduziert** sich durch den **direkten Lostransport ohne Zwischenlagerung** der Lose im Idealfall auf **einen Transportvorgang, zwei Handhabungsvorgänge und zwei Wartezeitanteile**.
- **Weniger Einzelfunktionen im Materialfluss führen** zu einer **Minimierung der Transportzeit und der Durchlaufzeit**.

- **Weniger Einzelfunktionen im Materialfluss bewirken** außerdem eine **deutliche Verringerung der Anzahl an Automatisierungssystemen**, die für die Durchführung der Materialflussabläufe notwendig sind und führen zu **niedrigeren Investitionskosten**.
- Der Einsatz einer **hybriden Systemlösung** mit verschiedenen Transportsystemvarianten in einem fabrikweiten Gesamtsystem **führt zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems** und zu **Synergien bei der Ausführung der Transportabläufe**.

■ **Leitlinien zur Planung und Auslegung automatisierter Transportsysteme (Kapitel 4.4)**

- Für die **Minimierung der Transportzeit** eignen sich aufgrund der höheren Transportgeschwindigkeiten insbesondere **unstetige, deckengebundene Transportsysteme ohne integrierte Handhabung**.
- Insbesondere **deckengebundene Transportsysteme ohne integrierte Handhabung** leisten einen **hohen Materialdurchsatz** und sind für den **Einsatz bei langen Transportstrecken** geeignet.
- **Unstetige deckengebundene Hängebahnsysteme mit einer integrierten Handhabung** eignen sich in erster Linie für **mittlere Transportstrecken** bei einem **mittleren Materialdurchsatz**, können aber bei **entsprechender Planung und Auslegung** auch bei **längeren Transportstrecken** und bei **höheren Materialdurchsätzen** eingesetzt werden.
- **Bodengebundene Fahrerlose Transportsysteme** sind für den **Einsatz** bei einem **geringeren Materialdurchsatz** und für **kurze Transportstrecken** geeignet, wobei die **automatisch verfahrenen Systeme** eine **große Flexibilität** gegenüber **Änderungen des Transportkurses** aufweisen.
- **Deckengebundene Transportsysteme** **minimieren den Verbrauch an notwendiger Reinraumfläche** für die Installation der Systemkomponenten.
- Bei **deckengebundenen Hängebahnsystemen ohne integrierte Handhabung** ist der **fixe Anteil an den Investitionskosten hoch**, da bei diesen Systemen die Kosten für die Installation des Transportkurses und für die notwendigen Handhabungsstationen oder Speichersysteme zur Materialübergabe stark ins Gewicht fallen.
- Bei **bodengebundenen Fahrerlosen Transportsystemen** **überwiegt der variable Investitionskostenanteil**, da der Hauptteil der Kosten auf die eingesetzten Fahrzeuge entfällt und die fixen Investitionskosten niedrig sind.
- Bei **deckengebundenen Hängebahnsystemen mit einer integrierten Handhabungseinheit** können je nach Systemauslegung und Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen entweder die **fixen** oder die **variablen Investitionskosten überwiegen**.

- **Bodengebundene Fahrerlose Transportsysteme** können **hohe Substrat- und Handhabungsgewichte transportieren**, wodurch sie sich insbesondere auch für den **Einsatz in der Flachbildschirmfertigung eignen**.
 - **Deckengebundene Hängebahnsysteme ohne integrierte Handhabung** mit einem **Linearmotor** in der **Transportschiene eignen** sich ebenfalls für den **Transport von hohen Substratgewichten**, wobei für das Be- und Entladen der Fahrzeuge automatisierte Speichersysteme benötigt werden.
 - Beim Einsatz von **Transportfahrzeugen mit einer integrierten Handhabung** sind zum Be- und Entladen der Fertigungsgeräte **keine zusätzlichen Handhabungsstationen oder Speichersysteme notwendig**, wodurch insgesamt **weniger Automatisierungssysteme** benötigt werden.
- **Leitlinien zur Planung und Auslegung automatisierter Speicher- und Handhabungssysteme (Kapitel 4.5)**
- **Speichersysteme zur Zwischenlagerung von Fertigungslosen (Aufbaustruktur entsprechend der Lösungsvariante 13)** müssen über eine **große Speicherkapazität verfügen** (mehr als 200 Lose) und können bei einer **niedrigen Speicherfrequentierung voll ausgelastet** werden.
 - **Speichersysteme zur Zwischenlagerung von Fertigungslosen eignen** sich für die **mittel- bis langfristige Zwischenlagerung von Losen**, wie z.B. beim Ausfall von Fertigungsgeräten aufgrund von Störungen und Wartungsarbeiten, der Lagerung von unproduktiven Losen und zur Sammlung von Losblöcken.
 - **Speichersysteme zur Verknüpfung unterschiedlicher Transportsysteme (Aufbaustruktur entsprechend der Lösungsvariante 14)** sind aufgrund ihrer **großen Handhabungskapazität** für den **Einsatz bei einer hohen Anzahl an Handhabungen** und für einen **hohen Materialdurchsatz** sehr gut **geeignet**.
 - **Speichersysteme zur Verknüpfung unterschiedlicher Transportsysteme** mit ca. 100 bis 200 Losen Lagerkapazität **eignen** sich auch zur **kurz- bis mittelfristigen Zwischenlagerung von Losen** bei Kapazitätsengpässen an den Fertigungsgeräten oder bei Stauungen im Materialfluss.
 - **Gerätespeicher** mit einer **Aufbaustruktur** analog zur **Lösungsvariante 12 eignen** sich nur für **Einsatzfälle direkt am Fertigungsgerät** bei einer **niedrigen Frequentierung** und einem **geringen Bedarf an Speicherkapazität**.
 - **Gerätespeicher** mit einer Lagerkapazität von bis zu 100 Losen können für die **kurz bis mittelfristige Zwischenlagerung** von Losen **direkt am Fertigungsgerät** vor und nach der Bearbeitung und für die **Speicherung leerer Transportbehältnisse** während der Bearbeitung eingesetzt werden.

- Die **Auslastung der Handhabungssysteme** hängt stark von der **Frequentierungshäufigkeit des Speichersystems** ab und **steigt** bei einer **Zunahme der Anzahl an Handhabungen an**.
- Da die **Auslastung der Handhabungssysteme** von der **Anordnung der Ein-/Ausgabestationen** beeinflusst wird, müssen diese so **angeordnet** werden, dass die **Verfahrwege des Handhabungssystems** möglichst **minimiert** werden (z.B. durch eine Anordnung in der Mitte oder nahe beieinander).
- Um die **Handhabungsauslastung** zu **minimieren**, ist eine **geringe Anzahl an Ein- und Ausgabestationen** vorteilhaft.
- Die **Wartezeiten** bis zur **Ein- oder Auslagerung** eines Loses hängen von der **Anzahl an durchzuführenden Handhabungen ab** und **steigen** bei einer **Zunahme der Handhabungen an**.
- Um die **Wartezeiten** zur **Ein- oder Auslagerung** der Lose zu **minimieren**, ist eine **Reduzierung der Anzahl an Ein-/Ausgabestationen** notwendig.
- Das entwickelte **Berechnungsverfahren** ermöglicht die **überschlägige Bestimmung** der **geometrischen Abmessungen** des **Speichersystems** und der **Speicherkapazität**.
- Das Verfahren ermöglicht auch die **Berechnung** der **maximalen Handhabungsanzahl** in einem **definierten Zeitintervall** und die **Auslegung der Geschwindigkeiten** für die **einzelnen Verfahrsachsen des Handhabungssystems**.
- Die **Leistungsfähigkeit des Handhabungssystems** ist abhängig von der **Geschwindigkeit** seiner **einzelnen Verfahrsachsen**, der **Speichergröße** in **horizontaler** und **vertikaler Richtung**, der **Anzahl an durchzuführenden Handhabungen** und der **durchschnittlichen Belegung** des **Speichersystems** mit Fertigungslosen.
- Die **geometrischen Abmessungen** und die **durchschnittliche Belegung** eines **Speichersystems** sowie die **Geschwindigkeit des Handhabungssystems** sind **ausschlaggebend**, wie viel **Lose** in einem **definierten Zeitintervall** in ein **Speichersystem ein- und ausgelagert** werden können.

5 Entwicklung von Strategien für die Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

5.1 Vorgehensweise zur Strategieentwicklung

Aufbauend auf die bisher durchgeführten Arbeiten werden in den folgenden Abschnitten Strategien entwickelt, die eine Optimierung automatisierter Materialflusssysteme hinsichtlich der geforderten Zielkriterien unterstützen. In *Bild 43* ist die Vorgehensweise zur Strategieentwicklung dargestellt.

Optimierung automatisierter Materialflusssysteme		
Strategie	Optimierungsansatz	Wirkungsrichtung
Optimierte Auslegung der Automatisierungssysteme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kapazität der Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten 2. Optimierung der Fahrzeugdisposition 3. Optimierung der Fahrbereichsaufteilung 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Fertigungsgeräteaustattung, Steigerung des Substratdurchsatzes • Reduzierung der Durchlaufzeit • Reduzierung der Durchlaufzeit
Optimierung des Materialflusses	<ol style="list-style-type: none"> 4. Minimierung der Investitionskosten 5. Optimierung des Materialumlaufbestandes 6. Optimierung der Materialeingabe 7. Berücksichtigung von Prioritätenlosen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung des Umlaufbestandes, Reduzierung der Durchlaufzeit • Verringerung des Umlaufbestandes, Reduzierung der Durchlaufzeit, Steigerung des Substratdurchsatzes • Verringerung des Umlaufbestandes, Reduzierung der Durchlaufzeit, Steigerung des Substratdurchsatzes • Verringerung des Umlaufbestandes, Reduzierung der Durchlaufzeit
Optimierung der Materialflusssteuerung	<ol style="list-style-type: none"> 8. Optimierte Auswahl des nachfolgenden Fertigungsgerätes 9. Optimierte Auswahl der Fertigungslose bei freier Bearbeitungskapazität 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Durchlaufzeit • Erhöhung der Fertigungsgeräteaustattung, Steigerung des Substratdurchsatzes

Bild 43: Vorgehensweise zur Entwicklung von Strategien zur Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

5.2 Realisierung des entwickelten Simulationsbaukastens

Unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen und der in Kapitel 4.2 bis 4.5 entwickelten Strukturmodelle wird die Realisierung des Simulationsbaukastens mit seinen gesamten Teilsystemen auf der Grundlage der ausgewählten Lösungsvariante 4 durchgeführt (siehe *Bild 26*). Der Simulationsbaukasten umfasst neben dem in Kapitel 4.5 bereits realisierten *Speichermodell* das *Fabrikmodell*, das aus allen notwendigen *Automatisierungs-, Fertigungs- und Steuerungsmodulen* besteht, und die *Datenschnittstelle*, welche das Fabrikmodell mit dem Speichermodell ver-

knüpft. Der Aufbau und die wichtigsten Inhalte des entwickelten Simulationsbaukastens für die Automatisierung der Materialflusssysteme sind in *Bild 44* dargestellt. Der Simulationsbaukasten basiert auf dem objektorientierten Simulationssystem *eM-Plant* der *Fa. Tecnomatix* und verfügt über folgende Leistungsmerkmale:

- Detaillierte, realitätsgetreue Abbildung und Simulation von Automatisierungs- und Materialflusssystemen sowie Fertigungsgeräten und Fertigungsabläufen
- Abbildung der Fertigungs- und Materialflussteuerung
- Vollständig objektorientierter Aufbau (Hierarchie, Vererbung, Modularität)
- Standardbausteinbibliothek und anwenderspezifische Baukastensysteme für die detailgenaue Simulation von Halbleiter- und Flachbildschirmfertigungen sowie automatisierten Speichersystemen
- Initialisierungsfunktion zur Abbildung eines ein geschwungenen Systemzustandes beim Simulationsstart
- Objektorientierte Programmiersprache SimTalk
- Umfangreiche statistische Auswertefunktionen
- Grafische 2D-Benutzeroberfläche
- Offene Architektur / Standardschnittstellen zur Datenübernahme und -übergabe

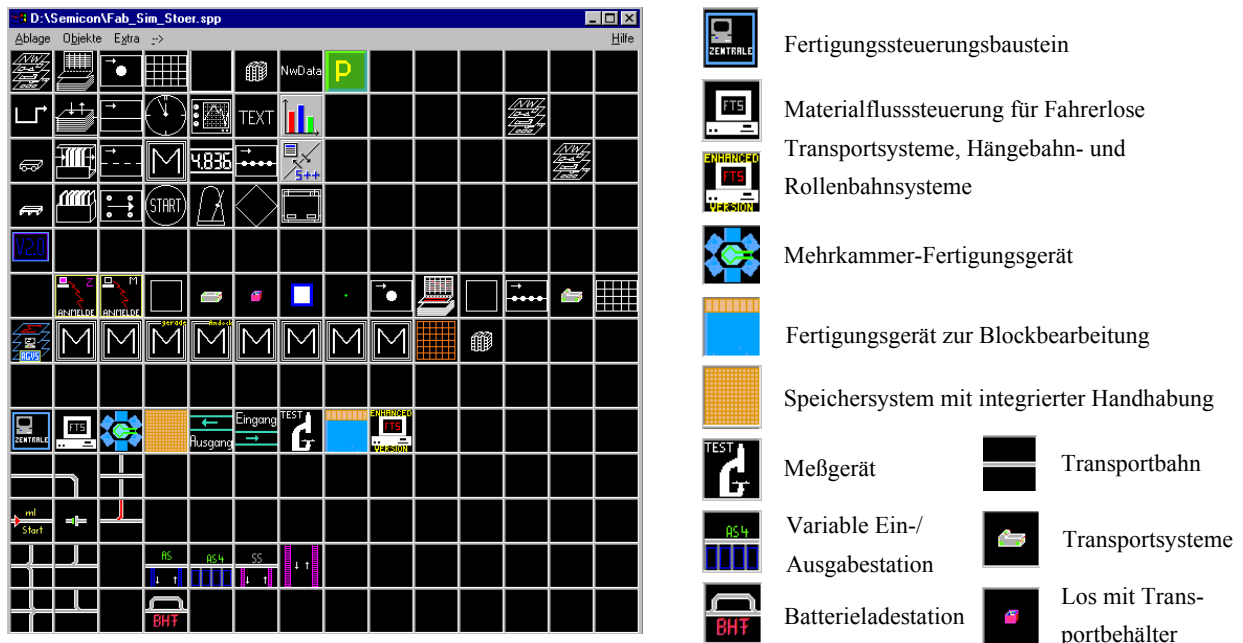


Bild 44: Aufbau und wichtige Inhalte des entwickelten Simulationsbaukastens

5.3 Definition einer Modellfabrik als Experimentierplattform und Erstellung eines Simulationsplans

Für die Entwicklung der Optimierungsstrategien wird der entwickelte Simulationsbaukasten als Experimentierplattform verwendet und ein Simulationsplan zur Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente erstellt. Für die Untersuchungen wird eine Modellfabrik definiert, deren Datenbasis einer realen Fertigungsumgebung entspricht und die realitätsgetreu alle Fertigungsabläufe in einem Simulationsmodell nachbildet. Wie die durchgeführten Analysen belegen, werden für die Herstellung von Flachbildschirmen bei vergleichbarer Fertigungstechnik und Materialflussautomatisierung nur ca. 30% bis 40% der in einer Halbleiterfertigung notwendigen Bearbeitungsschritte und Fertigungsgeräte zur Herstellung eines Produktes benötigt. Um die Durchführung der umfangreichen Simulationsexperimente sicherzustellen, wird eine Flachbildschirmfertigung als Simulationsmodell für die Experimentierplattform ausgewählt, da hier die Laufzeit der Simulationen kürzer und der Modellierungsaufwand geringer sind. Wie Erfahrungen belegen, reduziert sich dadurch der Zeit- und Kostenrahmen für den Aufbau und die Änderung der Simulationsmodelle sowie für die Durchführung der Simulationsexperimente um ca. 60% bis 70%. Das genaue Fertigungslayout der ausgewählten Modellfabrik ist in *Bild 45* dargestellt.

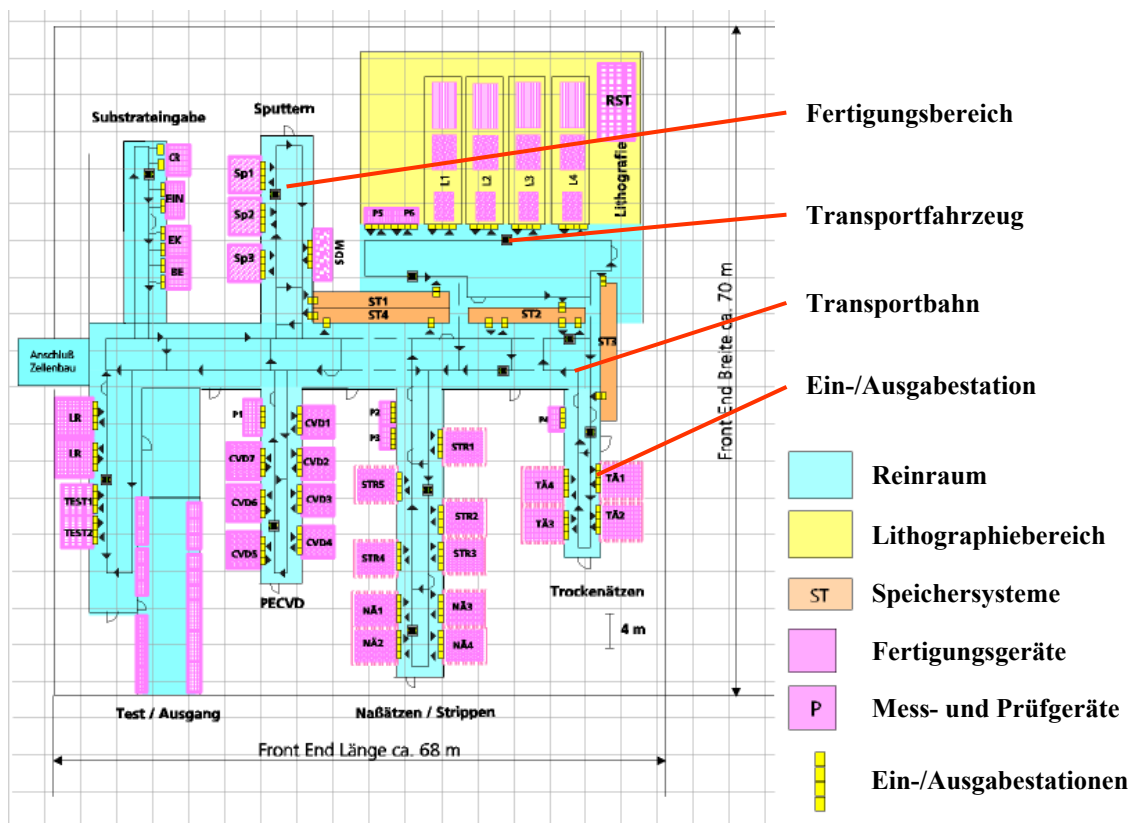


Bild 45: Fertigungslayout der als Experimentierplattform ausgewählten Modellfabrik für den Bereich Substratfertigung (Front End)

Für die Durchführung der Simulationsexperimente wird eine Datenbasis ausgewählt, welche die wesentlichen Einflussgrößen beinhaltet und den Aufbau der Modellfabrik detailliert beschreibt (Bild 46).

Datenbasis der Modellfabrik	
Teilsysteme	Systemabbildung
Fertigungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Realitätsgetreue Abbildung der Fertigungsabläufe zur Herstellung von Flachbildschirmen mit insgesamt 51 Bearbeitungs- und Prüfschritten • Sieben Fertigungsbereiche und ein Zentralkorridor • Komprimierte Anordnung der Fertigungsgeräte in einem Tunnelreinraum • 41 Fertigungs- und Prüfgeräte mit je vier Ein-/Ausgabestationen • Eingabe von 840 Substraten/Tag (42 Fertigungslose/Tag) • 10% der eingegebenen Fertigungslose sind Lose mit Prioritäten • Automatisierte Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten
Transporttechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Elf Fahrerlose Transportsysteme (Abbildung gemäß Lösungsvariante 11, Bild 35) • Ersatzweise deckengebundenes Hängebahnsystem ohne Handhabung mit zwei Transportfahrzeugen im Korridor (Abbildung gemäß Lösungsvariante 10, Bild 34) • Disposition der Fahrzeuge nach der Strategie "Kürzester Anfahrtsweg" • Transportkurs mit Verfahrwegen und Ausschleusstellen (z.B. an Fertigungsgeräten, Speichersystemen und Batterieladestationen) • Querfahrten sind im Zentralgang und in der Photolithographie möglich • Elf Batterieladestationen für Fahrerlose Transportsysteme (Batterieladung erfolgt nach Unterschreitung einer vorgegebenen Kapazitätsgrenze) • Warteposition der Transportfahrzeuge an den Batterieladestationen
Speicher- und Handhabungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Vier automatische Speichersysteme mit 200 Plätzen, die bei Bedarf erhöht werden können (Abbildung gemäß den Lösungsvarianten 13 und 14) • Integriertes Handhabungssystem in den Speichersystemen • Automatisierte Ein-/Ausgabestationen zur Materialübergabe
Materialfluss-automatisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Direkter Lostransport mit einem Transportsystem von einem Fertigungsgerät zum nächsten bzw. zu einem dem nächsten Fertigungsgerät nahe gelegenen Speichersystem (Abbildung gemäß Lösungsvariante 8, Bild 31) • Keine Aufteilung des Transportkurses in einzelne Fahrbereiche
Steuerungssystem	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigungssteuerungssystem zur Planung der Fertigungsabläufe und zur Auswahl der Transportaufträge • Transportsteuerung zur Koordinierung und Überwachung der Transport- und Speichersysteme und zur Fahrzeugauswahl • Losbereitstellung an den Ein-/Ausgabestationen der Speichersysteme und Anfahrt des angeforderten Transportfahrzeuges zum Speicher erfolgen parallel • Berücksichtigung von Störungen und Wartungsarbeiten bei Fertigungsgeräten, Transport-, Speicher- und Handhabungssystemen • Verwaltung von leeren und gefüllten Substratkassetten • Reinigung der Substratkassetten am Ende eines Fertigungsdurchlaufs

Bild 46: Datenbasis der Modellfabrik

Zur Durchführung der Simulationsuntersuchungen werden ausgehend von der beschriebenen Modellfabrik mit Hilfe des entwickelten Simulationsbaukastens verschiedene Einflussgrößen verändert, um die Auswirkungen auf die Planung, Auslegung und Optimierung der automatisier-

ten Materialflusssysteme quantifizieren zu können. Für jede dieser Einflussgrößen werden in mehreren Simulationsläufen Ergebnisse für die in *Bild 43* aufgeführten Optimierungsansätze ermittelt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet. Als Ergebnis dieser Entwicklungsarbeiten werden abschließend Lösungskonzepte und Strategien abgeleitet, die eine Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ermöglichen.

Um die Zeitdauer für die Simulationsläufe zu verringern, wird eine Initialisierungsfunktion entwickelt und in den Simulationsbaukasten integriert, welche einen Simulationsstart zu einem definierten Fertigungszeitpunkt ermöglicht. Dadurch entfällt die bei einem leeren Simulationsmodell vorhandene zeitintensive Hochlaufphase und die Simulationsuntersuchungen können sofort in einem eingeschwungenen Fertigungszustand gestartet werden.

Durchgeführte Simulationsexperimente zeigen, dass durch den Einsatz dieser Initialisierungsfunktion eine Simulationszeit von 150 Tagen zur Ermittlung der Simulationsergebnisse ausreichend ist. Um die Simulationsexperimente zielgerichtet durchführen zu können, wird ein Simulationsplan benötigt (*Bild 47*). Der Simulationsplan legt die Inhalte der Simulationsuntersuchungen fest und dokumentiert die erzielten Ergebnisse.

Simulationsplan		
Teilsysteme	Auswerteparameter	Beschreibungsfunktion
Fertigungs- gerät	Bearbeitung [%]	Prozentualer Zeitanteil für die Bearbeitung der Fertigungslose inklusive aller Nebenzeiten bezogen auf die Gesamtzeit
	Störungen/Wartungen [%]	Prozentualer Zeitanteil an Störungen und Wartungsarbeiten
	Wartezeit [%]	Verfügbarer Zeitanteil für die Bearbeitung weiterer Fertigungslose
Transport- system	Transportfahrten [%]	Prozentualer Fahrtanteil eines Transportfahrzeuges mit einem Fertigungslos bezogen auf die Gesamtzeit
	Leerfahrten [%]	Prozentualer Leerfahrtanteil eines Fahrzeuges ohne ein Fertigungslos
	Handhabung [%]	Prozentualer Zeitanteil eines Fahrzeuges für die Loshandhabung
	Batterieladung [%]	Prozentualer Zeitanteil für Batterieladung und Fahrten zur Ladung
	Wartezeit [%]	Verfügbarer Zeitanteil für den Transport weiterer Fertigungslose
Speicher- system	Ø Belegung [Lose]	Mittlere Belegung eines Speichersystems mit Losen
	Max. Belegung [Lose]	Maximale Belegung eines Speichersystems mit Losen
	Ø Verweilzeit [h:min]	Gesamte mittlere Verweilzeit eines Loses im Speichersystem
Handhabung	Ø Auslastung [%]	Mittlere Auslastung des Handhabungssystems im Speicher
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	Durchsatz an Losen pro Tag mit hoher Priorität durch die Fertigung
	Priorität 2 [Lose/Tag]	Durchsatz an Losen pro Tag ohne Priorität durch die Fertigung
Durch- laufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	Durchlaufzeit eines Loses mit hoher Priorität durch die Fertigung
	Priorität 2 [d:h:min]	Durchlaufzeit eines Loses ohne Priorität durch die Fertigung
Umlauf- bestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	Mittlerer Umlaufbestand an Losen in der Fertigung
	Max. Umlaufbestand [Lose]	Maximaler Umlaufbestand an Losen in der Fertigung

Bild 47: Simulationsplan zur Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente

Um die Auswirkungen einzelner Maßnahmen zur Optimierung automatisierter Materialflusssysteme bewerten zu können, wird die Leistungsfähigkeit und das Systemverhalten für ausgesuchte Teilsysteme der Modellfabrik untersucht und bewertet. Ziel dieser Bewertung ist es, auf der Basis reproduzierbarer Simulationsergebnisse aussagefähiges Datenmaterial für die Ableitung der Optimierungsstrategien zu erhalten. Als Auswerteparameter für die Untersuchung des Systemverhaltens bei einem Fertigungsgerät wird ein Aluminiumbeschichter ausgewählt, der sehr hoch ausgelastet ist und für den aufgrund der hohen Investitionskosten keine redundante Fertigungskapazität zur Verfügung steht. Wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen ist die Betrachtung des Systemverhaltens des Fahrerlosen Transportsystems und seiner Transportfahrzeuge, da es die entscheidende Komponente für die Auslegung und Optimierung der Materialflusssysteme darstellt (z.B. legt ein Transportfahrzeug in 50 Tagen bis zu 2000 Kilometer zurück).

Für die Untersuchung des Verhaltens automatisierter Speichersysteme wird das Speichersystem aus dem Fertigungsbereich Trockenätzen mit einem integrierten Handhabungssystem ausgewählt, da dieses Speichersystem stark ausgelastet ist und einen Engpass im Materialfluss darstellen kann. Um die Ergebnisse der Simulationsläufe bewerten zu können, werden die vorgegebenen Zielkriterien (siehe Kapitel 2.1) zum Teil in die Auswertung einbezogen, da sie neben den Investitionskosten für die Automatisierungssysteme die wirtschaftliche Automatisierung der Materialflusssysteme maßgeblich beeinflussen.

5.4 Strategien zum optimierten Einsatz der Automatisierungssysteme

5.4.1 Kapazität der Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten

Um die Auslastung der Fertigungsgeräte zu verbessern, müssen an den Ein-/Ausgabestationen eines Fertigungsgerätes freie Kapazitäten zur Übernahme eines Transportloses vorhanden sein. Gleichzeitig besteht die Forderung, die Anzahl an Ein-/Ausgabestationen aufgrund der hohen Kosten möglichst gering zu halten. Um die Ein-/Ausgabestationen optimal auslegen zu können, werden die Einflüsse unterschiedlicher Kapazitäten an den Ein-/Ausgabestationen der Fertigungsgeräte in der Modellfabrik mit Hilfe des Simulationsbaukastens untersucht, hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet und geeignete Optimierungsstrategien abgeleitet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in *Bild 48* für Ein-/Ausgabestationen zur Aufnahme von ein, zwei, drei oder vier Substratkassetten mit Losen dargestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass bei nur einer Ein-/Ausgabestation an den Fertigungsgeräten der mögliche Durchsatz an Losen durch die Fertigung um ca. 40% verringert wird und sich die Durchlaufzeit eines Loses um den Faktor 7 bei steigender Tendenz erhöht. Gleichzeitig verdoppeln sich die frei verfügbaren Wartezeitanteile des Aluminiumbeschichters und des Transportsystems, in denen weitere Fertigungslose bearbeitet bzw. transportiert werden können. Da auch die mittlere Belegung des Speichersystems, die Verweilzeit der Lose im Speichersystem und der Umlaufbestand stetig ansteigen, führt der Einsatz von nur einer Ein-/Ausgabestation letztendlich zu einer signifikanten Reduzierung der Fertigungskapazität.

Bei einer Erhöhung der Kapazität der Ein-/Ausgabestationen auf einen Wert von zwei, drei oder vier Fertigungslosen verringern sich der mittlere und der maximale Umlaufbestand um bis zu 20% und die Durchlaufzeit der Lose mit und ohne Priorität um ca. 30%. Während der für weitere Transporte nutzbare und frei verfügbare Wartezeitanteil des Transportsystems mit der Zunahme der Kapazität an den Ein-/Ausgabestationen um 50% ansteigt, sinkt die Auslastung des Handhabungssystems um ca. 20%. Ebenso sinkt die mittlere und die maximale Belegung des Speichersystems um bis zu 40% und die mittlere Verweilzeit der Lose im Speicher um ca. 20%. Da der Durchsatz und die Auslastung des Aluminiumbeschichters während der Erhöhung der Ein-/Ausgabekapazität von zwei auf vier Lose ungefähr gleich bleiben, zeigt sich eindeutig, dass die aufgeführten positiven Effekte auf die Steigerung der Ein-/Ausgabekapazitäten zurückzuführen sind.

Simulationsplan für Ein-/Ausgabestationen mit einer unterschiedlichen Kapazität					
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse			
		1 Ein-/Ausgabe	2 Ein-/Ausgaben	3 Ein-/Ausgaben	4 Ein-/Ausgaben
Fertigungsgerät	Bearbeitung [%]	69	78	78	78
	Störungen/Wartungen [%]	12	13	13	14
	Wartezeit [%]	19	9	9	8
Transportsystem	Transportfahrten [%]	10	13	13	11
	Leerfahrten [%]	16	31	30	26
	Handhabung [%]	10	15	14	14
	Batterieladung [%]	13	19	19	16
	Wartezeit [%]	51	22	24	33
Speichersystem	Ø Belegung [Lose]	706	90	74	49
	Max. Belegung [Lose]	1000	300	278	190
	Ø Verweilzeit [h:min]	190:46	19:09	17:21	13:29
Handhabung	Ø Auslastung [%]	20,0	26,0	23,8	20,4
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	4,0	4,5	4,5	4,4
	Priorität 2 [Lose/Tag]	20,1	36,4	36,8	37,0
Durchlaufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	1:11:02	1:11:24	1:12:23	1:10:40
	Priorität 2 [d:h:min]	29:06:24	6:16:27	6:04:53	4:17:08
Umlaufbestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	1166	249	232	179
	Max. Umlaufbestand [Lose]	2544	391	365	346

Bild 48: Simulationsergebnisse für die Optimierung der Anzahl von Ein-/Ausgabestationen an den Fertigungsgeräten

Die Ergebnisse belegen weiter, dass für jedes einzelne Fertigungsgerät die Kapazitäten an den Ein-/Ausgabestationen mit Hilfe des Simulationsbaukastens ausgelegt und optimiert werden müssen, um die Zielkriterien Durchsatz, Durchlaufzeit und Umlaufbestand zu verbessern und die Investitionskosten zu minimieren. Die Simulationsergebnisse für die einzelnen Fertigungsgeräte zeigen, dass bei durchschnittlich ausgelasteten Fertigungsgeräten eine Kapazität von drei Ein-/Ausgabestationen und bei Test- und Prüfgeräten in der Regel eine Kapazität von zwei Stationen

im Normalfall ausreicht. Um sehr hoch ausgelastete Fertigungsgeräte oder Fertigungsgeräte ohne ausreichende Maschinenredundanz optimal auszulegen, müssen entweder Ein-/Ausgabestationen mit einer Kapazität von 4 Plätzen oder Gerätespeicher entsprechend der Lösungsvariante 12 eingesetzt werden. Die höhere Speicherkapazität führt zu einer verbesserten Auslastung der Fertigungsgeräte, da diese bei Engpässen im Materialfluss und bei Störungen an den Automatisierungssystemen länger weiterarbeiten können.

5.4.2 Optimierung der Fahrzeugdisposition

Ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung und Optimierung unstetig verfahrenender Transportsysteme ist die Auswahl einer geeigneten Strategie zur Disposition der Leerfahrzeuge, welche die Zuordnung eines freien Transportfahrzeuges zu einem wartenden Transportauftrag festlegt. Um die Fahrzeugdisposition bei der Herstellung von Flachbildschirmen zu optimieren, wurde simulativ mit Hilfe der Experimentierplattform die kombinierte Dispositionsstrategie entwickelt. Diese Strategie wird im Folgenden mit vier aus der Literatur ausgewählten und für diesen Einsatzfall besonders geeigneten Strategien verglichen und auf ihre Eignung im vorliegenden Einsatzfall untersucht.

Bei der Auswahl eines Transportfahrzeuges aufgrund der **kürzesten Wartezeit eines Fahrzeuges ohne Transportauftrag** werden die Wartezeiten zwischen dem Beenden eines Transportauftrages und der Annahme eines neuen Auftrages möglichst kurz gehalten. Da die Disposition des Fahrzeuges nach der Regel Last In First Out (LIFO) erfolgt, wird zudem eine hohe Auslastung der Transportfahrzeuge erreicht. Die Auswahl eines Transportfahrzeuges nach dem Prinzip der **längsten Wartezeit eines Fahrzeuges ohne Transportauftrag** führt zu einer gleichmäßigen Auslastung der Transportfahrzeuge. Bei dieser Dispositionsvariante wird für den nächsten Transportauftrag das Fahrzeug ausgewählt, welches am längsten ohne Auftrag in der Warteschlange steht. Eine weitere Variante zur Disposition eines Transportfahrzeuges ist die **zufällige Auswahl eines freien Transportfahrzeuges**, bei der nach dem Zufallsprinzip ein beliebiges Fahrzeug ausgewählt wird.

Die Auswahl eines Leerfahrzeuges aufgrund des **kürzesten Anfahrtsweges eines freien Transportfahrzeuges** bis zur Übernahme eines Transportloses ist eine weitere mögliche Variante zur Fahrzeugdisposition. Diese Variante bewirkt eine Minimierung der Leerfahrtanteile der einzelnen Transportfahrzeuge. Bei der entwickelten Variante zur **kombinierten Auftragsdisposition bis zur Losübernahme** handelt es sich um eine Dispositionsstrategie, die mit einer optimierten Auftragsdisposition kombiniert wird. Bei dieser Strategie wird nach der Auswahl eines Auftrages (Auftrag 1) überprüft, ob für den Zielort zur Auftragsübernahme ein weiterer Transportauftrag (Auftrag 2) vorliegt. Liegt für diesen Zielort ein Auftrag vor, wird ein Fahrzeug nach der Strategie des kürzesten Anfahrtsweges ausgewählt, mit diesem das für den Zielort bestimmte Transportlos (Auftrag 2) abgeholt und nach der Beendigung dieses Transportauftrages dann am Zielort das andere Transportlos (Auftrag 1) übernommen und weitertransportiert. Die Anwendung dieser Dispositionsstrategie ermöglicht zwei Transportaufträge mit demselben Fahrzeug durchzuführen, wodurch eine geringere Auslastung der Transportfahrzeuge erzielt wird.

Die Ergebnisse der Auswertungen über den Einfluss der unterschiedlichen Strategievarianten auf die einzelnen Teilsysteme sind in *Bild 49* dargestellt.

Simulationsplan zur Fahrzeugdisposition						
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse				
		Kürzeste Wartezeit	Längste Wartezeit	Zufällige Auswahl	Kürzeste Anfahrt	Kombinierte Disposition
Fertigungs- gerät	Bearbeitung [%]	78	78	78	78	78
	Störungen/Wartungen [%]	14	12	14	14	13
	Wartezeit [%]	8	10	8	8	9
Transport- system	Transportfahrten [%]	11	11	11	11	11
	Leerfahrten [%]	34	33	34	26	22
	Handhabung [%]	14	11	14	14	14
	Batterieladung [%]	19	18	18	16	15
	Wartezeit [%]	22	24	23	33	38
Speicher- system	Ø Belegung [Lose]	63	58	52	49	79
	Max. Belegung [Lose]	234	197	249	190	272
	Ø Verweilzeit [h:min]	15:24	14:02	13:44	13:29	18:47
Handhabung	Ø Auslastung [%]	11,3	11,5	10,4	20,4	11,6
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	4,3	4,6	4,1	4,4	4,4
	Priorität 2 [Lose/Tag]	37,0	36,3	37,1	37,0	37,5
Durch- laufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	1:11:53	1:11:44	1:12:11	1:10:40	1:12:42
	Priorität 2 [d:h:min]	4:21:13	4:15:29	4:17:59	4:17:08	5:12:29
Umlauf- bestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	185	176	180	179	209
	Max. Umlaufbestand [Lose]	279	352	340	346	413

Bild 49: Simulationsergebnisse für die Optimierung der Fahrzeugdisposition

Die Ergebnisse zeigen, dass die Auslastung des Aluminiumbeschichters bei allen Dispositionsstrategien ungefähr gleich ist. Der Wartezeitanteil der einzelnen Transportfahrzeuge, der zur Ausführung weiterer Transportfahrten genutzt werden kann, ist bei der Strategie **kürzeste Anfahrt** um bis zu 50% und bei der **kombinierten Strategie** um bis zu 75% höher als bei den anderen Strategien. Dadurch wird im Idealfall eine geringere Auslastung der Transportfahrzeuge erzielt, was auch zu geringeren Investitionskosten führt. Die kombinierte Strategie weist außerdem die höchsten Werte im Bereich der mittleren und der maximalen Belegung eines Speichersystems sowie bei der durchschnittlichen Verweilzeit der Lose im Speichersystem auf. Da auch die Werte für die Durchlaufzeiten, die Durchsätze und den Umlaufbestand höher sind als bei den anderen Strategien, lässt sich ableiten, dass die kombinierte Auftragsdisposition insbesondere für die volumenorientierte Fertigung von Massenprodukten in der Modellfabrik geeignet ist.

Die Dispositionsstrategien **längste Wartezeit**, **zufällige Auswahl** und **kürzeste Anfahrt** eines Transportfahrzeuges weisen die besten Ergebnisse bei den Durchlaufzeiten, dem mittleren Umlaufbestand sowie bei der Belegung und den Verweilzeiten der Lose im Speichersystem auf. Aufgrund der geringeren Auslastung der Transportfahrzeuge wird die Dispositionsstrategie **kürzeste Anfahrt** eines Transportfahrzeuges für eine durchlauforientierte Fertigung ausgewählt.

5.4.3 Optimierung der Fahrbereichsaufteilung

Der Einsatz eines fabrikweiten Transportsystems ermöglicht den direkten Transport eines Loses von einem Fertigungsgerät zum nächsten mit nur einem Transportfahrzeug (Lösungsvariante 8, *Bild 31*). Die durchgeführte Bewertung belegt, dass dieses Automatisierungskonzept die Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge deutlich reduziert. Um bei diesem Automatisierungskonzept lange und unproduktive Leerfahrten der Fahrzeuge bis zur Aufnahme eines Transportloses zu vermeiden, wird eine Optimierungsstrategie entwickelt, welche die Zuordnung der Transportaufträge zu den Leerfahrzeugen optimiert.

Der Kern dieser Optimierungsstrategie ist die Aufteilung des kompletten Transportkurses in einzelne virtuelle Fahrbereiche. Da sich diese Aufteilung nur auf die Fahrzeugdisposition bezieht, können die Transportfahrzeuge diese Fahrbereiche jederzeit wechseln. Durch diese Maßnahme werden bei der Fahrzeugdisposition nur Leerfahrzeuge berücksichtigt, die sich in demselben Fahrbereich befinden, wie das zu transportierende Fertigungslos. Steht kein Leerfahrzeug innerhalb eines Fahrbereiches zur Verfügung, wird durch die Einführung eines zeitlichen Dispositionsfaktors festgelegt, ab wann das Fertigungslos einem Leerfahrzeug aus einem anderen Fahrbereich zugeordnet werden kann.

Um die Fahrbereichsaufteilung zu optimieren werden mit Hilfe der Ergebnisse aus den Simulationsuntersuchungen drei Optimierungsvarianten konzipiert, die sich hinsichtlich der Anzahl an Fahrbereichen und der Größe des Zeitfaktors unterscheiden.

- Aufteilung in 2 Fahrbereiche mit einem zeitlichen Dispositionsfaktor von 1 Minute
- Aufteilung in 2 Fahrbereiche mit einem zeitlichen Dispositionsfaktors von 2 Minuten
- Aufteilung in 3 Fahrbereiche mit einem zeitlichen Dispositionsfaktor von 2 Minuten

In *Bild 50* sind die anhand der Experimentierplattform ermittelten Auswerteparameter für die entwickelten Optimierungsvarianten aufgeführt und einer Variante ohne Fahrbereichsaufteilung gegenübergestellt.

Die durchgeführten Simulationsuntersuchungen belegen, dass die Auslastung des Aluminiumbeschichters bei allen Varianten ungefähr gleich ist. Im Gegensatz dazu ist die Wartezeit der Transportfahrzeuge bei einer Aufteilung in 3 Fahrbereiche und einem Dispositionsfaktor von 2 Minuten um bis zu 25% höher als bei den anderen Varianten. Bei der mittleren und maximalen Belegung der Speichersysteme und der durchschnittlichen Verweilzeit der Lose im Speichersystem ergeben sich die besten Werte für die Variante ohne Aufteilung und um ca. 20% bessere Werte als bei der Aufteilung in 3 Fahrbereiche.

Die Auswertung zeigt weiter, dass die Optimierungsvariante mit einer Aufteilung in 2 Fahrbereiche und die Einführung eines zeitlichen Dispositionsfaktors von 1 Minute im Hinblick auf die festgelegten Zielkriterien die besten Ergebnisse liefert. Da diese Variante die besten Durchsatzwerte, um bis zu 20% niedrigere Durchlaufzeiten und einen um bis zu 30% niedrigeren Umlaufbestand aufweist, wird sie als Optimierungsansatz ausgewählt, um die Disposition der Transport-

fahrzeuge zu optimieren. Aus der Bewertung der erzielten Ergebnissen lässt sich somit ableiten, dass bei einem direkten Lostransport gemäß Lösungsvariante 8 durch die Aufteilung des Transportkurses in virtuelle Fahrbereiche und die Einführung eines zeitlichen Dispositionsfaktors der Durchsatz gesteigert und die Durchlaufzeit verringert werden kann.

Simulationsplan zur Fahrbereichsaufteilung					
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse			
		Keine Aufteilung	2 Bereiche, 1 Minute	2 Bereiche, 2 Minuten	3 Bereiche, 2 Minuten
Fertigungs- gerät	Bearbeitung [%]	78	78	77	78
	Störungen/Wartungen [%]	14	13	14	12
	Wartezeit [%]	8	9	9	10
Transport- system	Transportfahrten [%]	11	12	11	24
	Leerfahrten [%]	26	25	24	11
	Handhabung [%]	14	14	14	14
	Batterieladung [%]	16	15	15	12
	Wartezeit [%]	33	34	36	42
Speicher- system	Ø Belegung [Lose]	49	58	59	69
	Max. Belegung [Lose]	190	177	208	193
	Ø Verweilzeit [h:min]	13:29	14:59	15:41	17:09
Handhabung	Ø Auslastung [%]	20,4	10,8	10,6	11,2
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	4,4	4,0	4,2	4,5
	Priorität 2 [Lose/Tag]	37,0	37,8	36,7	36,4
Durch- laufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	1:10:40	1:09:43	1:11:22	1:11:25
	Priorität 2 [d:h:min]	4:17:08	4:04:25	4:09:53	5:00:45
Umlauf- bestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	179	161	169	190
	Max. Umlaufbestand [Lose]	346	241	305	332

Bild 50: Simulationsergebnisse für die Optimierung der Fahrbereichsaufteilung

5.5 Strategien zur Optimierung des Materialflusssystems

5.5.1 Minimierung der Investitionskosten

Grundlagen für die wirtschaftliche Automatisierung der Materialflusssysteme sind die bedarfsentsprechende Planung, Auslegung und Optimierung der eingesetzten Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme. Die durchgeführte Leistungsbewertung unterschiedlicher Transportsystemvarianten hat ergeben, dass für den Transport von Fertigungslosen in einer Flachbildschirmfertigung aufgrund der großen Transportgewichte insbesondere Fahrerlose Transportsysteme geeignet sind. Sie verfügen über eine integrierte Handhabungseinheit und sind in der Lage, die bis zu über 50kg schweren Substratkassetten mit Fertigungslosen zu transportieren und zu handhaben.

Die Bewertung zeigt auch, dass für den Einsatz bei längeren Transportstrecken, wie z.B. im Zentralkorridor, Hängebahnsysteme ohne Handhabung geeignet sind, die aufgrund des großen Transportgewichtes der Flachbildschirme mit einem in die Transportschiene integrierten Linearantrieb ausgerüstet sind. Aufbauend auf diesen Überlegungen und den in Kapitel 4.3 durchgeführten Entwicklungsarbeiten werden im Folgenden unterschiedliche Lösungsvarianten zur Materialflussautomatisierung für die Modellfabrik konzipiert, mit Hilfe der Experimentierplattform untersucht und im Hinblick auf ihre Investitionskosten bewertet.

Lösungsvariante 17: Automatische Fahrerlose Transportsysteme in den Fertigungsbereichen und Hängebahnsystem ohne Handhabung im Zentralkorridor

Die Lösungsvariante 17 baut auf den Ergebnissen der Lösungsvariante 5 auf (siehe *Bild 28*) und verfügt über automatische Fahrerlose Transportsysteme in den Fertigungsbereichen und im Zentralkorridor. Die durchgeführte Leistungsbewertung zeigt, dass sich für die Durchführung der Transportaufträge bei dieser Variante innerhalb der Fertigungsbereiche am besten Fahrerlose Transportsysteme und im Zentralkorridor ein deckengebundenes Hängebahnsystem mit Transportfahrzeugen ohne Handhabungseinrichtungen und einem Linearantrieb eignen. Zur Übergabe der Fertigungslose und zur Verknüpfung der Transportsysteme werden Speichersysteme mit einem integrierten Handhabungssystem entsprechend der Lösungsvariante 14 eingesetzt.

Lösungsvariante 18: Automatische Fahrerlose Transportsysteme in den Fertigungsbereichen und im Zentralkorridor

Die Lösungsvariante 18 entspricht in ihrem Aufbau ebenfalls der Lösungsvariante 5 (siehe *Bild 28*). Um die Anzahl der unterschiedlichen Transportsysteme zu beschränken, werden im Gegensatz zur vorigen Variante auch im Zentralkorridor automatische Fahrerlose Transportsysteme eingesetzt.

Lösungsvariante 19: Automatische Fahrerlose Transportsysteme in den Fertigungsbereichen und Speichersysteme zur Transportverknüpfung im Zentralkorridor

Die Lösungsvariante 19 mit Speichersystemen im Zentralkorridor zur Verknüpfung der Fahrerlosen Transportsysteme in den Fertigungsbereichen entspricht in ihrem Aufbau der Lösungsvariante 6 (siehe *Bild 29*). Um die Redundanz und die Verfügbarkeit der Transportfahrzeuge in einem Fertigungsbereich zu verbessern und die Anzahl der Speichersysteme für die Losübergabe zu verringern, werden die sieben Fertigungsbereiche und der Zentralkorridor zu fünf eigenständigen virtuellen Transportbereichen mit einem zeitlichen Dispositionsfaktor von einer Minute zusammengefasst. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass zur Minimierung der erforderlichen Anzahl an Transportfahrzeugen die virtuellen Transportbereiche aufgrund der längeren Anfahrts- und Transportwege nicht zu groß gewählt werden dürfen. Zur Übergabe der Fertigungslose und zur Verknüpfung der eigenständigen Transportsysteme werden ebenfalls Speichersysteme mit einem integrierten Handhabungssystem analog zur Lösungsvariante 14 eingesetzt.

Lösungsvariante 20: Direkter Lostransport mit einem Transportsystem von einem Fertigungsgerät zum nächsten oder zu einem dem nächsten Fertigungsgerät nahe gelegenen Speichersystem

Um den direkten Lostransport von einem Fertigungsgerät zum nächsten zu ermöglichen, wird entsprechend zur Lösungsvariante 8 (siehe *Bild 31*) bei dieser Variante nur ein automatisches Fahrerloses Transportsystem für alle Fertigungsbereiche und den Zentralkorridor eingesetzt, das direkt von einem Fertigungsgerät zum nächsten verfahren kann. Falls am Fertigungsgerät oder an den Ein-/Ausgabestationen keine freien Kapazitäten verfügbar sind, werden die Fertigungslose in einem nahe gelegenen Speichersystem zwischengelagert.

Um die Investitionskosten zu minimieren, müssen die Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme bedarfsentsprechend für jede Lösungsvariante ausgelegt werden. In *Bild 51* sind die Ergebnisse umfangreicher Simulationsuntersuchungen für die optimale Auslegung der einzelnen Automatisierungssysteme und die daraus abgeleiteten Investitionskosten zusammengefasst. Bei der Berechnung der Investitionskosten sind keine Kosten für Ersatzteile, Wartung und Service im laufenden Betrieb berücksichtigt.

Lösungsvarianten zur Minimierung der Investitionskosten					
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse			
		Variante 17: FTS und Hängebahn	Variante 18: Automa- tische FTS	Variante 19: Speicher zur Verknüpfung	Variante 20: Direkter Lostransport
Automatisie- rungssysteme	Transportfahrzeuge Hängebahn [Anzahl]	2	—	—	—
	Fahrzeuge FTS [Anzahl]	10	12	12	10
	Speichersysteme [Anzahl]	8	8	5	4
Investitionskosten [Mio. EURO]	Transportsysteme	3,5	3,0	3,0	2,5
	Speichersysteme	4,0	4,0	2,5	2,0
	Materialflusssteuerung	1,0	1,0	1,0	1,0
	Installation	1,5	1,5	1,5	1,5
	Gesamtkosten [Mio. EURO]	10,0	9,5	8,0	7,0
Zielkriterien	Durchsatz [Los/Tag]	42	42	42	42
	Ø Durchlaufzeit [d:h]	5:09	5:13	4:17	4:17
	Ø Umlaufbestand [Lose]	210	205	179	179
	Max. Umlaufbestand [Lose]	335	361	346	346
Die ausgewählte Lösungsvariante ist dunkel hinterlegt					

Bild 51: Investitionskosten für unterschiedliche Lösungsvarianten zur Automatisierung der Materialflusssysteme in der Modellfabrik

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesamtanzahl an eingesetzten Automatisierungssystemen bei den Lösungsvarianten 19 und 20 am geringsten ist und dadurch auch die Investitionskosten für die Automatisierung der Materialflusssysteme um bis zu 30% reduziert werden. Während der

Durchsatz an Fertigungslosen bei allen Varianten gleich ist, sind bei einem direkten Lostransport mit einem fabrikweiten Fahrerlosen Transportsystem auch die Durchlaufzeiten und der mittlere Umlaufbestand um bis zu 15% geringer. Die Zusammenfassung der erzielten Simulationsergebnisse bestätigt die Entwicklungsergebnisse aus Kapitel 4.3 und zeigt, dass bei der Lösungsvariante 20 mit einem direkten Lostransport die Investitionskosten für die Automatisierung der Materialflusssysteme am geringsten sind.

Die detaillierte Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt für die Lösungsvariante 20 mit einem direkten Lostransport gegenüber den anderen Lösungsvarianten folgende Vorteile:

- Reduzierung der Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge um bis zu 50%
- Verringerung der Transportzeiten um bis zu 50% (z.B. durch die Einführung von Querfahrten zur Fahrkursoptimierung)
- Reduzierung der Fahrzeuganzahl um bis zu 17% (z.B. durch eine höhere Auslastung der einzelnen Transportfahrzeuge)
- Geringere Auslastung der Speicher- und Handhabungssysteme um bis zu 50%
- Reduzierung der Speichersysteme um bis zu 50%
- Erzielung einer größeren Flexibilität bei Ausfällen der Speichersysteme

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt weiter, dass bei der Lösungsvariante 20 eine große Anzahl an Kreuzungspunkten im Transportkurs vorhanden sind und eine höhere Verkehrsdichte im Zentralgang auftritt, was insbesondere bei einem hohen Durchsatz an Fertigungslosen berücksichtigt werden muss. Außerdem können die Transportaufträge bei Kapazitätsengpässen besser auf die einzelnen Transportfahrzeuge aufgeteilt werden.

5.5.2 Optimierung der Eingabemenge an Fertigungslosen

Um die Leistungsfähigkeit der Modellfabrik genauer bestimmen zu können, wird in den folgenden Simulationsuntersuchungen die Menge der in einem bestimmten Zeitraum in die Fabrik eingegebenen Fertigungslose variiert. Die Auswirkungen unterschiedlich hoher Einlastungsmengen sind in *Bild 52* dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei einer Reduzierung der ursprünglich vorgesehenen Eingabemenge von 42 Losen um ca. 10% auf 38 Lose die Durchlaufzeit für Lose ohne Fertigungspriorität (Priorität 2) um ca. 30% verkürzt, während sie sich bei einer Erhöhung um ca. 10% auf 46 Eingabelose mehr als verdoppelt. Die Erhöhung der Eingabemenge von 38 auf 46 Lose pro Tag führt zu einer Erhöhung der Durchlaufzeit um mehr als das 2,5-fache. Die Ursache für die Zunahme der Durchlaufzeit bei einer Erhöhung der Eingabemenge auf 46 Lose ist, dass der Aluminiumbeschichter an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet und seine Wartezeit bei nur noch 1% liegt. Dies bewirkt eine Limitierung des Durchsatzes an Fertigungslosen und führt zu einer Erhöhung des Umlaufbestandes und der Durchlaufzeit, weil es zu Stauungen an den Fertigungsgeräten und im Materialfluss kommt. Durch diese Stauungen steigt auch der Leerfahrtanteil der Transportsysteme.

me sowie die durchschnittliche Belegung und die Verweilzeit der Lose im Speichersystem stark an.

Simulationsplan für eine unterschiedliche Eingabemenge an Fertigungslosen					
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse			
		38 Lose	42 Lose	44 Lose	46 Lose
Fertigungs- gerät	Bearbeitung [%]	70	78	82	84
	Störungen/Wartungen [%]	15	14	12	15
	Wartezeit [%]	15	8	6	1
Transport- system	Transportfahrten [%]	11	11	14	14
	Leerfahrten [%]	23	26	32	33
	Handhabung [%]	12	14	15	15
	Batterieladung [%]	15	16	19	21
	Wartezeit [%]	39	33	20	17
Speicher- system	Ø Belegung [Lose]	35	49	75	97
	Max. Belegung [Lose]	168	190	248	249
	Ø Verweilzeit [h:min]	11:14	13:29	16:29	20:50
Handhabung	Ø Auslastung [%]	17,6	20,4	25,0	12,8
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	3,9	4,4	4,6	4,7
	Priorität 2 [Lose/Tag]	33,5	37,0	38,7	38,1
Durch- laufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	1:09:38	1:10:40	1:13:02	1:14:59
	Priorität 2 [d:h:min]	3:14:28	4:17:08	5:20:11	9:05:35
Umlauf- bestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	125	179	220	379
	Max. Umlaufbestand [Lose]	264	346	344	653

Bild 52: Simulationsergebnisse für eine unterschiedlich hohe Eingabemenge an Losen in die Fertigung

Aus den durchgeführten Untersuchungen ergibt sich weiter, dass bis zu einer Eingabe von 44 Fertigungslosen trotz einer Erhöhung des Umlaufbestandes die Kapazität der Modellfabrik ausreichend ist, um den geforderten Durchsatz an Fertigungslosen sicherzustellen. Die Differenz zwischen Eingabemenge und Durchsatz charakterisiert allgemein den in der Fertigung vorhandenen Umlaufbestand. Bei einer Einlastung von 46 Losen pro Tag reicht die vorhandene Fertigungskapazität nicht mehr aus, so dass der Umlaufbestand stetig ansteigt und der geforderte Durchsatz nicht mehr erzielt wird. Um eine Durchsatzverbesserung in diesem Fall zu erzielen, müssen die Engpässe an den Fertigungsgeräten (z.B. beim Aluminiumbeschichter) und im Materialflusssystem mit Hilfe der Simulation aufgespürt und beseitigt werden.

5.5.3 Optimierung der Höhe des Umlaufbestandes

Da der Wert eines Fertigungsloses bis zu 100000.- EURO und mehr betragen kann, muss der in der Fertigung befindliche Umlaufbestand möglichst gering gehalten werden, um die gebundenen Kapitalkosten zu minimieren. Im Widerspruch dazu stehen die Forderungen, die Auslastung der Fertigungsgeräte zu erhöhen und einen möglichst hohen Durchsatz an Losen durch die Fertigung

zu erzielen. Um die Auswirkungen des Umlaufbestandes an Losen in der Fertigung auf das Materialflusssystem genauer quantifizieren zu können, werden Simulationsuntersuchungen durchgeführt, bei denen der Umlaufbestand in der Fertigung durch die Materialeingabe gesteuert und auf einem bestimmten Niveau konstant gehalten wird (*Bild 53*).

Simulationsplan für einen unterschiedlichen Umlaufbestand an Losen in der Fertigung							
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse					
		100 Lose WIP	200 Lose WIP	300 Lose WIP	400 Lose WIP	500 Lose WIP	600 Lose WIP
Fertigungs- gerät	Bearbeitung [%]	65	75	80	84	84	86
	Störungen/Wartungen [%]	12	14	13	12	12	14
	Wartezeit [%]	23	11	7	4	4	0
Transport- system	Transportfahrten [%]	11	12	13	14	14	14
	Leerfahrten [%]	20	27	31	35	35	34
	Handhabung [%]	11	13	15	16	15	15
	Batterieladung [%]	14	17	19	21	21	21
	Wartezeit [%]	44	31	22	14	15	16
Speicher- system	Ø Belegung [Lose]	26	61	98	96,7	75	158
	Max. Belegung [Lose]	100	184	256	300	244	427
	Ø Verweilzeit [h:min]	9:47	15:48	22:51	21:26	16:22	33:35
Handhabung	Ø Auslastung [%]	7,6	10,8	11,9	12,4	12,4	26,0
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	3,7	4,2	4,4	4,6	4,5	4,5
	Priorität 2 [Lose/Tag]	31,3	36	37,6	38,9	38,0	37,8
Durch- laufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	1:10:47	1:16:11	1:15:41	1:15:05	1:14:32	1:17:51
	Priorität 2 [d:h:min]	3:00:39	5:09:45	7:19:01	10:00:04	12:16:39	15:06:01
Umlauf- bestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	100	200	299	398	496	596
	Max. Umlaufbestand [Lose]	100	200	300	400	500	600

Bild 53: Simulationsergebnisse für die Optimierung der Höhe des Umlaufbestandes (WIP) in der Modellfabrik

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Erhöhung des Umlaufbestandes in der Fertigung die Durchlaufzeit und auch der Durchsatz ansteigen. Der Durchsatz erreicht dabei bei einem Umlaufbestand von 400 Losen einen Höchstwert und wird dann wieder geringer, weil sich die Fertigungslose im Materialfluss gegenseitig immer stärker behindern und Störungen im Materialflusssystem auftreten. Bei einem Umlaufbestand oberhalb von 400 Losen bleibt die frei verfügbare Wartezeit der Transportsysteme nahezu konstant, während die Verweilzeit der Lose im Speichersystem und die Auslastung der Handhabungssysteme aufgrund der Kapazitätsengpässe stark ansteigen. Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass ein Betrieb der Modellfabrik mit einem Umlaufbestand oberhalb von 400 Losen nicht sinnvoll ist, da sich ab diesem Betriebspunkt Durchsatz und Durchlaufzeiten verschlechtern und sich auch die Kosten für den in der Fertigung gebundenen Umlaufbestand an Losen stark erhöhen.

5.5.4 Berücksichtigung von Prioritätenlosen

Um Lose möglichst schnell durch die Fertigung schleusen zu können, gibt es Fertigungslose mit einer höheren Fertigungspriorität, die an den Fertigungsgeräten mit Vorrang bearbeitet und innerhalb des Materialflusssysteme so schnell wie möglich weitertransportiert werden. Fertigungslose können unterschiedliche Prioritätsstufen besitzen, die geändert werden können und während des gesamten Fertigungsablaufs oder nur bei einzelnen Bearbeitungsschritten gültig sind (z.B. bei der Einhaltung von definierten Liegezeiten). Wie die durchgeführten Analysen zeigen, sind insbesondere in einer produktspezifischen Einzelfertigung viele Prioritätenlose vorhanden, während in einer Massenfertigung der Anteil an Prioritätenlosen gering ist.

Um den Einfluss einer unterschiedlichen Anzahl von Losprioritäten auf das Materialflusssystem quantifizieren zu können, wurden mit Hilfe der Experimentierplattform umfangreiche Simulationsuntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in *Bild 54* aufgeführt sind. Für die Simulationsläufe wurden Fertigungsszenarien untersucht, die einen Anteil an Losen mit einer höheren Fertigungspriorität von 10%, 20%, 30%, 40% und 50% aufweisen.

Simulationsplan für unterschiedliche Anteile an Prioritätenlosen						
Teilsysteme	Auswerteparameter	Simulationsergebnisse				
		10% Prioritäten	20% Prioritäten	30% Prioritäten	40% Prioritäten	50% Prioritäten
Fertigungs- gerät	Bearbeitung [%]	78	77	77	78	77
	Störungen/Wartungen [%]	14	11	13	13	16
	Wartezeit [%]	8	12	10	9	7
Transport- system	Transportfahrten [%]	11	13	13	13	13
	Leerfahrten [%]	26	29	28	29	28
	Handhabung [%]	14	14	14	14	14
	Batterieladung [%]	16	18	17	18	17
	Wartezeit [%]	33	26	28	26	28
Speicher- system	Ø Belegung [Lose]	49	72	100	64	65
	Max. Belegung [Lose]	190	210	290	186	228
	Ø Verweilzeit [h:min]	13:29	17:48	25:25	15:20	16:16
Handhabung	Ø Auslastung [%]	20,4	22,4	22,0	23,0	22,0
Durchsatz	Priorität 1 [Lose/Tag]	4,4	8,6	12,9	16,5	21,3
	Priorität 2 [Lose/Tag]	37,0	32,9	28,0	24,8	19,6
Durch- laufzeit	Priorität 1 [d:h:min]	1:10:40	1:15:24	1:18:05	1:22:17	2:02:23
	Priorität 2 [d:h:min]	4:17:08	5:22:36	7:17:01	6:18:28	8:07:10
Umlauf- bestand	Ø Umlaufbestand [Lose]	179	207	238	197	208
	Max. Umlaufbestand [Lose]	346	406	405	306	379

Bild 54: Simulationsergebnisse zur Optimierung des Anteils an Prioritätenlosen innerhalb der Fertigung

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Durchlaufzeiten für Lose mit und ohne Fertigungspriorität bei einer Steigerung des Prioritätenanteils von 10% auf 50% um jeweils bis zu 80% erhöhen. Der Gesamtdurchsatz aller Lose bleibt ebenso wie die Auslastung des Aluminiumbeschichters, des Transportsystems und des Handhabungssystems bei einer Zunahme des Anteils an Prioritätenlosen ungefähr konstant. Der durchschnittliche und der maximale Umlaufbestand erreichen ebenso wie die mittlere und die maximale Belegung des Speichersystems bei einem 30% Anteil von Losen mit Priorität ein Maximum, da der Grad der gegenseitigen Beeinflussung von Losen mit und ohne Priorität in der Fertigung hier besonders hoch ist.

Die Bewertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass eine Steigerung des Anteils an Losen mit einer höheren Fertigungspriorität prinzipiell zu Stauungen im Materialfluss und an den Fertigungsgeräten führt, die Durchlaufzeiten verlängert und den Umlaufbestand erhöht. Um die Materialflusssysteme trotz eines hohen Anteils an Losen mit Fertigungspriorität optimal zu gestalten, müssen mit Hilfe des Simulationsbaukastens die Auslegung der Kapazität der Fertigungsgeräte und der Automatisierungssysteme überprüft und an die geforderten Zielkriterien angepasst werden.

5.6 Optimierung der Materialflusssteuerung

Um die Materialflusssteuerung zu optimieren, werden im Folgenden Ablaufstrukturen zur Auswahl des nachfolgenden Fertigungsgerätes für ein Los nach dessen Bearbeitung und zur Auswahl des nächsten Fertigungsloses bei freier Bearbeitungskapazität am Fertigungsgerät entwickelt. Entsprechend den ermittelten Anforderungen zur Optimierung der Materialflusssteuerung werden für die Auswahl eines Fertigungsgerätes das **Schiebe-Prinzip** (engl.: push) und für die Auswahl der Fertigungslose das **Zieh-Prinzip** (engl.: pull) ausgewählt und miteinander kombiniert /Gudehus 2000/.

5.6.1 Ablaufstruktur zur Auswahl eines Fertigungsgerätes

Um die Durchlaufzeit eines Fertigungsloses zu minimieren, muss die Fertigungssteuerung nach der Bearbeitung eines Fertigungsloses das nachfolgende Fertigungsgerät auswählen. Dazu werden aus dem Arbeitsplan der nächste Bearbeitungsschritt und aus einer Datenbank mit allen verfügbaren Bearbeitungskapazitäten die möglichen nächsten Fertigungsgeräte ausgewählt. Für die Auswahl des nächsten Fertigungsgerätes können aus der Literatur bekannte Auswahlstrategien angewandt werden, wie z.B. /Gudehus 2000/:

- Größte freie Kapazität der Fertigungsgeräte
- Niedrigste Auslastung eines Fertigungsgerätes
- Geringste Entfernung zum Fertigungslos
- Sonstige anwendungsspezifische Auswahlstrategien (z.B. höhere Prioritäten von einzelnen Fertigungsgeräten)

Nach der Auswahl des nächsten Fertigungsgerätes übergibt die Fertigungssteuerung der Materialflusststeuerung den aktuellen Standort und den Zielort des Loses. Ist kein freies Fertigungsgerät in der Datenbank vorhanden, wird ein Speichersystem zur Zwischenlagerung als Zielort ausgewählt. Die Materialflusststeuerung wählt anhand der vorgegebenen Dispositionsstrategie (siehe Kapitel 5.4.2) ein Transportfahrzeug aus und holt das Los ab. Die entwickelte Ablaufstruktur für eine optimierte Auswahl der Fertigungsgeräte ist in *Bild 55* zusammengefasst.

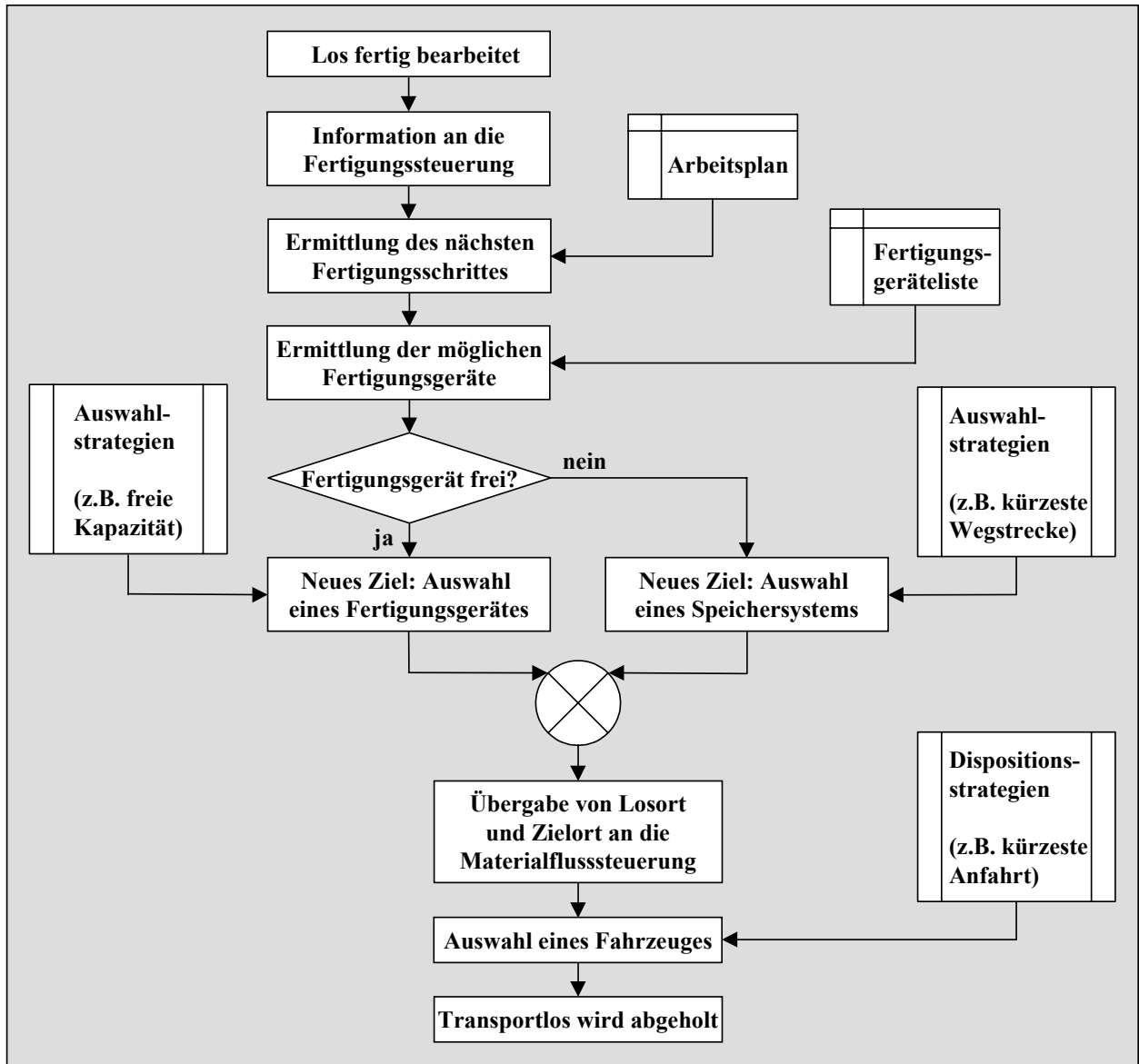


Bild 55: Ablaufstruktur zur optimierten Auswahl des nachfolgenden Fertigungsgerätes für ein Los nach dessen Bearbeitung (Schiebe-Prinzip)

5.6.2 Ablaufstruktur zur Auswahl eines Fertigungsloses

Um eine möglichst hohe Auslastung der Fertigungsgeräte zu erzielen, muss nach der Bearbeitung und Abholung eines Loses dem Fertigungsgerät ein neues Los zugeordnet werden. Dazu benachrichtigt die Materialflusssteuerung das Fertigungssteuerungssystem, dass ein Fertigungslos von einem Transportfahrzeug an der Ein-/Ausgabestation des Fertigungsgerätes abgeholt wurde. Das Fertigungssteuerungssystem plant die freie Kapazität des Fertigungsgerätes ein und ermittelt die Bearbeitungsschritte, die auf diesem Gerät durchgeführt werden können.

Aus einer Datenbank, die alle auf eine weitere Bearbeitung wartenden Losen enthält, werden diejenigen Lose ermittelt, die an diesem Fertigungsgerät bearbeitet werden können. Anhand einer vorher festgelegten Auswahlstrategie wird dann ein Fertigungslos ausgewählt.

Für die Auswahl der Fertigungslose können je nach Anforderung eine Reihe von aus der Literatur bekannten Auswahlstrategien einzeln oder im Mix angewandt werden, wie z.B. /Gudehus 2000, Atherton 1996/:

- Zuordnung entsprechend den Losprioritäten
- First In First Out (FIFO) oder Last In First Out (LIFO)
- Definition anwendungsspezifischer Strategien (z.B. Vorrang von Losen aus bestimmten Losblöcken oder von Losen mit definierten Liegezeiten)

Sind aktuell keine Lose für eine weitere Bearbeitung vorhanden, wird das Fertigungsgerät in eine Datenbank mit allen verfügbaren Bearbeitungskapazitäten eingetragen. Das nächste zu bearbeitende Los erhält dann ein Fertigungsgerät aus dieser Datenbank zugeordnet oder wird ebenfalls in die Datenbank mit den wartenden Losen eingetragen. Nach der erfolgten Zuordnung des Loses zu einem Fertigungsgerät wird vom Fertigungssteuerungssystem ein Auftrag zum Ausschleusen des Loses aus dem Speichersystem gegeben und ein Transportauftrag für die Materialflusssteuerung generiert.

Die Materialflusssteuerung veranlasst dann die Abholung des Loses an einer Ein-/Ausgabestation des Speichersystems und koordiniert die Durchführung der notwendigen Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge zur Abholung und zum Transport des Loses bis zum nächsten Fertigungsgerät. *Bild 56* zeigt die entwickelte Ablaufstruktur zur Auswahl eines Fertigungsloses bei freier Bearbeitungskapazität an einem Fertigungsgerät nach dem Zieh-Prinzip.

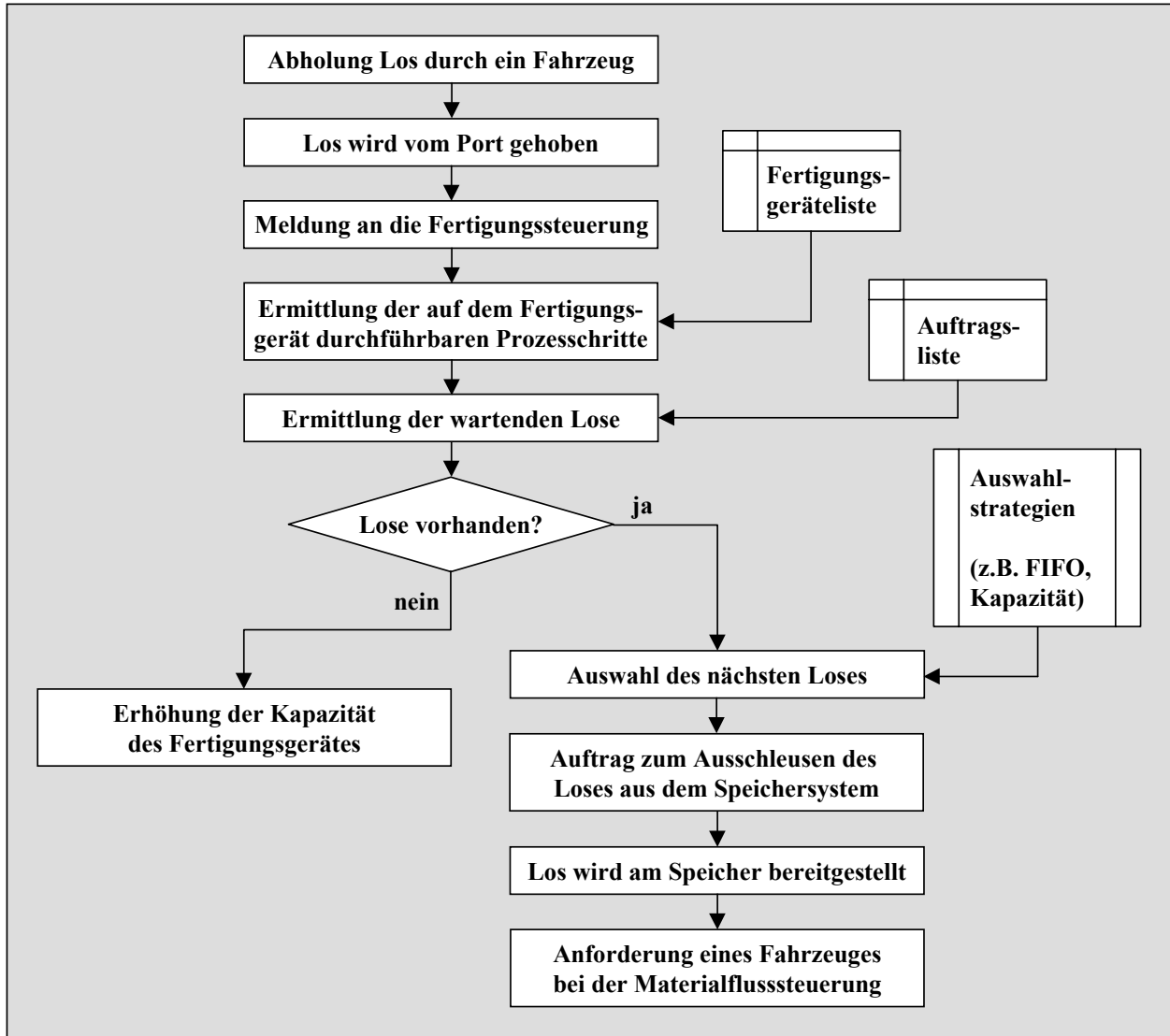


Bild 56: Ablaufstruktur zur optimierten Auswahl eines Fertigungsloses bei freier Bearbeitungskapazität an einem Fertigungsgerät (Zieh-Prinzip)

5.7 Zusammenfassung der Entwicklungsergebnisse und Ableitung von Strategien zur Optimierung automatisierter Materialflusssysteme

Auf der Grundlage der in diesem Kapitel durchgeführten Simulationsuntersuchungen für die entwickelten Optimierungsvarianten und der dabei erzielten und bewerteten Simulationsergebnisse werden im Folgenden Optimierungsstrategien abgeleitet, welche die ermittelten Anforderungen erfüllen und bei einer wirtschaftlichen Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung unbedingt zu berücksichtigen sind. Die Optimierung einzelner Teilsysteme bewirkt dabei eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des gesamten Materialflusssystems in einer Halbleiter- oder Flachbildschirmfertigung, wobei die einzelnen Optimierungsmaßnahmen aufeinander abgestimmt werden müssen. Durch die Anwendung der entwickelten Strategien ist es möglich, automatisierte Materialflusssysteme im Sinne der geforderten Zielkriterien zu optimieren.

■ Strategien zum optimierten Einsatz der Automatisierungssysteme

- Eine **Erhöhung der Kapazität der Ein-/Ausgabestationen** führt zu einer **Verringerung des Umlaufbestandes** und zu einer **Verkürzung der Durchlaufzeit** (Kapitel 5.4.1).
- Eine **Kapazität von nur einer Ein-/Ausgabestation an einem Fertigungsgerät** führt zu **großen Stauungen im Materialfluss** und zu einer signifikanten **Reduzierung der Fertigungskapazität** (Kapitel 5.4.1).
- Eine **Kapazität von zwei Ein-/Ausgabestationen** ist bei **Test- und Prüfgeräten** normalerweise ausreichend (Kapitel 5.4.1).
- Eine **Kapazität von drei Ein-/Ausgabestationen** reicht in der Regel bei **durchschnittlich ausgelasteten Fertigungsgeräten** aus (Kapitel 5.4.1).
- Eine **Kapazität von vier Ein-/Ausgabestationen** führt bei **hoch ausgelasteten Fertigungsgeräten** zu guten Ergebnissen (Kapitel 5.4.1).
- Der Einsatz von **Gerätespeichern** entsprechend der **Lösungsvariante 12** ist bei **sehr hoch ausgelasteten Fertigungsgeräten** und bei **Fertigungsgeräten ohne ausreichende Maschinenredundanz** sinnvoll (Kapitel 5.4.1).
- Die **Auslastung der Transportfahrzeuge** ist bei den Dispositionsstrategien **kürzeste Anfahrt** und bei der **kombinierten Strategie** am **geringsten** (Kapitel 5.4.2).
- Für die **volumenorientierte Fertigung** von Massenprodukten ist die **kombinierte Auftragsdisposition** eines Transportfahrzeuges besonders geeignet (Kapitel 5.4.2).
- In einer **durchlauforientierten Fertigung** führt die **kürzeste Anfahrt eines Transportfahrzeuges** zu den besten Ergebnissen (Kapitel 5.4.2).
- Zur **Reduzierung der Durchlaufzeit** und zur **Verringerung des mittleren Umlaufbestandes an Losen** in der Fertigung sind die Dispositionsstrategien **längste Wartezeit, zufällige Auswahl** und **kürzeste Anfahrt** eines Transportfahrzeuges am besten geeignet (Kapitel 5.4.2).
- Die **Erhöhung des Durchsatzes** und die **Verringerung der Durchlaufzeit** wird durch die **Aufteilung des Transportkurses in virtuelle Fahrbereiche** und die **Einführung eines zeitlichen Dispositionsfaktors zum Wechsel der Fahrbereiche** unterstützt (Kapitel 5.4.3).
- Für die **Erreichung der geforderten Zielkriterien** liefert die **Aufteilung in 2 Fahrbereiche** und die Einführung eines **zeitlichen Dispositionsfaktors von 1 Minute** bis zum Wechsel der Fahrbereiche im vorliegenden Fall die besten Ergebnisse (Kapitel 5.4.3).

■ Strategien zur Optimierung der Materialflusssysteme

- Zur **Minimierung der Investitionskosten** bei der **Materialflussautomatisierung** sind **Automatisierungskonzepte** mit einer **direkten Durchfahrt zum nächsten Fertigungsgerät** bzw. mit nur **einer Zwischenlagerung im Transportablauf** (Lösungsvarianten 19 und 20) am besten geeignet, da hier die **Gesamtanzahl an notwendigen Automatisierungssystemen** am **geringsten** ist (Kapitel 5.5.1).
- Eine **Reduzierung der Eingabemenge an Losen** in die Fertigung führt zu einer **Verkürzung der Durchlaufzeit** sowie zu einer **Reduzierung des Durchsatzes** und des **Umlaufbestandes** (Kapitel 5.5.2).
- Eine **Erhöhung der Eingabemenge** an Losen in die Fertigung führt zu einer **Verlängerung der Durchlaufzeit** sowie zu einer **Erhöhung des Durchsatzes** und des **Umlaufbestandes** (Kapitel 5.5.2).
- Bei einer **Erhöhung der Eingabemenge** reicht ab einer bestimmten Menge die **Fertigungskapazität** nicht mehr aus, so dass der **Umlaufbestand stetig ansteigt** und der geforderte **Durchsatz nicht mehr erzielt** wird (Kapitel 5.5.2).
- Zur **Erzielung einer Durchsatzverbesserung** müssen die **Engpässe** an den **Fertigungsgeräten** und im **Materialflusssystem** mit Hilfe des **Simulationsbaukastens aufgespürt** und durch geeignete **Maßnahmen beseitigt** werden (Kapitel 5.5.2).
- Die **Erhöhung des Umlaufbestandes an Losen** in der Fertigung führt auch zu einem **Anstieg der Durchlaufzeit** und des **Durchsatzes**, wobei der **Durchsatz** nach dem **Erreichen eines Maximums**, bedingt durch zunehmende Behinderungen und Störungen im Materialfluss, wieder **abnimmt** (Kapitel 5.5.3).
- Bei einer **durchsatzorientierten Fertigung** muss mit Hilfe des **Simulationsbaukastens** derjenige **Betriebspunkt einer Fertigung** ermittelt werden, bei dem das **Verhältnis von Umlaufbestand und Durchsatz optimal** ist (Kapitel 5.5.3).
- Die **Erhöhung des Anteils an Losen** mit einer **höheren Fertigungspriorität** kann zu **Stauungen im Materialfluss** und an den **Fertigungsgeräten** führen (Kapitel 5.5.4).
- Bei einer **zunehmenden Anzahl von Prioritätenlosen** in der Fertigung **erhöht** sich die **Durchlaufzeit** für Lose mit und ohne Fertigungspriorität, während der **Gesamtdurchsatz** an Losen **ungefähr konstant** bleibt und der **Umlaufbestand** ebenfalls bis zu einem **Maximum ansteigt** (Kapitel 5.5.4).
- Zur **optimalen Gestaltung von Materialflusssystemen** mit einem **hohen Anteil an Losen mit Fertigungspriorität** müssen mit Hilfe des **Simulationsbaukastens** die **Kapazität der Fertigungsgeräte** und der **Automatisierungssysteme überprüft** und an die **geforderten Zielkriterien angepasst** werden (Kapitel 5.5.4).

■ **Strategien zur Optimierung der Materialflusssteuerung**

- Für die **Auswahl** des **nachfolgenden Fertigungsgerätes** für ein **Fertigungslos nach dessen Bearbeitung** eignet sich die **Anwendung einer Ablaufstruktur**, die auf dem **Schiebe-Prinzip** basiert (*Bild 55*, Kapitel 5.6.1).
- Für die **Auswahl** des **nächsten Fertigungsloses** bei **freier Bearbeitungskapazität** an einem **Fertigungsgerät** ist die **Anwendung einer Ablaufstruktur** mit einem **Zieh-Prinzip** am besten geeignet (*Bild 56*, Kapitel 5.6.2).

6 Anwendung und Erprobung des entwickelten Simulationsbaukastens in einer Halbleiterfertigung

Im Rahmen der Planung einer vollautomatisierten Halbleiterfertigung wird anhand der

- Planung und Auslegung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme
- Optimierung der automatisierten Materialflusssysteme und
- Erprobung und Optimierung einer neu entwickelten Automatisierungsvariante

die Funktionsfähigkeit des entwickelten Simulationsbaukastens erprobt. Ebenso wird die Praxis-tauglichkeit der entwickelten Lösungskonzepte, Leitlinien und Optimierungsstrategien sowie der durchgeführten Leistungsbewertungen exemplarisch nachgewiesen.

6.1 Datenbasis, Modellaufbau und Versuchsdurchführung

Für die Simulationsuntersuchungen wird der entwickelte Simulationsbaukasten eingesetzt, der eine schnelle und detailgenaue Automatisierung der Materialflusssysteme in einer Halbleiterfertigung ermöglicht. Der Simulationsbaukasten erfüllt die gestellten Anforderungen und beinhaltet sämtliche Prozess- und Prüfabläufe zur Herstellung von Flachbildschirmen und Halbleitern. So sind z.B. die Verwaltung und Reinigung der leeren Transportbehältnisse ebenso berücksichtigt wie das Auftreten von Störungen und die Durchführung von Wartungsarbeiten an den Fertigungsgeräten und Automatisierungssystemen.

Der entwickelte Simulationsbaukasten wird für die Planung der Materialflussautomatisierung in einer Halbleiterfertigung für Speicherbausteine mit einem Substratdurchmesser von 300mm eingesetzt. Die wichtigsten Anforderungen an die Automatisierung der Materialflusssysteme bestehen in der bedarfsentsprechenden Planung und wirtschaftlichen Auslegung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme. Der Planungsablauf basiert auf einer Prozesstechnologie mit mehr als 300 einzelnen Prozessschritten zur Herstellung von 256 MByte Speicherbausteinen mit einer Strukturbreite von $0,13\mu\text{m}$, die in mehreren Varianten gefertigt werden. Die Herstellung der Speicherbausteine erfolgt in 16 teilweise redundanten Fertigungsbereichen mit 263 Fertigungsgeräten zur Durchführung der einzelnen Bearbeitungs-, Mess- und Inspektionsaufgaben.

Die Planung und Auslegung der Transport-, Speicher und Handhabungssysteme erfolgt auf der Basis der ermittelten Anforderungen und unter Anwendung der entwickelten Leistungsbewertungen, Lösungskonzepte und Leitlinien. Die Kapazitäten der automatisierten Speicher- und Handhabungssysteme werden vorab mit Hilfe des entwickelten Berechnungsverfahrens überschlägig ausgelegt. Die Optimierung der Leistungsfähigkeit des automatisierten Materialflusssystems erfolgt durch die Anwendung der entwickelten Optimierungsstrategien. Für die Durchführung der Simulationsexperimente wird eine Datenbasis festgelegt, welche die wesentlichen Einflussgrößen berücksichtigt, die Ergebnisse des Planungsprozesses zusammenfasst und die Abbildung der gesamten Halbleiterfertigung mit ihren einzelnen Teilsystemen detailliert beschreibt (*Bild 57*).

Datenbasis der Halbleiterfertigung	
Teilsysteme	Systemabbildung
Fertigungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Realitätsgetreue Abbildung der Fertigungsabläufe zur Herstellung von Speicherbausteinen mit über 300 einzelnen Bearbeitungs- und Prüfschritten • 16 Fertigungsbereiche und ein Zentralkorridor • Komprimierte Anordnung der Fertigungsgeräte in einem Tunnelreinraum • 263 Fertigungs- und Prüfgeräte mit einer variablen Anzahl an Ein-/Ausgabestationen • Eingabe von 6300 Substraten / Woche, davon 1000 Substrate für Test und Entwicklung (36 Lose/Tag mit je 25 Substraten) • Fertigungsgeräte mit variabel einstellbaren Bearbeitungs- und Rüstzeiten • Fertigungsgeräte mit mehreren Prozesskammern (z.B. Reinigungsanlage) als parallel geschaltete Bearbeitungsstationen • Fertigungsgeräte zur Blockbearbeitung mit entsprechender Kapazität (z.B. zwei oder vier Lose bestehend aus 50 bzw. 100 Einzelsubstraten) • Variable Anzahl an automatisierten Ein-/Ausgabestationen • Vor Fertigungsgeräten mit Blockbearbeitung ist ein Gerätespeicher implementierbar
Transporttechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz eines an der Decke befestigten Hängebahnsystems mit Linearantrieb • Einsatz von Transportfahrzeugen mit einem integrierten Handhabungssystem zur Übergabe der Fertigungslose (Lösungsvariante 10, <i>Bild 34</i>) • Disposition der Fahrzeuge nach der Strategie "Kürzester Anfahrtsweg eines freien Leerfahrzeuges" bis zur Übernahme der Transportlose • Definition der Transportbahn im Simulationsmodell über die Länge • Definierter Zeitverbrauch für Weichenbereiche an jeder Verzweigung
Speicher- und Handhabungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • 16 automatische Speichersysteme mit bis zu 200 Plätzen, die bei Bedarf erhöht werden können (Abbildung gemäß den Lösungsvarianten 13 und 14) • Integriertes Handhabungssystem in den Speichersystemen • Automatisierte Ein-/Ausgabestationen zur Materialübergabe • Definition einer mittleren Spielzeit für einen Handhabungszyklus zur Ein- und Auslagerung der Lose, wobei Doppelspiele bevorzugt werden • Genaue Bestimmung der Kapazitätsgrenzen mit Hilfe des entwickelten Speichermodells zur detailgenauen Abbildung der Speichersysteme • Ausführung der Speichersysteme mit mittig angeordneten Ein-/Ausgabestationen entsprechend der Lösungsvariante 15
Automatisierungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> • Direkter Lostransport mit einem Transportsystem von einem Fertigungsgerät zum nächsten bzw. zu einem dem nächsten Fertigungsgerät nahe gelegenen Speichersystem (Abbildung gemäß Lösungsvariante 8, <i>Bild 31</i>) • Die Leerfahrzeuge fahren bis zur Zuteilung eines Transportauftrages unidirektional auf dem Transportkurs im Kreis • Besitzt ein Speichersystem keine freien Lagerkapazitäten werden auch andere Speichersysteme für die Zwischenlagerung der Lose genutzt
Steuerungssystem	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigungssteuerungssystem zur Planung der Fertigungsabläufe • Materialflusssteuerung zur Koordinierung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme • Die Auswahl der nachfolgenden Fertigungsgeräte und der zu bearbeitenden Fertigungslose erfolgt nach dem entwickelten Schiebe-/Zieh-Prinzip (Kapitel 5.6) • Losbereitstellung an den Ein-/Ausgabestationen der Speichersysteme und Anfahrt des angeforderten Transportfahrzeuges zum Speichersystem erfolgen parallel • Verwaltung von leeren und gefüllten Transportbehältnissen

Bild 57: Datenbasis für die Planung, Auslegung und Optimierung der automatisierten Materialflusssysteme innerhalb der Halbleiterfertigung

Der Aufbau des Simulationsmodells für die Halbleiterfertigung zur Herstellung von Speicherbausteinen auf der Basis des entwickelten Simulationsbaukastens ist in *Bild 58* dargestellt.

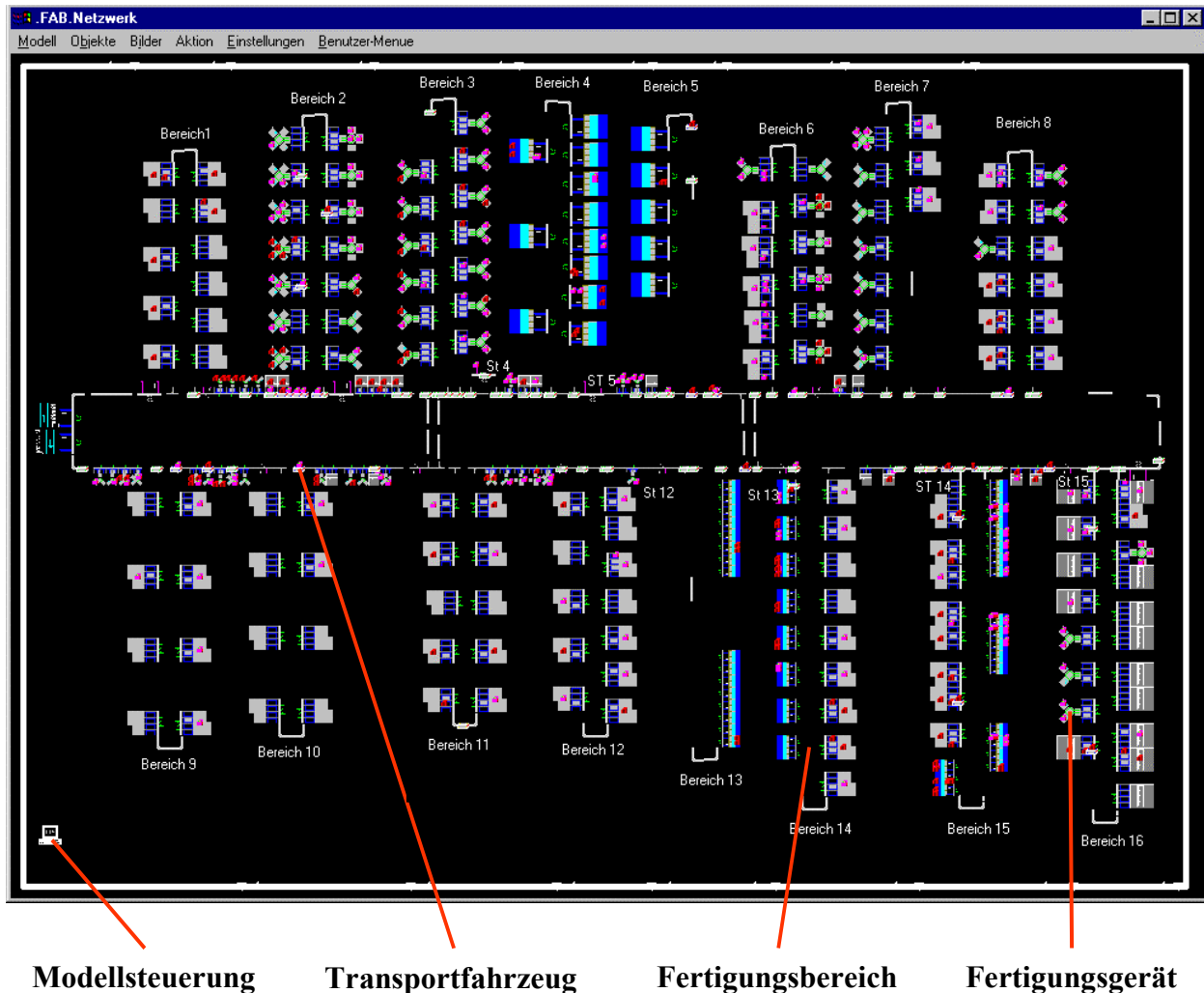


Bild 58: Mit dem Simulationsbaukasten erstelltes Simulationsmodell für die Halbleiterfertigung zur Herstellung von Speicherbausteinen

Der Versuchsplan zur Ermittlung der notwendigen Ergebnisse für eine wirtschaftliche Planung und Auslegung der Automatisierungssysteme und zur Optimierung der Materialflusssysteme ist in *Bild 59* dargestellt. Um den Aufwand und die Zeitdauer für die Durchführung der Simulationsexperimente zu begrenzen, wird die Funktionsfähigkeit des Simulationsbaukastens am Beispiel ausgewählter Simulationsuntersuchungen nachgewiesen.

Versuchsplan zur wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung der automatisierten Materialflusssysteme in einer Halbleiterfertigung		
Teilsystem	Simulationsuntersuchung	Ergebnisse
Transportsysteme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Auswirkungen einer unterschiedlichen Anzahl an Transportfahrzeugen auf die Systemleistung 2. Vergleich der Transportzeiten für eine unterschiedliche Anzahl an Transportfahrzeugen 3. Vergleich des Umlaufbestandes bei einer unterschiedlichen Anzahl an Transportfahrzeugen 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozentuale Auslastung und Systemzustände der Fahrzeuge • Zeitdauer für die Durchführung eines Transportauftrages • Systembewertung auf der Basis des Umlaufbestandes
Speicher- und Handhabungssysteme	<ol style="list-style-type: none"> 4. Untersuchung der Wartezeiten bis zur Losabholung bei unterschiedlich ausgelasteten Speichersystemen 5. Vergleich von unterschiedlichen Spielzeiten für die Handhabungsvorgänge im Speichersystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitdauer bis zur Abholung eines Loses am Speichersystem • Umlaufbestand in der Fertigung bei unterschiedlichen Spielzeiten
Optimierung der Materialflusssysteme	<ol style="list-style-type: none"> 6. Vergleich des Transportsystemverhaltens bei unterschiedlichen Materialeingabeszenarien 7. Auswirkungen von direkten Transportfahrten gegenüber Fahrten zum nächsten Speichersystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Umlaufbestand, Durchlaufzeiten und Systemzustände der Transportfahrzeuge bei variierten Loseingaben • Systemzustände der Fahrzeuge, Wartezeiten im Speichersystem

Bild 59: Versuchsplan zur Durchführung der Simulationsexperimente

6.2 Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme

6.2.1 Planung und Auslegung der Transportsysteme

Um die Transportkapazitäten des an der Decke befestigten Hängebahnsystems auszulegen, werden umfangreiche Simulationsläufe mit dem erstellten Simulationsmodell durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Simulationsläufe werden die optimale Anzahl an Transportfahrzeugen und die Systemzustände ermittelt. In *Bild 60* sind als Ergebnis der Simulationsläufe die Systemzustände für eine unterschiedliche Anzahl an Transportfahrzeugen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Zunahme der Fahrzeuganzahl der Anteil an Leer- und Transportfahrten für ein einzelnes Transportfahrzeug sinkt. Da auch der Anteil an Handhabungsvorgängen bezogen auf ein Transportfahrzeug geringer wird steigt der Wartezeitanteil an, bei dem die Fahrzeuge für weitere Transportfahrten genutzt werden können.

Wie die Leistungsbewertung automatisierter Transportsysteme in Kapitel 4.4.2 zeigt, sind die Investitionskosten für ein deckengebundenes Hängebahnsystem mit einer integrierten Handhabung stark von der Anzahl der Transportfahrzeuge abhängig. Um die vorgegebenen Zielkriterien hinsichtlich Durchsatz und Durchlaufzeit zu erzielen, muss ein Optimum zwischen der Leistungsfähigkeit des Transportsystems und den Investitionskosten gefunden werden.

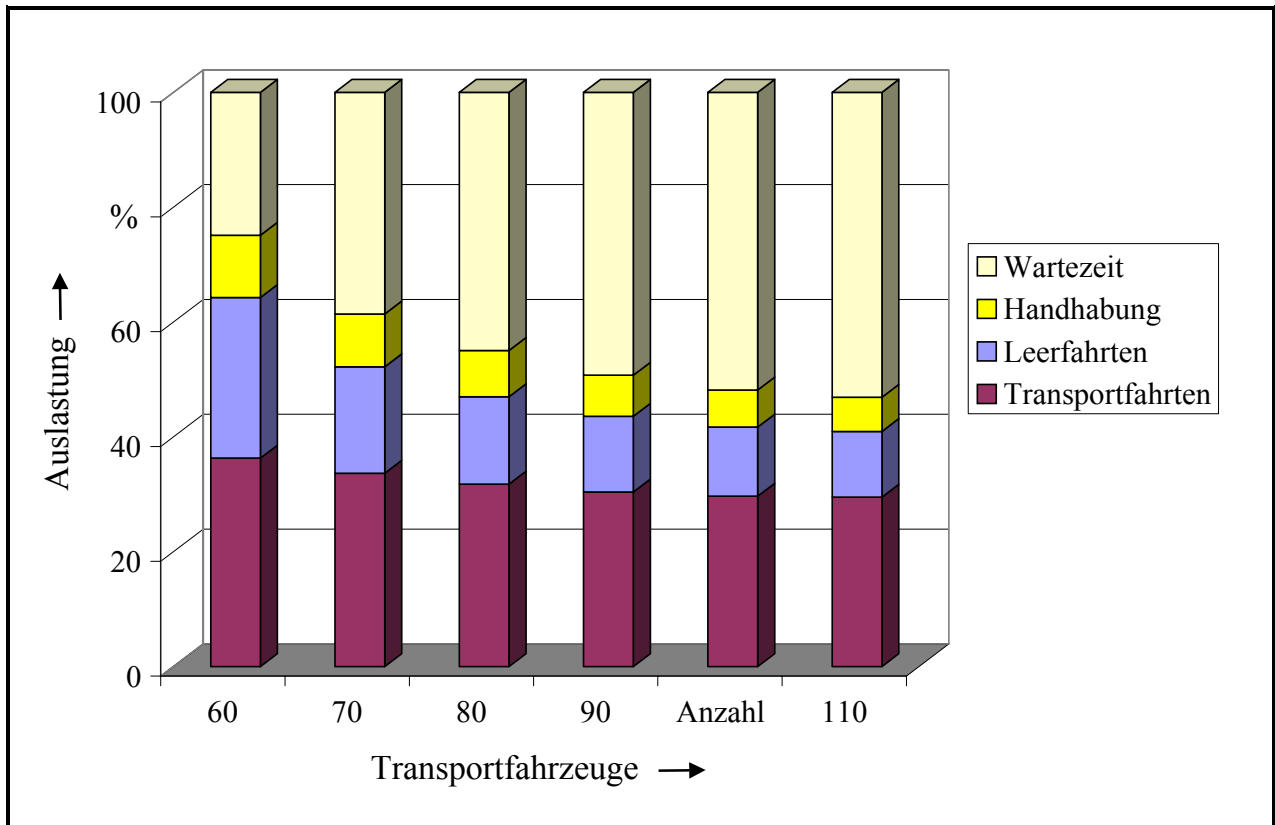


Bild 60: Auslastung und Systemzustände der Transportfahrzeuge

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen belegen, dass sich der Anteil an Leerfahrten pro Fahrzeug bei einer Erhöhung der Fahrzeuganzahl von 60 auf 110 Fahrzeuge nahezu halbiert, der Transportfahrtanteil um fast 20% sinkt und sich auch der Handhabungsanteil der einzelnen Fahrzeuge um ca. 40% reduziert. Daraus ergibt sich eine Erhöhung des Wartezeitanteils, da bei einer Erhöhung der Fahrzeuganzahl mehr Fahrzeuge für die anstehenden Transportaufträge zur Verfügung stehen und die Anfahrtszeiten bis zur Übernahme der Transportlose minimiert werden. Da beim Überschreiten einer bestimmten Fahrzeuganzahl die gegenseitige Behinderung der Fahrzeuge bei den Leer- und Transportfahrten ansteigt, wird durch den Einsatz von mehr als 100 Fahrzeugen keine Verbesserung mehr erzielt. Da die Anzahl der insgesamt durchzuführenden Handhabungsvorgänge von der eingesetzten Fahrzeuganzahl unabhängig ist, sinkt der Handhabungsanteil je mehr Fahrzeuge eingesetzt werden.

Um eine Entscheidung über die optimale Anzahl an Transportfahrzeugen treffen zu können, sind in Bild 61 die durchschnittlichen Zeiten für den Transport eines Fertigungsloses von der Zuordnung eines Transportauftrages zu einem Leerfahrzeug bis zur Ankunft des Loses an einem Fertigungsgerät oder einem Speichersystem dargestellt.

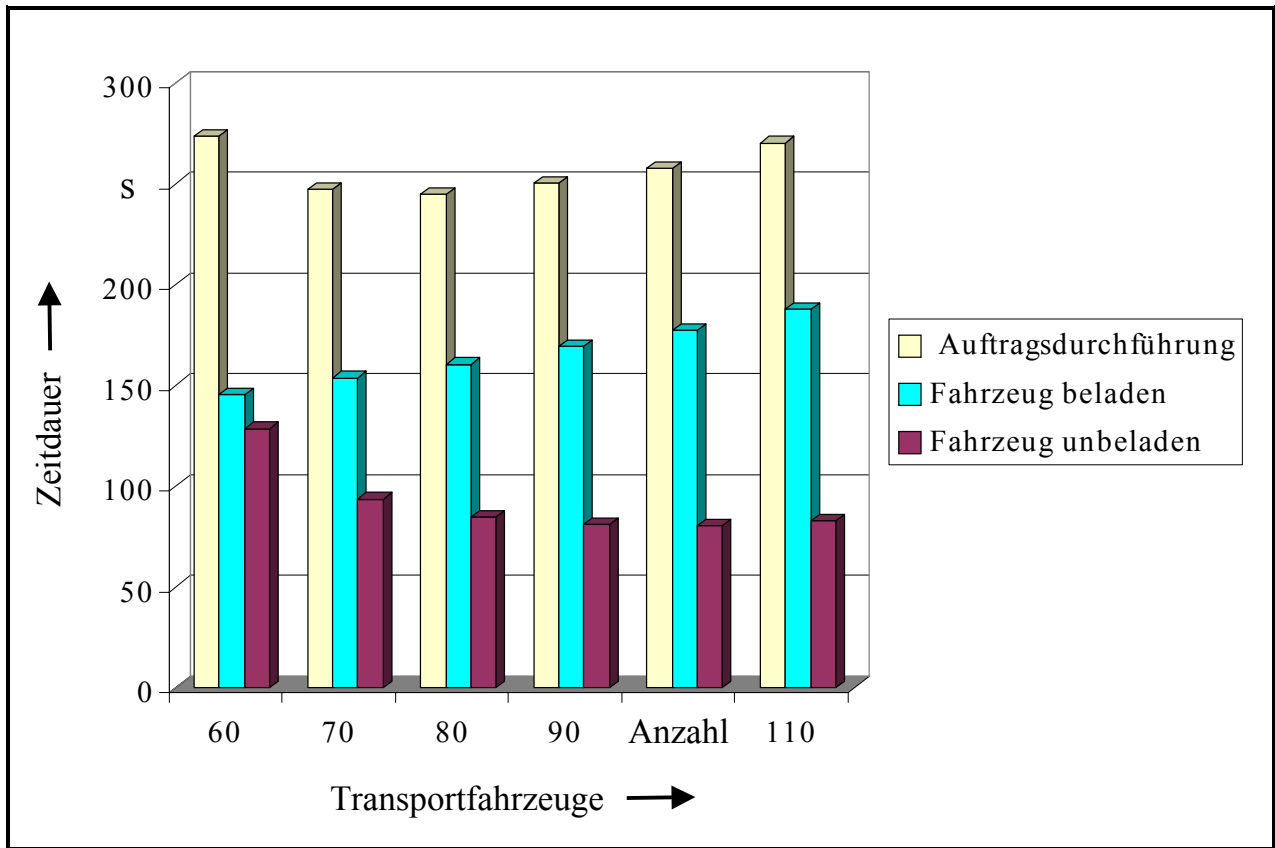


Bild 61: Zeitdauer für die Durchführung eines Transportauftrages

Die Zeit für die Durchführung eines Transportauftrages entspricht der Zeitdauer von der Zuordnung eines Loses zu einem Leerfahrzeug bis zur Ankunft des Loses an seinem Zielort. Dabei wird zwischen einem beladenen und unbeladenen Fahrzeugzustand unterschieden. Der unbeladene Fahrzeugzustand umfasst die Zeit von der Zuordnung eines Auftrages zu einem Transportfahrzeug bis zur Übernahme des Transportloses an einem Fertigungsgerät oder Speichersystem, während beim beladenen Zustand das Fahrzeug immer mit einem Transportlos beladen ist.

Die Zeitdauer für die eigentliche Transportfahrt zum Zielort mit einem beladenen Fahrzeug steigt kontinuierlich bei einer Erhöhung der Fahrzeuganzahl von 60 auf 110 an, da die gegenseitigen Behinderungen der Fahrzeuge auf dem Transportkurs um ca. 30% zunehmen. Die Simulationsergebnisse zeigen auch, dass die Fahrtzeit mit einem unbeladenen Fahrzeug bis zur Losübernahme bei einer Zunahme der Fahrzeuganzahl von 60 auf 80 Fahrzeuge um ca. 30% sinkt und dann annähernd konstant bleibt. Daraus folgt, dass die Zeitdauer für die Durchführung eines Transportauftrages ein Minimum bei 80 Fahrzeugen erreicht und dann wieder kontinuierlich ansteigt. Die Auswertung der Simulationsergebnisse zur Planung und Auslegung der Transportsysteme zeigt weiter, dass für die Durchführung der Lostransporte eine Anzahl von 80 Fahrzeugen optimal ist, da bei 80 Fahrzeugen die Zeit für die Auftragsdurchführung am geringsten ist und ausreichend Transportkapazitäten zur Verfügung stehen.

Um die Auslegung der Transportkapazitäten zu optimieren, wurde basierend auf den bisherigen Entwicklungsergebnissen das Automatisierungskonzept mit einem direkten Lostransport zum nächsten Fertigungsgerät entsprechend der Lösungsvariante 8 ausgewählt (siehe *Bild 31*). Es erlaubt bei freier Bearbeitungskapazität am nachfolgenden Fertigungsgerät den direkten Lostransport ohne Zwischenlagerung von einem Fertigungsgerät zum nächsten.

Die nachfolgend aufgeführten Simulationsuntersuchungen quantifizieren den Vorteil dieses Automatisierungskonzeptes gegenüber dem Konzept entsprechend der Lösungsvariante 7 (siehe *Bild 30*), bei dem die Lose beim Transportvorgang von einem Fertigungsgerät zum nächsten immer in einem Speichersystem zwischengelagert werden. In *Bild 62* sind die Auswirkungen auf den Umlaufbestand beim Einsatz von 60, 80 und 100 Transportfahrzeugen entsprechend der Lösungsvariante 7 mit einer Zwischenlagerung der Lose dargestellt.

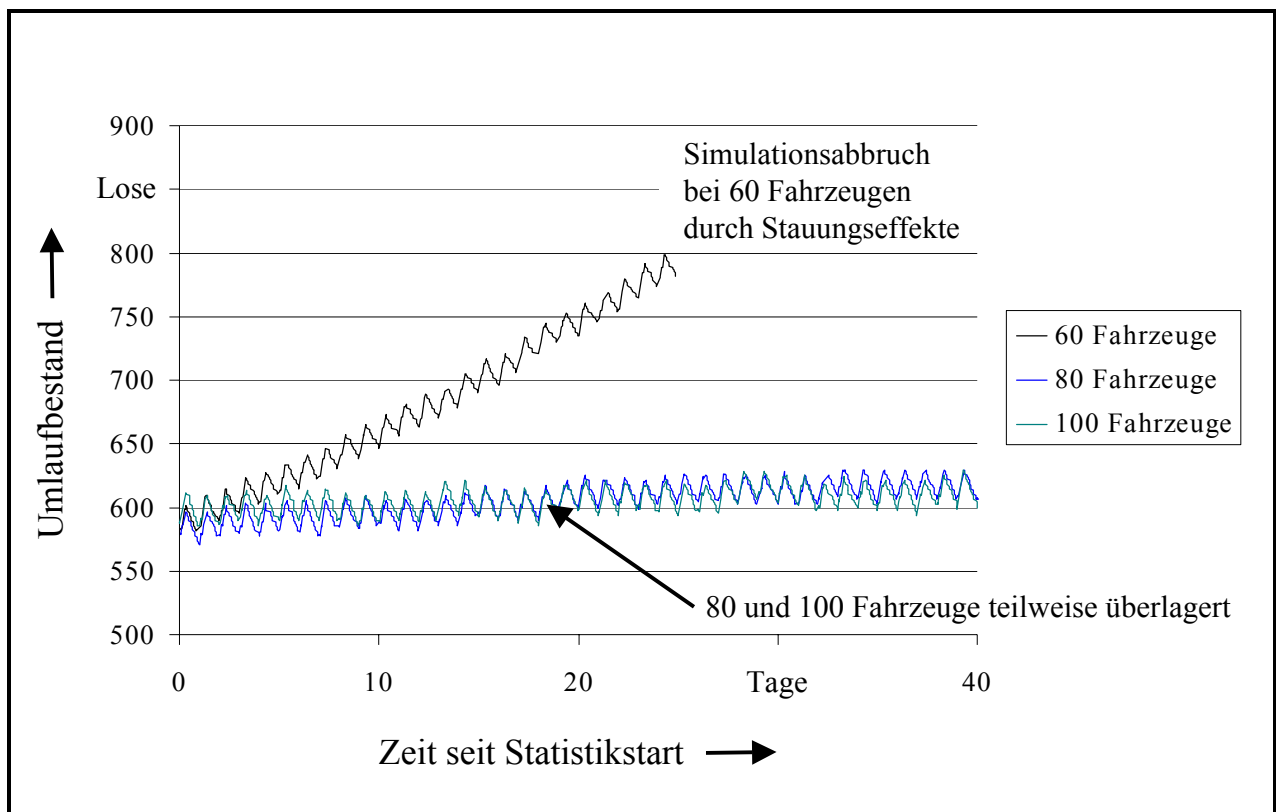


Bild 62: Auswirkungen auf den Umlaufbestand beim Einsatz von 60, 80 und 100 Transportfahrzeugen und Zwischenlagerung der Lose (entsprechend der Lösungsvariante 7)

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass beim Einsatz von 60 Transportfahrzeugen und der Anwendung eines Automatisierungskonzeptes entsprechend der Lösungsvariante 7 der Umlaufbestand kontinuierlich ansteigt, da die vorhandene Transportkapazität nicht ausreicht. Um die geforderte Leistungsfähigkeit des Transportsystems auch ohne direkte Transportfahrten sicherzustellen, muss eine Anzahl von 80 oder 100 Transportfahrzeugen ausgewählt werden.

6.2.2 Planung und Auslegung der Speichersysteme

Für die wirtschaftliche Automatisierung der Materialflusssysteme müssen neben der Auslegung der Transportsysteme auch die Speichersysteme entsprechend den vorliegenden Anforderungen ausgelegt werden. Die Planung und Auslegung der Speichersysteme erfolgt anhand des entwickelten Simulationsbaukastens und des Speichermodells auf der Grundlage des ausgewählten Automatisierungskonzeptes mit einer direkten Verfahrensmöglichkeit (Lösungsvariante 8, siehe *Bild 31*). Die Zielsetzung dieser Simulationsuntersuchungen ist es, die genauen Kapazitäten der Speichersysteme zu ermitteln, die bereits vorab mit Hilfe des entwickelten Berechnungsverfahrens überschlägig ausgelegt wurden.

In *Bild 63* sind die Wartezeiten vom Zeitpunkt der Auslösung eines Auslagerungsauftrages für ein Los aus einem Speichersystem durch die übergeordnete Materialflussteuerung bis zur Übernahme des auszulagernden Loses durch ein Transportfahrzeug dargestellt. Das Diagramm zeigt die Gegenüberstellung des am höchsten ausgelasteten Speichersystems, für das ein Aufbau entsprechend der Lösungsvariante 14 ausgewählt wurde, mit den Durchschnittswerten aller Speichersysteme.

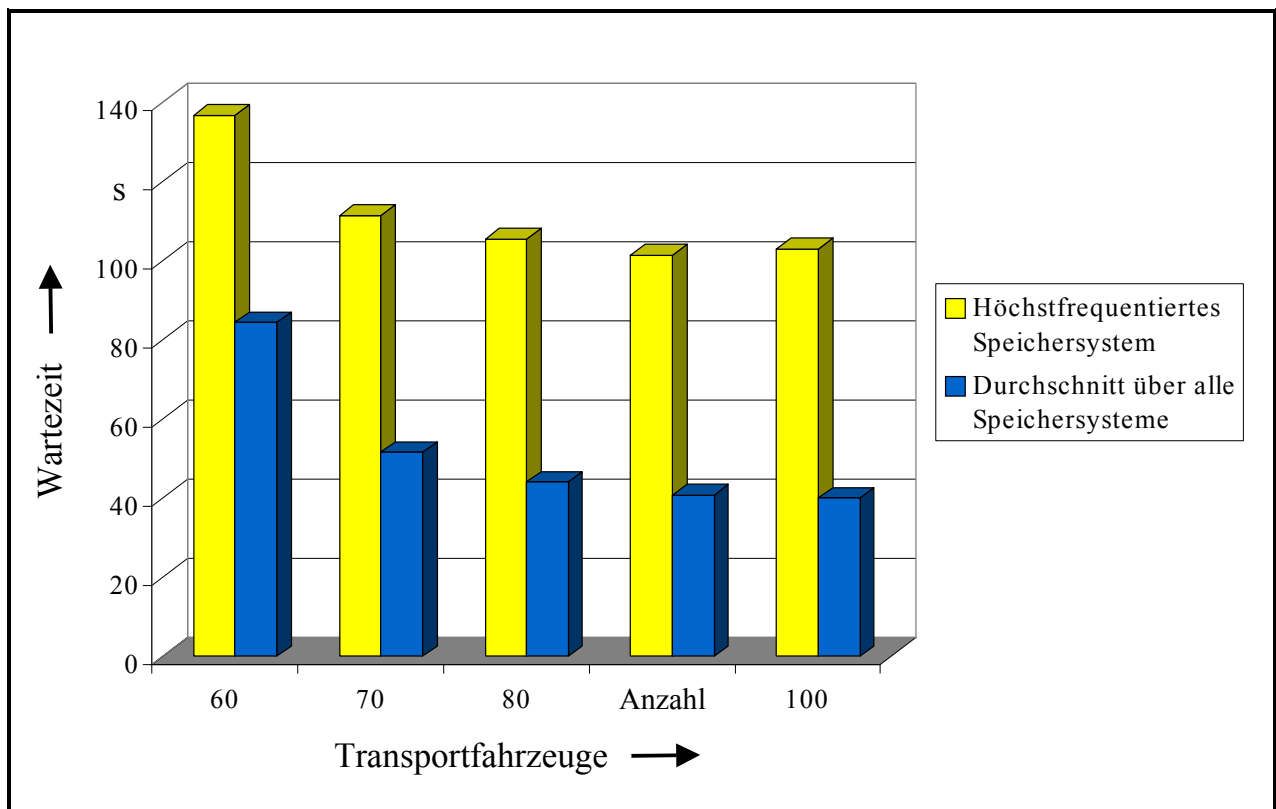


Bild 63: Wartezeiten vom Zeitpunkt der Auslösung eines Auslagerungsauftrages bis zur Übernahme des auszulagernden Loses durch ein Transportfahrzeug

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Wartezeiten bis zur Auslagerung für das hoch ausgelastete Speichersystem um bis zu 2,5x höher sind als bei einem durchschnittlich ausgelasteten Speichersystem. Bei einer Erhöhung der Fahrzeuganzahl sinken die Wartezeiten des hoch ausgelasteten Speichersystems bis zu einem Optimum bei ungefähr 90 Transportfahrzeugen und steigen dann bei einer weiteren Erhöhung der Fahrzeuganzahl aufgrund der zunehmenden gegenseitigen Behinderung der Transportfahrzeuge auf dem Transportkurs wieder an. Ein ähnliches Verhalten auf einem geringeren Wartezeitniveau zeigt das durchschnittlich ausgelastete Speichersystem, wobei die Wartezeitanteile nicht mehr erkennbar ansteigen.

Aus den Ergebnisse lässt sich ableiten, dass in einem hoch ausgelasteten Speichersystem weniger Kapazitätsreserven zur Verfügung stehen, wodurch die Transportfahrzeuge länger auf die Losübernahme warten müssen und sich damit auch die Transportzeiten von einem Fertigungsgerät zum nächsten verlängern. Da dieser Effekt auch durch eine Erhöhung der Fahrzeuganzahl nur begrenzt reduziert werden kann, muss durch den Einsatz weiterer Speichersysteme die zu hohe Auslastung einzelner Systeme ausgeglichen werden.

6.2.3 Planung und Auslegung der Handhabungssysteme

Wie die durchgeführten Entwicklungsarbeiten belegen, beeinflusst die Auslastung der Handhabungssysteme die Kapazität der Speichersysteme. Die Auslastung des Handhabungssystems ist abhängig von der Anzahl an Handhabungsvorgängen in einem definierten Zeitintervall, den geometrischen Abmessungen und der mittleren Belegung des Speichersystems sowie der Geschwindigkeit der einzelnen Achskomponenten in horizontaler, vertikaler und rotatorischer Bewegungsrichtung. Daraus folgt, dass die Spielzeit für die Durchführung eines Handhabungsablaufes ein wichtiges Kriterium für die Leistungsfähigkeit des Speichersystems ist /VDI 1998/. In *Bild 64* sind die Auswirkungen unterschiedlicher Spielzeiten auf den Umlaufbestand an Fertigungslosen in der untersuchten Halbleiterfertigung dargestellt.

Die Simulationsergebnisse zeigen eindeutig, dass Speichersysteme mit schnellen Spielzeiten im Bereich von 15 bis 20 Sekunden für einen Handhabungsablauf zu keinen Engpässen im Materialfluss führen. Der Einsatz langsamerer Speichersysteme mit Spielzeiten im Bereich von 25 bis 30 Sekunden bewirkt Aufstauungen im Materialfluss und führt zu einem kontinuierlichen Anstieg des Umlaufbestandes an Fertigungslosen. Um die geforderte Durchlaufzeit und den Durchsatz an Fertigungslosen erzielen zu können, müssen in diesen Fällen entweder die Spielzeiten durch den Einsatz eines leistungsfähigeren Handhabungssystems verringert oder deren Auslastung durch zusätzliche Speichersysteme reduziert werden.

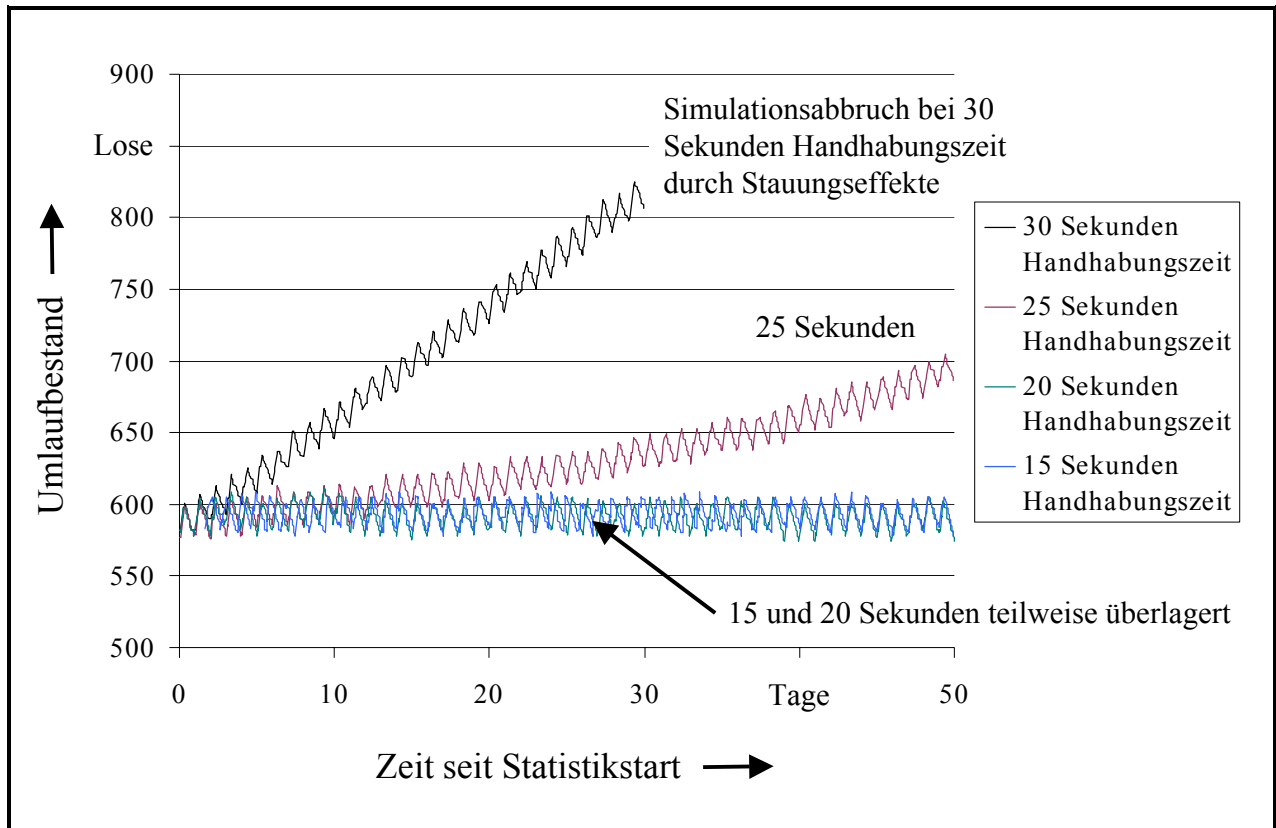


Bild 64: Auswirkungen unterschiedlicher Spielzeiten für die Handhabungsabläufe auf den Umlaufbestand an Fertigungslosen in der untersuchten Halbleiterfertigung

6.3 Optimierung der Materialflusssysteme

6.3.1 Eingabe der Fertigungslose in die Fertigung

Um die Leistungsfähigkeit des Materialflusssysteme sicherzustellen, werden die Systemzustände für eine Anzahl von 60 Transportfahrzeugen bei einer Erhöhung der Eingabemenge an Fertigungslosen untersucht (Bild 65). Die Ergebnisse wurden dann den jeweiligen Umlaufbeständen und Durchlaufzeiten gegenübergestellt und die Systemgrenzen ermittelt, bis zu denen die Leistungsfähigkeit des Materialflusssysteme gewährleistet ist (Bild 66).

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass sich die Verfügbarkeit der Transportfahrzeuge bei einer Erhöhung der Eingabemenge um 20% auf die Hälfte reduziert und sich der Anteil an Leerfahrten verdoppelt. Demgegenüber erhöht sich der Anteil an Transportfahrten und Handhabungsvorgängen nahezu proportional zum Anstieg der Eingabemenge an Fertigungslosen.

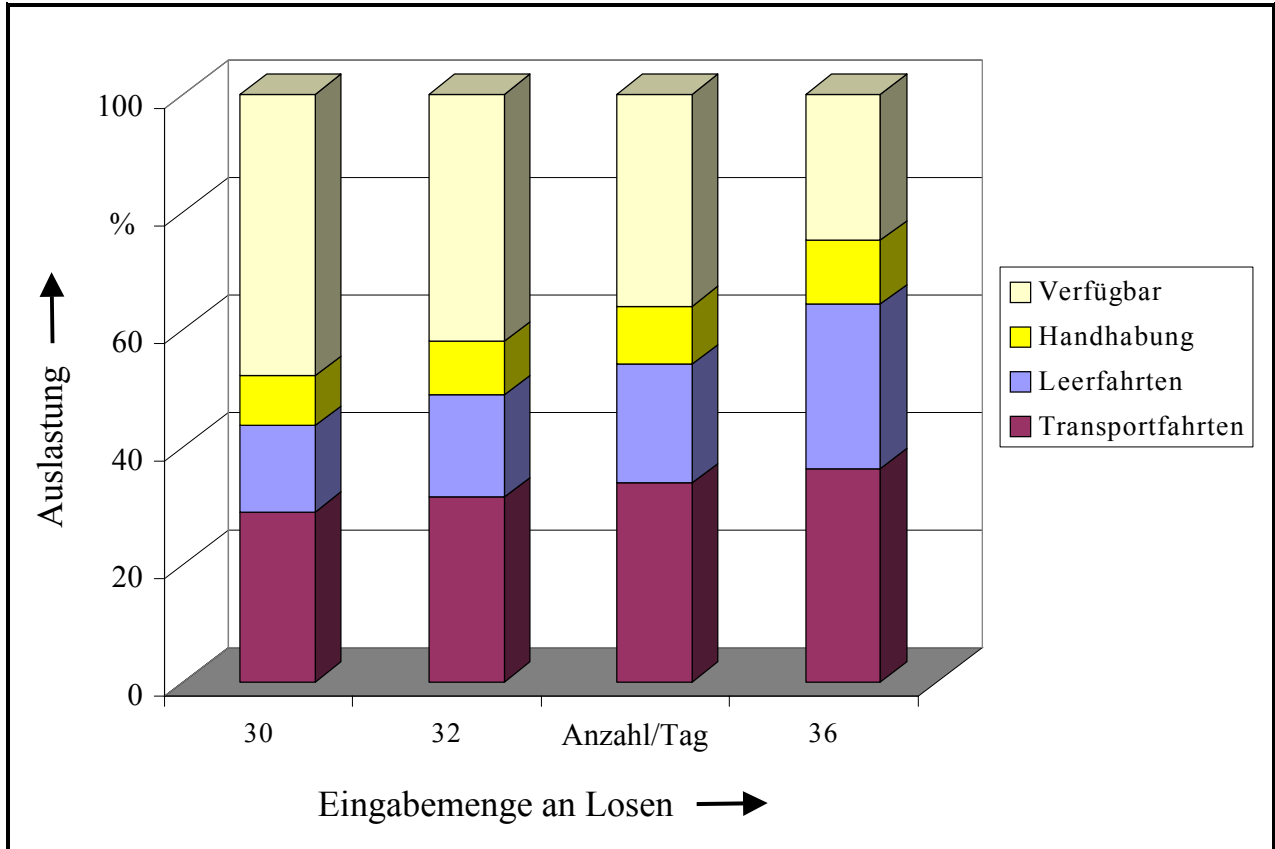


Bild 65: Systemzustände der Transportfahrzeuge für unterschiedliche Eingabemengen an Fertigungslosen in die Halbleiterfertigung

Der Umlaufbestand steigt bei einer Erhöhung der Eingabemenge um 20% überproportional an, während die Durchlaufzeit nur um ca. 10% zunimmt. Die Ergebnisse belegen, dass die Leistungsfähigkeit des Materialflusssystems bei einer Erhöhung der Produktionsmenge um 20% noch gewährleistet ist. Bei einer weiteren Erhöhung der Eingabemenge muss die Kapazität des Materialflusssystems erhöht werden, um Grenzbelastungszustände und Engpässe im Materialfluss zu vermeiden.

Simulationsergebnisse	Eingabemenge an Fertigungslosen [Anzahl]			
	30 Lose	32 Lose	34 Lose	36 Lose
Umlaufbestand [Lose]	455	486	500	593
Durchlaufzeit [Tage]	15,2	15,2	16,0	16,5

Bild 66: Umlaufbestand und Durchlaufzeiten für unterschiedliche Eingabemengen an Fertigungslosen in die Halbleiterfertigung

6.3.2 Automatisierungskonzept

In *Bild 67* sind die Auslastungen und die unterschiedlichen Systemzustände der Transportfahrzeuge für die beiden Automatisierungskonzepte mit einem direkten Lostransport zum nächsten Fertigungsgerät (Lösungsvariante 8, *Bild 31*) und mit einer Zwischenlagerung in einem Speichersystem (Lösungsvariante 7, *Bild 30*) gegenübergestellt. Um die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, sind zusätzlich die Wartezeiten der Fertigungslose von der Auftragszuordnung bis zur Abholung der Lose durch ein Transportfahrzeug für das am höchsten ausgelasteten Speichersystem und für den Durchschnitt über alle Speichersysteme dargestellt.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt eindeutig, dass die prozentualen Zeitanteile für Transportfahrten, Leerfahrten und Handhabung bei der Lösungsvariante 8 mit einer direkten Verfahrensmöglichkeit zum nächsten Fertigungsgerät deutlich niedriger sind als bei der Lösungsvariante 7. Dadurch ist die Auslastung der Transportfahrzeuge geringer und der frei verfügbare Wartezeitanteil der Fahrzeuge um bis zu 20% höher als bei der Lösungsvariante 7. Daraus folgt, dass zur Erzielung der gleichen Transportleistung bei dem Automatisierungskonzept mit einem direkten Lostransport weniger Transportfahrzeuge benötigt werden als bei der Zwischenlagerung aller Transportlose.

Simulationsergebnisse beim Einsatz unterschiedlicher Automatisierungskonzepte					
Teilsysteme	Auswerteparameter	Direkter Lostransport (Lösungsvariante 8)		Lostransport mit Zwischenlagerung (Lösungsvariante 7)	
		80 Fahrzeuge	100 Fahrzeuge	80 Fahrzeuge	100 Fahrzeuge
Transportfahrzeuge	Transportfahrten [%]	15,2	12,0	20,8	14,1
	Leerfahrten [%]	31,8	29,7	34,5	32,9
	Handhabung [%]	8,0	6,5	9,2	7,4
	Wartezeit [%]	45,0	51,8	35,5	45,6
Durchschnitt über alle Speichersysteme	Wartezeit bis zur Auslagerung [s]	44	40	93	51
Höchstfrequentiertes Speichersystem	Wartezeit bis zur Auslagerung [s]	105	103	152	117

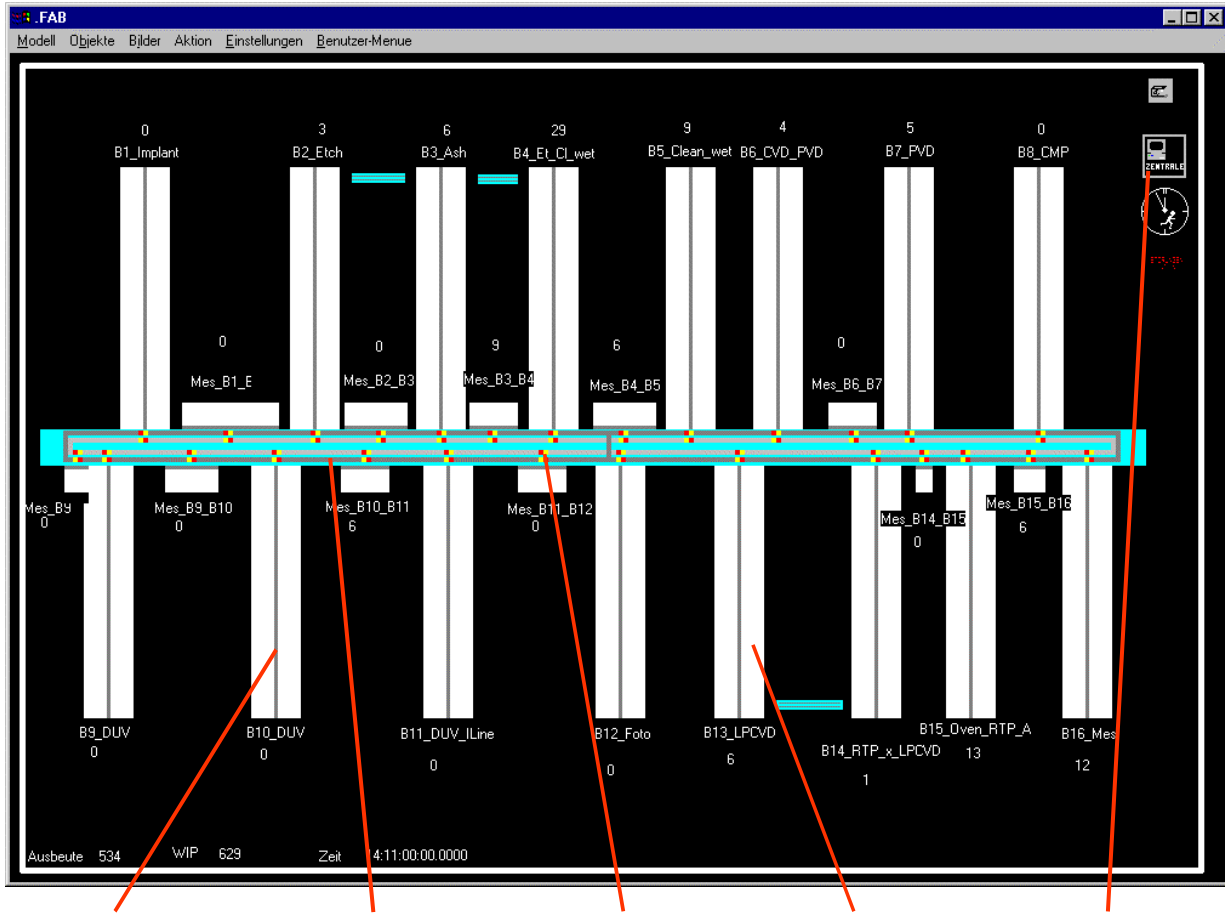
Bild 67: Gegenüberstellung der Systemzustände der Transportfahrzeuge und der Wartezeiten in einem Speichersystem bis zur Auslagerung der Lose für die beiden Automatisierungskonzepte mit und ohne direkten Lostransport

Die Simulationsergebnisse belegen weiter, dass sich bei 80 Transportfahrzeugen die Wartezeiten bei der Lösungsvariante 7 bis zur Auslagerung der Fertigungslose aus einem hoch ausgelasteten Speichersystem gegenüber der Lösungsvariante 8 um bis zu 50% erhöhen und gegenüber dem Durchschnitt über alle Speichersysteme sogar nahezu verdoppeln. Die Anwendung des Automatisierungskonzeptes mit einer direkten Transportmöglichkeit zum nächsten Fertigungsgerät führt nicht nur zu einer reduzierten Auslastung der Transportfahrzeuge, sondern auch zu einer signifikanten Verringerung der Wartezeiten bis zur Auslagerung der Lose aus den Speichersystemen, wodurch, wie die bisherigen Ergebnisse zeigen, auch die Auslastung der einzelnen Speichersysteme reduziert wird.

6.4 Planung, Auslegung und Optimierung eines neu entwickelten Systems zur Materialflussautomatisierung

Zur Reduzierung der Investitionskosten wurde für die geplante Halbleiterfertigung ein neues System zur Materialflussautomatisierung entwickelt und die Leistungsfähigkeit der neuen Systemlösung mit Hilfe des Simulationsbaukastens erprobt und optimiert. Die neuartige Systemlösung basiert auf dem Automatisierungskonzept mit eigenständigen Transportsystemen in jedem Fertigungs- und im zentralen Korridorbereich (Lösungsvariante 5, *Bild 28*). In den einzelnen Fertigungsbereichen wird der bereichsinterne Transport der Fertigungslose von über der Reinraumdecke angeordneten und entlang der Fertigungsbereiche verfahrbaren Robotersystemen durchgeführt /Griessing 1997/. Da über der Reinraumdecke keine hochreinen Umgebungsbedingungen vorliegen können hier Robotersysteme mit einer niedrigeren Reinheitsklasse eingesetzt werden, deren Investitionskosten niedriger sind als die von Automatisierungssystemen mit einer sehr hohen Reinheitsklasse. Die bereichsübergreifenden Transportvorgänge werden von einem oder mehreren Rollenbahnsystemen durchgeführt, die über dem Korridorbereich angeordnet sind.

Die Speicherung der Fertigungslose erfolgt oberhalb der Fertigungsbereiche direkt auf der Reinraumdecke im Verfah- und Handhabungsbereich der Robotersysteme. Die Übergabe der Fertigungslose zu den Ein-/Ausgabestationen der Fertigungsgeräte wird durch automatische Liftstationen ausgeführt, die in ihrem Aufbau eine Subklasse der Lösungsvariante 12 darstellen und mit Hilfe eines Schleusensystems die Lose durch die Reinraumdecke zu den Fertigungsgeräten handhaben. Um eine Verunreinigung der Fertigungslose bei den Transport- und Speichervorgängen oberhalb der Reinraumdecke auszuschließen, werden Transportbehältnisse nach dem FOUP-Standard eingesetzt, welche die geforderten hochreinen Umgebungsbedingungen aufweisen und die von außen nicht kontaminiert werden. *Bild 68* zeigt das mit Hilfe des Simulationsbaukastens erstellte Simulationsmodell für das neu entwickelte System zur Materialflussautomatisierung.



Robotersystem Rollenbahnsysteme Fertigungslos Speicherbereich Modellsteuerung

Bild 68: Simulationsmodell für das neu entwickelte System zur Materialflussautomatisierung mit Transport, Speicherung und Handhabung der Fertigungslose oberhalb der Reinraumdecke

Die Festlegung der notwendigen Geschwindigkeiten für die Rollenbahnen und die einzelnen Verfahrsachsen der Robotersysteme erfolgt durch den Einsatz des Simulationsbaukastens. In *Bild 69* sind als Ergebnis der Simulationsuntersuchungen die Auslastungen der einzelnen Robotersysteme zur Durchführung der bereichsinternen Transportvorgänge dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verfahrgeschwindigkeiten der Bewegungsachsen jedes Robotersystems ausreichend sind. Außerdem verfügen die Robotersysteme über genügend freie Transportkapazitäten und sind nicht bis an ihre Leistungsgrenze ausgelastet. Die weitere Auswertung der durchgeführten Simulationsuntersuchungen zeigt auch, dass die eingesetzten Rollenbahnsysteme, die Speicherkapazitäten und die Liftstationen zu den Fertigungsgeräten ebenfalls ausreichend dimensioniert sind, über genügend freie Kapazitäten verfügen und keine Engpässe im Materialflusssystem der Halbleiterfertigung darstellen.

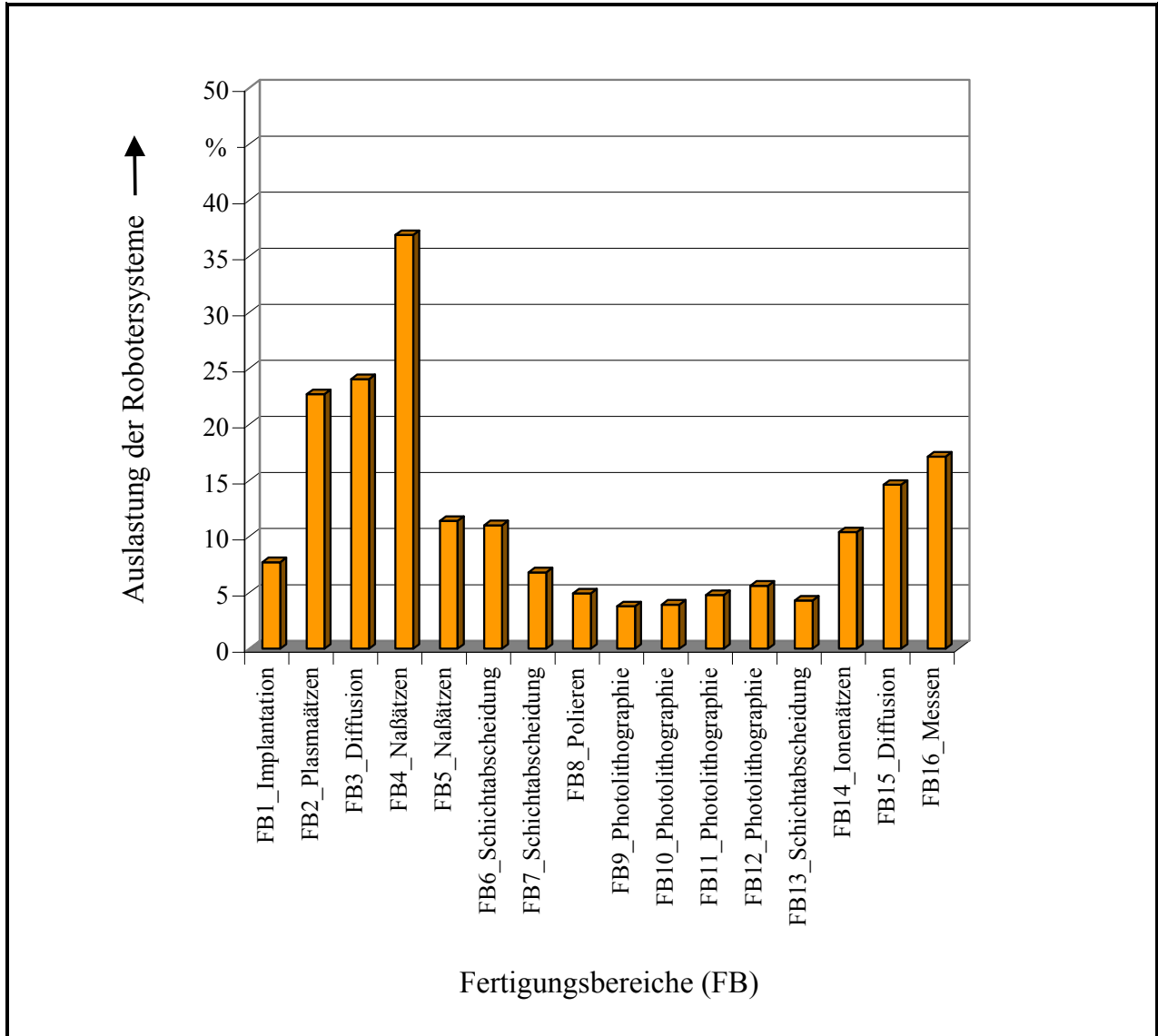


Bild 69: Auslastung der über der Reinraumdecke angeordneten Robotersysteme für die Durchführung der bereichsinternen Transportvorgänge

Der Nachweis der Leistungsfähigkeit des neu entwickelten Systems zur Materialflussautomatisierung mit Transport und Speicherung der Fertigungslose oberhalb der Reinraumdecke wurde mit Hilfe des entwickelten Simulationsbaukastens schnell und umfassend erbracht. Zusätzlich konnten die einzelnen Transport-, Speicher- und Robotersysteme auf der Basis der vorliegenden Anforderungen hinsichtlich der von Ihnen geforderten Funktions- und Leistungsfähigkeit ausgelegt werden. Die Anforderung an einen geringen Aufwand für die Modellerstellung und die Modelländerung wurden ebenfalls in vollem Umfang erfüllt. Die neu entwickelte Systemlösung stellt somit eine weitere Alternative zur Materialflussautomatisierung dar. Die praktische Funktionsfähigkeit dieser Systemlösung in einer realen Halbleiterfertigung muss insbesondere unter dem Gesichtspunkt der vorliegenden Reinheitsanforderungen noch nachgewiesen werden.

6.5 Diskussion und Bewertung der erzielten Ergebnisse

Mit den Ergebnissen der durchgeführten Simulationsuntersuchungen wird die Funktions- und Leistungsfähigkeit des entwickelten Simulationsbaukastens entsprechend den vorgegebenen Anforderungen bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme nachgewiesen. Die Ergebnisse belegen auch die Leistungsfähigkeit der durchgeführten Bewertungen sowie der entwickelten Lösungskonzepte und Leitlinien bei der wirtschaftlichen Planung und bedarfsentsprechenden Auslegung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme in der betrachteten Halbleiterfertigung.

Die entwickelten Strategien ermöglichen die Optimierung des automatisierten Materialflusssystems in der Halbleiterfertigung hinsichtlich der vorgegebenen Zielkriterien. Durch die Anwendung des entwickelten Berechnungsverfahrens ist es bereits in einem frühen Planungsstadium möglich, die Kapazitäten der Speicher- und Handhabungssysteme überschlägig zu berechnen und als aussagefähige Eingangsdaten für die Erstellung der Simulationsmodelle zu nutzen.

Die erzielten Simulationsergebnisse belegen, dass das entwickelte Automatisierungskonzept mit einer direkten Transportmöglichkeit von einem Fertigungsgerät zum nächsten mit nur einem einzigen fabrikweiten Transportsystem die gestellten Anforderungen sehr gut erfüllt. Die Ergebnisse beweisen, dass durch die Anwendung dieses Automatisierungskonzeptes Verbesserungen bei der Durchlaufzeit und dem Umlaufbestand erzielt werden. Zusätzlich ist es möglich, die Auslastungen der Transportfahrzeuge und der Speichersysteme zu verringern und die Investitionskosten zu minimieren.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsuntersuchungen weisen zudem nach, dass der entwickelte Simulationsbaukasten auch bei sich ändernden komplexen Fertigungs-, Layout- und Automatisierungsszenarien mit großem Erfolg als einfach anzuwendende und kostengünstige Experimentierplattform in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung einsetzbar ist. Die Auswirkungen bei der Änderung wichtiger Einflussgrößen können mit Hilfe des entwickelten Simulationsbaukastens schnell und detailliert untersucht und optimiert werden. Ohne größeren Aufwand ist es möglich, die Funktions- und Leistungsfähigkeit des neu entwickelten Automatisierungskonzeptes mit über der Reinraumdecke angeordneten Automatisierungssystemen mit Hilfe des entwickelten Simulationsbaukastens zu untersuchen, zu optimieren und vollständig nachzuweisen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Halbleiterfertigung und Flachbildschirmfertigung werden die Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge heutzutage häufig noch manuell ausgeführt. Durch die zunehmende Miniaturisierung der Strukturbreiten und die steigende Anzahl an Schaltkreisen pro Substrat werden zusätzlich höhere Anforderungen an die Reinheit der Produktionsumgebung gestellt. Da der Mensch die größte Partikelquelle im Reinraum darstellt, muss der Einsatz von Personal im Reinraum insbesondere für einfach automatisierbare Arbeitsabläufe zunehmend reduziert werden. Zudem bedingen die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit einer Halbleiterfertigung den Einsatz von Substraten mit immer größeren Abmessungen, wodurch ein Fertigungslos aufgrund der großen Handhabungsgewichte nicht mehr manuell transportiert oder gehandhabt werden kann.

Da die Anforderungen an die Produktqualität stark ansteigen existiert auch hier die Forderung, die Transport-, Speicher- und Handhabungsvorgänge in der Halbleiterfertigung zukünftig zu automatisieren. Große Defizite bestanden jedoch in der wirtschaftlichen Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme und in der Optimierung des gesamten Materialflusssystems hinsichtlich vorgegebener Zielkriterien. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war deshalb die Entwicklung eines Simulationsbaukastens, um die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung zu vereinfachen.

Ausgehend von der Aufgabenstellung und der formulierten Zielsetzung wurde als erstes die Ausgangssituation bei der Fertigung von Halbleitern und Flachbildschirmen unter dem Gesichtspunkt einer wirtschaftlichen Automatisierung der Materialflusssysteme untersucht. Schwerpunkte bei den durchgeführten Untersuchungen bildeten dabei die eingesetzten Fertigungsgeräte, das zugrunde liegende Fertigungslayout und die Systeme zur Materialflussautomatisierung. Besonderes Augenmerk lag außerdem auf der Betrachtung existierender Lösungsverfahren und Softwaresysteme zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme.

Die Analyse der Einflüsse zeigte, dass große Defizite bei den Verfahren zur Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung existierten und keine Hilfsmittel und Softwaresysteme vorhanden waren, welche die ermittelten Anforderungen in vollem Umfang unterstützten. Die Analyse belegte auch, dass ein Simulationsbaukasten mit einem objektorientierten Modellaufbau am besten geeignet war, die ermittelten Anforderungen zu erfüllen und das zusätzlich ein Berechnungsverfahren zur überschlüssigen Auslegung der Speichersysteme bereits im Planungsvorfeld benötigt wurde.

Aufbauend auf die durchgeführten Untersuchungen wurden die Anforderungen an die Entwicklung des Simulationsbaukastens und an die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme im Detail analysiert und ermittelt sowie darauf aufbauend die Entwicklungsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit abgeleitet. Aus der Analyse konnte weiter abgeleitet werden, dass große Hemmnisse bei der Planung und Auslegung automatisierter Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme bestanden, da Bewertungen über die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Systemvarianten fehlten. Zudem existierten keine Lösungskonzepte oder Leitli-

nien, die eine wirtschaftliche Planung und Auslegung automatisierter Materialflusssysteme unterstützen.

Ebenso wurde festgestellt, dass keine Strategien existierten, mit denen die automatisierten Materialflusssysteme hinsichtlich vorgegebener Zielkriterien, wie z.B. der Reduzierung der Durchlaufzeit, der Steigerung des Durchsatzes oder der Erhöhung der Fertigungsgeräteausrüstung, optimiert werden konnten. Die abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkte wurden abschließend mit dem Vorgehen bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung abgeglichen, um bestehende Defizite bei den Planungshilfsmitteln im Rahmen der Entwicklungsarbeiten beseitigen zu können.

Das Defizit bei den simulationsgestützten Planungsverfahren konnte durch die Entwicklung des Simulationsbaukastens beseitigt werden. Dazu wurden unterschiedliche Lösungsvarianten für die Modellstruktur des Simulationsbaukastens entwickelt, anhand der ermittelten Anforderungen bewertet und eine Modellstruktur basierend auf einem Fabrikmodell mit einer integrierten Datenschnittstelle zum Datenaustausch mit einem zusätzlichen Speichermodell ausgewählt. Die Erstellung von Funktionselementen und Ablaufstrukturen zur Beschreibung der Materialflussabläufe ermöglichte die Entwicklung eines leistungsfähigen Automatisierungskonzeptes. Für die unterschiedlichen Transport- und Speichersystemvarianten wurden Aufbaustrukturen entwickelt, welche die Modellstruktur des Simulationsbaukastens ergänzen und eine Leistungsbewertung auf der Basis der ermittelten Anforderungen ermöglichen.

Mit Hilfe des realisierten Speichermodells wurden Simulationsuntersuchungen durchgeführt, die auf der realen Datenbasis einer Halbleiterfertigung basierten und eine optimierte Planung und Auslegung automatisierter Speichersysteme ermöglichten. Die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens ermöglichte die übersichtliche Auslegung der Speicher- und Handhabungssysteme bereits in einem frühen Planungsstadium und lieferte aussagefähige Eingangsdaten für die Erstellung der Simulationsmodelle. Auf der Basis der durchgeführten Leistungsbewertungen und der entwickelten Lösungskonzepte wurden Leitlinien erarbeitet, die einen wesentlichen Beitrag für die wirtschaftliche Planung und Auslegung der Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme leisten.

Der Realisierung des Simulationsbaukastens erfolgte auf der Basis der entwickelten Ablaufstrukturen. Durch die Definition einer realitätsgetreuen Modellfabrik und die Nutzung des Simulationsbaukastens als Experimentierplattform war es möglich, unterschiedliche Szenarien zur Optimierung automatisierter Materialflusssysteme zu simulieren und die erzielten Ergebnisse auszuwerten. Dazu wurden verschiedene Einflussgrößen verändert, um die Auswirkungen auf die Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme quantifizieren zu können. Für diese Einflussgrößen wurden in mehreren Simulationsläufen Optimierungsvarianten entwickelt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet. Als Ergebnis dieser Entwicklungsarbeiten wurden Strategien abgeleitet, die eine wirtschaftliche Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in der Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung ermöglichen.

Der entwickelte Simulationsbaukasten wurde abschließend bei der Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme in einer Halbleiterfertigung eingesetzt und seine Leistungs- und Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Die Anwendung der durchgeführten Leistungsbewertungen sowie der entwickelten Lösungskonzepte und Leitlinien ermöglichte die wirtschaftliche Planung und Auslegung der automatisierten Transport-, Speicher- und Handhabungssysteme. Anhand der entwickelten Strategien wurden die Materialflusssysteme optimiert und die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems und der einzelnen Teilsysteme aufeinander abgestimmt. Ein neu entwickeltes System zur Materialflussautomatisierung mit über der Reinraumdecke installierten Roboter- und Rollenbahnsystemen wurde mit Hilfe des entwickelten Simulationsbaukastens auf seine Funktionsfähigkeit untersucht. Im Rahmen der durchgeführten Simulationen konnte die Leistungsfähigkeit dieses Systems schnell und zuverlässig unter Berücksichtigung aller Anforderungen nachgewiesen und optimiert werden. Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse belegen, dass die ermittelten Anforderungen und die daraus abgeleiteten Entwicklungsschwerpunkte in vollem Umfang erfüllt und die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit erreicht wurde.

Genereller Entwicklungsbedarf für die Zukunft besteht bei der automatischen Erfassung der Simulationsdaten, die für die Erstellung der Simulationsmodelle und die Durchführung der Simulationsexperimente benötigt werden. Die Ermittlung dieser Daten ist sehr zeitaufwendig und erfolgt meistens manuell mit Hilfe von Datenlisten, mit denen alle Daten einzeln erfasst und auf ihre Richtigkeit überprüft werden müssen. Eine zumindest teilweise rechnerunterstützte Erfassung der Daten direkt aus dem Produktionsplanungssystem, der Fertigungs- oder der Materialflusssteuerung mit Hilfe einer spezifizierten Datenschnittstelle vereinfacht die Datenerfassung sehr.

Als weiterer Entwicklungsschwerpunkt ist eine Kopplung des Simulationsbaukastens mit dem Produktionsplanungssystem und der Fertigungssteuerung anzustreben, um die notwendigen Simulationsdaten direkt in den Simulationsbaukasten übernehmen zu können. Durch diese Maßnahme kann bereits im Planungsstadium die Ermittlung der Simulationsdaten stark vereinfacht und zumindest teilweise automatisiert erfolgen. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Simulationsbaukasten auf der Basis aktuellen Datenmaterials auch im laufenden Betrieb für die Auftragseinplanung oder die Fertigungssteuerung eingesetzt werden kann, um Engpässe in der Produktion zu beseitigen oder die Produktionsplanung durch die simulative Untersuchung möglicher Produktionsszenarien zu unterstützen. Zusätzlich können Investitionsentscheidungen getroffen werden, deren Wirtschaftlichkeit bereits vorab mit Hilfe des Simulationsbaukastens überprüft und quantifiziert wurde.

In einem zusätzlichen Entwicklungsschritt kann der Simulationsbaukasten zu einer interaktiven 3D-Simulationsplattform ausgebaut werden, welche eine Halbleiter- oder Flachbildschirmfertigung virtuell darstellt und direkte Eingriffe in die Fertigung erlaubt. Die virtuelle Darstellungsform ermöglicht die interaktive Betrachtung und Beurteilung aktueller Produktionsabläufe und zukünftiger Produktionsszenarien und stellt damit für die Analyse und Optimierung des Produktionsumfeldes und der automatisierten Materialflusssysteme ein leistungsfähiges Werkzeug dar. Ebenso besteht die Möglichkeit, direkt aus der Sicht eines Fertigungsloses einen kompletten Prozessablauf zu verfolgen und daraus Maßnahmen für die Optimierung der Fertigungsprozesse und des Materialflusssystems abzuleiten.

8 Summary

A Simulation Kit for Use in Semiconductor and Flat Screen Manufacturing – A contribution towards the cost-efficient planning, layout and optimization of automated material flows

Transportation, stocking and handling steps are still often carried out manually in semiconductor and flat screen manufacturing. Due to the increasing miniaturization of structure widths and the rising number of switching circuits per substrate, even higher demands are being made as far as the level of cleanliness of the manufacturing environment is concerned. As man represents the main source of particles in a cleanroom, the use of personnel in cleanrooms needs to be reduced, especially with regard to simple work processes which could be automated. Also, demands made regarding the economic efficiency of a semiconductor or flat screen plant mean that substrates of ever-increasing dimensions need to be utilized. However, such production lots are so big that they can no longer be transported or handled manually.

The transportation, stocking and handling steps in semiconductor and flat screen manufacturing are therefore being increasingly automated. The main reasons for this are primarily the mounting size of substrates, product handling weights, the more efficient utilization of manufacturing equipment and reduced transportation times. Automation also reduces the risk of damage to the product, lowers particle-related rejects and avoids misrouting and defective processing in the factory. Especially in the semiconductor industry, cycle times for manufacturing a product may be as long as 15 weeks or more. During this time, up to 900 different work steps may be carried out and 100 different pieces of manufacturing equipment implemented. Approximately two thirds of these lengthy cycle times are required for unproductive transportation, stocking, handling and waiting steps. Studies have shown that approximate 43% of cycle times are taken up with stocking steps, 8% with transportation steps and only 30% with actual process and inspection times.

As automated transportation, stocking and handling systems are often only utilized as autonomous subsystems in separate manufacturing areas, there is little knowledge about low-cost concepts for automating the entire material flow sequences in semiconductor and flat screen manufacturing. Analyses which have been carried out show that transportation, stocking and handling systems are often laid out and implemented incorrectly. This is because planning and layout were unable to fulfill requirements due to absence of adequate planning aids.

This paper makes a fundamental contribution towards the cost-efficient planning, layout and optimization of automated material flows in semiconductor and flat screen manufacturing. The aim of this thesis was to develop a simulation kit to obtain fast, detailed, sound results to perform these tasks and to take pre-set target criteria and specific production conditions into account at the same time. The main parameters used in the thesis included capacities, speeds, maximum equipment utilization, the number of automated systems, system performance, transportation times, storage times, waiting times and also applied manufacturing and material flow strategies.

As far as the aspect of cost-efficiency is concerned, efficient simulation tools required for planning, laying out and optimizing automated transportation, stocking and handling systems need to be capable of taking all influencing variables of the entire manufacturing environment into consideration. The simulation models for this must be able to depict all of the automated systems, manufacturing areas, manufacturing devices, process steps and product technologies. It must be possible to generate such models with a high degree of detail and to adapt them to the actual planning situation. In addition to this, all simulation tests need to be carried out as fast as possible and sound results obtained.

The initial situation of semiconductor and flat screen manufacturing was investigated in detail from the viewpoint of the cost-effective automation of material flow systems. The main points dealt with in the tests included interrelationships between existing manufacturing devices, the production layout and the systems utilized to automate material flow sequences. Both existing solution-finding methods and also software systems for planning, laying out and optimizing automated transportation, stocking and handling systems were considered in detail and investigated for possible implementation.

In the analysis of the various influences, the relevant requirements of the simulation technology, manufacturing engineering and material flow automation were all structured and derived in detail with a view to the objectives set. The analysis proved that considerable deficits exist in the methods used for planning, laying out and optimizing automated material flow systems for semiconductor and flat screen manufacturing and also pointed out that no aids or software systems are available to support the full scope of the requirements ascertained. Furthermore, the analysis showed that a simulation kit with an object-orientated model set-up would be best-suited to fulfill requirements and that a calculation method for the correct layout of stocking and handling systems is required right from the start of the planning phase.

The main development points of this paper were derived based on the requirements of the simulation kit and of the planning, layout and optimization of automated material flows. The analyses carried out showed that considerable obstacles exist when planning and laying out automated transportation, stocking and handling systems due to lack of assessments regarding the efficiency of the different system variants. The analysis made it clear that there are no solution concepts and guidelines to support the cost-efficient planning and layout of automated material flow systems.

Neither are any strategies available for optimizing automated material flows with regard to pre-set criteria such as reducing cycle times, decreasing circulating stocks, increasing throughput or improving the utilization of manufacturing equipment. On comparing the main development points with the procedures used in planning, laying out and optimizing automated material flow systems in semiconductor and flat screen manufacturing, it was possible to eliminate existing deficits and gaps in simulation tools with the aid of this thesis. On considering the initial situation and the analysis of influences, the deficits, weak points and gaps in knowledge ascertained clearly demonstrated the necessity of developing the simulation kit for the cost-efficient planning, layout and optimization of automated material flows in semiconductor and flat screen manufacturing.

Deficits in the simulation-assisted planning method can thus be eliminated using the new simulation kit. Different solution variants have also been developed for the model structure of the simulation kit. These have been assessed according to the requirements established and a model structure based on a factory model with integrated data interface for data exchange with an additional stocker model has also been selected. Through the construction of functional elements and sequence structures to describe material flow sequences, it was possible to develop a highly efficient automation concept. Construction structures were developed for the different transportation and stocker system variants in order to extend the simulation kit's model structure and to enable efficiency to be assessed according to requirements made.

With the aid of the stocker model realized, simulation tests were carried out based on the real data basis of a semiconductor factory. This also permits the optimized planning and layout of automated stocker systems. The development of a calculation method allows stocker and handling systems to be laid out correctly early on in the planning phase and supplies sound input data for constructing the simulation models. The efficiency assessments carried out and the guidelines developed from the solution concept make an important contribution towards the cost-efficient planning and layout of transportation, stocker and handling systems in accordance with requirements.

The simulation kit has been realized based on the sequence structures developed. By defining a near-real model factory and by using the simulation kit as a platform for experiments, it was possible to simulate various scenarios to optimize automated material flow systems and to analyze the results obtained. In addition to this, based on the requirements ascertained, different influencing variables were altered to quantify the effects on the planning, layout and optimization of automated material flow systems. Optimization variants were developed for these influencing variables in several simulation runs and were assessed with regard to their degree of efficiency. Through the development of additional sequence structures for material flow control, it was possible to select optimum production lots and manufacturing equipment during the production process. As a result of this development work, strategies have been derived which serve to considerably simplify the cost-efficient optimization of automated material flow systems in the semiconductor and flat screen industries.

To prove the usability of the simulation kit developed for planning, laying out and optimizing automated material flow systems, it was implemented in a semiconductor factory and tested for its efficiency and functional ability. By incorporating the evaluations of efficiency and the solution concepts and guidelines developed, it was possible to plan and lay out transportation, stocker and handling systems. Based on the strategies developed, automated material flow systems were optimized and the functional abilities of the overall system and of separate subsystems were aligned with one another.

Using the new simulation kit, the functional capabilities of a newly-developed system for automating material flows with robot and roller track systems installed above the cleanroom ceiling were also tested. Within the scope of the simulations carried out, it was possible both to prove the efficiency of this new system and to optimize it rapidly and reliably, taking all requirements into

consideration. The results obtained show that the requirements made and the main development points derived from these could be fulfilled completely and the objectives of this paper were reached.

Together with the efficiency assessments carried out, the solution concepts developed and the guidelines and optimization strategies derived from these, the newly-developed simulation kit makes an indispensable contribution towards the cost-efficient and requirement-orientated automation of material flow systems in semiconductor and flat screen manufacturing. In contrast with planning techniques used up till now, the implementation of the new simulation kit enables all the subsystems and influencing variables associated with the automation of material flow systems to be considered and assessed. The use of the newly-realized simulation kit both as an experimental platform and as a tool for the planning and layout of automated material flow systems in a semiconductor plant clearly show that much better planning data can be obtained through the implementation of this highly-efficient instrument. The planning data can then be utilized as a basis for making economic calculations and investment decisions.

The main demand as far as future developments are concerned is for the automatic acquisition of the simulation data required to generate simulation models and to carry out simulation experiments. Obtaining this data is a very time-consuming procedure and is generally performed manually using data lists in the process of which all data has to be recorded individually and checked for its correctness. Even partial computer-assisted data acquisition directly from the production planning system, manufacturing execution or material flow control with the aid of a specific data interface would make the acquisition data much easier.

A further development potential for the future would be to couple the simulation kit with the production planning system and manufacturing execution to enable the necessary simulation data to be acquired directly by the simulation kit. This would permit simulation data to be recorded much easier and at least in a partially-automated way even in the planning phase. Another advantage of this would be the fact that the simulation kit could be implemented using current data material as a basis even when in running operation. The data obtained could be utilized both for order-planning and also for manufacturing execution in order to eliminate bottlenecks in production or to support production planning by performing simulation tests based on conceivable manufacturing scenarios. Through the use of the simulation kit, sound investment decisions could also be made where cost-efficiency has already been checked and quantified in advance.

It is also possible to further develop the simulation kit into an interactive 3-D simulation platform capable of virtually depicting a semiconductor or flat screen plant and enabling production interventions to be made directly. A virtual model permits the interactive observation and assessment of actual manufacturing sequences and of future production scenarios, thus representing a highly-effective tool for use in the analysis and optimization of the manufacturing environment and of automated material flow systems. There is also the possibility of following a complete process sequence from the viewpoint of a production lot and of deriving measures for optimizing both manufacturing processes and the material flow system as a result.

9 Literaturverzeichnis

- Alexanderson 1997 Alexanderson, J.: Cleaning the slate: 300mm transition can improve factory effectiveness.
In: Solid State Technology 40 (1997) Nr. 7.
- Ammon 1989 Ammon, P.: ASIC-Praxis: Grundlagen und Handhabung anwenderspezifischer ICs.
München: Franzis, 1989.
- Arnold 2000 Arnold, B.: 300mm Fabs Now in Season.
In: Semiconductor Magazine (2000) Nr. 6, S. 33.
- Atherton 1996 Atherton, L.-F.; Atherton, R.-W.: Wafer Fabrication - Factory Performance and Analysis.
Boston; Dordrecht; London: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- Bader 1993 Bader, U.: Materialfluss bei Clustertools.
In: Ryssel, H. (Hrsg.): Bereitstellung von Clustertools für die IC-Fertigung: GME-Diskussionsveranstaltung am 23. und 24. April 1993 in Stuttgart.
Frankfurt/M.: VDE, 1993, S. 162-194.
- Bader 1993a Bader, U.: Simulationsgestützte Planungsmethodik zur Integration von Materialdistributionssystemen.
In: Schraft, R.D. (Hrsg.): IPA-Technologieforum 1993: Simulationsgestützte Methoden zur Planung und Optimierung komplexer Produktionsabläufe (IPA-Technologie Forum F 9) am 27. Oktober 1993 in Stuttgart-Vaihingen.
Stuttgart: FpF – Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 1993, S. 73-113.
- Bader 1994 Bader, U.: Künstliche Welten der Computersimulation: Simulationsgestützte Methoden zur Planung und Optimierung komplexer Produktionsabläufe:
In: Betrieb und Meister (1994) Nr. 3, S. 24-25.
- Bader 1996 Bader, U.; u.a.: Planning and realization of a highly intelligent and flexible transport system for the material distribution of minienvironments.
In: Contamination Control (Hrsg.): Proceedings of the 42nd Annual Technical Meeting, May 12-16, 1996 in Orlando FL (USA).
Mount Prospect IL (USA): The Institute of Environmental Sciences, 1996, S. 506-515.

- Bader 1997 Bader, U.; u.a.: Flexible Automation Concepts: The Selection Installation and Simulation of Automation Systems in the Microelectronics Industry.
In: Future Fab International (1997) Nr. 4, S. 81-89.
- Bader 1998 Bader, U.; u.a.: Cost Efficient Future Automation and Transport Concepts.
In: ISSM (Hrsg.): Proceedings of 7th International Symposium on Semiconductor Manufacturing, Oct. 6-9, 1998 in Tokyo (JPN).
Tokyo (JPN): Ultra Clean Society, 1998, S. 57-60.
- Bader 1999 Bader, U.; u.a.: A View to the Future: Modular Simulation Kit for Fab-Wide Planning and Simulation of Automated Material Handling Systems in Semiconductor Industries.
In: IEEE; SEMI (Hrsg.): ASMC'99 Proceedings. 10th Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, September 8-10, 1999 in Boston MA (USA).
Piscataway NJ (USA): IEEE, 1999, S. 109-112.
- Bader 1999a Bader, U.; u.a.: Prozess 2000 - Modulares Fertigungssystem in der Mikrotechnik.
In: wt Werkstattstechnik 89 (1999) Nr. 11/12, S. 485-488.
- Bader 1999b Bader, U.; u.a.: Modulares Fertigungssystem: Simulationsbaukasten optimiert Funktionsfähigkeit von Geräteentwicklungen.
In: Maschinenmarkt (1999) Nr. 44, S. 46-48.
- Becker 1991 Becker, B. D.: Simulationssystem für Fertigungsprozesse mit Stückgutcharakter.
Berlin; u.a.: Springer, 1991.
(IPA-IAO Forschung und Praxis 154)
Stuttgart, Universität, Dissertation 1991.
- Bigelow 2000 Bigelow, M.: Leverage Factory and Tool Automation to Deliver High Volume, High Mix of Qualified Products.
In: Semiconductor Fabtech (2000) 12th Edition, S. 41-47.
- Binder 1999 Binder, H.; Honold, A.: Automation and Fab Concepts for 300mm Wafer Manufacturing.
In: Microelectronic Engineering 45 (1999) Nr. 2-3, S. 91- 100.
- Bonora 2001 Bonora, T.; Feindel, T.: New tools and fabs demand 300mm automation optimization.
In: Solid State Technology (2001) Nr. 6.
- Boyle 1997 Boyle, E.: Using Discrete Event 3D Simulation Modeling to Design 300 mm Equipment.
In: Channel Magazin (1997) Nr. 10, S. 4-13.

- Bryda 1991 Bryda, R.: Optimierung von Materialflusssystemen mit der Bedientheorie durch Dekomposition von Bediensystemnetzwerken. Karlsruhe: Ernst Grässer, 1991.
Karlsruhe, Universität, Dissertation, 1991.
- Burkhardt 1999 Burkhardt, R.: UML - Unified Modeling Language - Objektorientierte Modellierung für die Praxis. Bonn; u.a.: Addison-Wesley, 1999.
- Campbell 2000 Campbell, E.; u.a.: Simulation modeling for 300mm semiconductor factories.
In: Solid State Technology 43 (2000) Nr. 10.
- Chase 2000 Chase, M.; u.a.: The challenges of macro integration for fully automated 300mm fabs.
In: Solid State Technology 43 (2000) Nr. 10.
- Chrisos 1998 Chrisos, J.; Nestel-Patt, J.: Integration Risks in 300mm Wafer Fab Automation.
In: Solid State Technology 41 (1998) Nr. 7, S. 193-202.
- Coad 1994 Coad, P.; Yourdan, E.: Objekt-orientierte Analyse. New York: Prentice-Hall, 1994.
- Coad 1998 Coad, P.; Yourdan, E.: OOD Objektorientiertes Design. New York: Prentice-Hall, 1998.
- Colvin 1998 Colvin, T. D.; u.a: Soft simulation crucial for new automated fab decisions.
In: Solid State Technology 41 (1998) Nr. 6, S. 161-166.
- Colvin 1999 Colvin, T. D.; Mackulak, G. T.: Fab Design and Development Methodology Must Change to Allow for Successful Integration of All Systems.
In: Semiconductor Fabtech (1999) 10th Edition, S. 155-166.
- Colvin 1999a Colvin, T.; Hennessy, L.: Material Logistics Systems Analysis, Design, Layout and Simulation – Necessary to be I300I Factory Guideline Compliant.
In: Future Fab International (1999) Nr. 8.
- Csatary 1997 Csatary, P.; u.a.: 300mm Fab Layout and Automation Concepts.
In: Future Fab (1997) Nr. 5.
- Cselenyi 1992 Cselenyi, J.; Bodoroczky, I.: Rechnergestützte Planung von Hängebahnfördersystemen.
In: Wissenschaftliche Zeitung der Technischen Universität Magdeburg 36 (1992) Heft 4, S. 81-84.

- Dorner 1999 Dorner, J.; Schließer, J.: Reinraumtechnik richtig angewendet – Ein wesentlicher Bestandteil reiner Produktionssysteme.
In: wt Werkstattstechnik 89 (1999) Nr. 4, S. 165-168.
- Electronic 1996 Electronic Trend Publications: The World Wide IC Wafer
Fabrication Guide 2nd Edition.
San Jose: Electronic Trend Publication, 1996.
- EN ISO 1999 Norm EN ISO 14644-1 Juli 1999: Reinräume und zugehörige
Reinraumbereiche – Teil 1: Klassifizierung der Luftreinheit
(ISO 14644-1: 1999) Deutsche Fassung EN ISO 14644-1: 1999.
- Feindel 2000 Feindel, D.; Kaempf, U.: The Case for Continuous Flow Transport
of Wafer Carriers.
In: Semiconductor International (2000) Nr. 7.
- Fischer 1997 Fischer, W.; Dittrich, L.: Materialfluss und Logistik – Optimierungspotentiale im fertigungsnahen Transport- und Lagerwesen.
Berlin; u.a.: Springer, 1997.
- Fischer 2001 Fischer, W.; u.a.: Optimierungspotentiale im fertigungsnahen
Transport- und Lagerwesen.
VDI-Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluss, Logistik (Hrsg.):
VDI Wissensforum am 21.-22.06.2001 in Düsseldorf.
Düsseldorf: VDI, 2001.
- Foster 1998 Foster, B.; u.a.: Simulation of Test Wafer Consumption in a
Semiconductor Facility.
In: ISSM (Hrsg.): Proceedings of 7th International Symposium on
Semiconductor Manufacturing, Oct. 6-9, 1998 in Tokyo (JPN).
Tokyo (JPN): Ultra Clean Society, 1998, S. 298-302.
- Foster 2001 Foster, L.: 300mm Wafer Factory Automation and the Logistics
Infrastructure Challenge.
In: Future Fab International (2001) Nr. 11.
- Frauenhoffer 2002 Frauenhoffer, F.: Modell zur Prozessflussspezifikation für die
Fertigung integrierter Schaltkreise.
Heimsheim: Jost-Jetter, 2002.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 345)
Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions- und
Fertigungstechnik, Dissertation, 2002.
- Garbayo 1998 Garbayo, M.; Missale, R.: Automation for 300mm Semiconductor
Fab Operations.
In: Future Fab International (1998) Nr. 6, S. 37-44.

- Gudehus 1992 Gudehus, T.: Dimensionierung und Optimierung von Fahrzeugsystemen - Teil 1.
In: Fördern und Heben 42 (1992) Nr. 6, S. 440-443.
- Gudehus 1992a Gudehus, T.: Dimensionierung und Optimierung von Fahrzeugsystemen -Teil 2.
In: Fördern und Heben 42 (1992) Nr. 7, S. 540-543.
- Gudehus 1993 Gudehus, T.: Analytische Verfahren zur Dimensionierung von Fahrzeugsystemen.
In: OR Spektrum (1993) Nr. 15, S. 147-166.
- Gudehus 2000 Gudehus, T.: Logistik 1 – Grundlagen, Verfahren und Strategien.
Berlin; u.a.: Springer, 2000.
- Gudehus 2000a Gudehus, T.: Logistik 2 – Netzwerke, Systeme und Lieferketten.
Berlin; u.a.: Springer, 2000.
- Griessing 1997 Griessing, J.; Jarnig, H.: Cleanroom sea of lots concept.
In: European Semiconductor (1997) Nr. 9, S. 33-35.
- Großeschallau 1984 Großeschallau, W.: Materialflussrechnung.
Berlin; u.a.: Springer, 1984.
- Gupta 2003 Gupta, A.; Potti, K.: Applications of Simulation Modeling at Texas Instruments DMOS5 Wafer Fab.
In: Future Fab International (2003) Nr. 15.
- Haris 2001 Haris, C.: Integration Key for 300 mm Fab Automation.
In: Semiconductor International (2001) Nr. 6, S. 85-94.
- Haris 2001a Haris, C.: The 300mm Automation Challenge.
In: Future Fab International (2001) Nr. 11.
- Heinrich 1999 Heinrich, H.; Pyke, A.: The Impact of Conveyor Transports on Factory Performance at Infineon's (Siemens) 200 mm Fab.
In: Semiconductor Fabtech (1999) 10th Edition, S. 15-18.
- Herzog 1997 Herzog, O.: Fertigung von Mischlosen in der Mikroelektronik auf der Basis eines Verfahrens zur Verfolgung von Einzelscheiben.
Berlin; u.a.: Springer 1997.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 255)
Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik, Dissertation, 1997.
- Hilleringmann 1999 Hilleringmann, U.: Silizium-Halbleitertechnologie.
2. überarbeitete und erweiterte Auflage.
Stuttgart; Leipzig: B. G. Teubner, 1999.

- Horn 1998 Horn, G. W.; Podgorski, W. A.: Throughput, Cycle Time, Work-in-Process and Material Handling Strategies: Implications for 300 mm Factory Design.
In: Semiconductor Fabtech (1998) 8th Edition.
- Hughes 1992 Hughes, J. G.: Objektorientierte Datenbanken.
München; u.a.: Carl Hanser und Prentice-Hall International, 1992.
- Inoue 2002 Inoue, T.: Vehicle Control in the 300mm Fab of the Future.
In: Future Fab International (2002) Nr. 12.
- Inoue 2002a Inoue, T.: A Comparison of AMHS Delivery Models in the Fab of the Future.
In: Future Fab International (2002) Nr. 13.
- ITRS 2003 Semiconductor Industry Association (SIA): The International Technology Roadmap for Semiconductors – Factory Integration (Edition 2003).
San Jose CA (USA): Semiconductor Industry Association, 2003.
- ITRS 2003a Semiconductor Industry Association (SIA): The International Technology Roadmap for Semiconductors – Executive Summary (Edition 2003).
San Jose CA (USA): Semiconductor Industry Association, 2003.
- Jansen 2001 Jansen, R.: The 300mm Fab – A Major Paradigm Shift.
In: Future Fab International (2001) Nr. 11.
- Jünemann 1989 Jünemann, R.: Materialfluss und Logistik.
Berlin; u.a.: Springer, 1989.
- Junghans 1971 Junghans, W.: Planung neuer Fertigungssysteme für die Einzel- und Serienfertigung.
Aachen, Universität, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1971.
- Kästner 1980 Kästner, P.: Halbleiter-Technologie: Vom Roh-Silizium zum integrierten Schaltkreis.
Würzburg: Vogel, 1980.
- Kampe 1973 Kampe, H.; u.a.: Bedienungsmodelle.
München; u.a.: Oldenburg, 1973.
- Kaufmann 2002 Kaufmann, T.: Modell zum Sortieren und Speichern von Einzelscheiben für die Fertigung integrierter Schaltkreise.
Heimsheim: Jost-Jetter, 2002.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 371)
Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik, Dissertation, 2002.

- Kaun 1997 Kaun, R.: Verfahren zur Konzeption automatischer reinraumtauglicher Fertigungsanlagen und -zellen. Berlin; u.a.: Springer 1997.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 253)
Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik, Dissertation, 1997.
- Kling 1996 Kling, M. E.: Reticle Cleanliness and Handling Issues in Sub-Micron Wafer Fabrication.
In: Proceedings of the SPIE – The International Society for Optical Engineering 2884 (1996), S. 572-582.
- Kuttkat 1999 Kuttkat, B.: Virtual Production.
In: Maschinenmarkt 105 (1999) Nr. 51/52, S. 16-18.
- Leeuwen 1999 Leeuwen van, C.; Irwin, J.: Fab Automation: Coming of Age.
In: Semiconductor International (1999) Nr. 6.
- Lemme 1995 Lemme, H.: Displays - Invasion der Flachmänner.
In: Elektronik (1995) Nr. 6, S. 86-102.
- Martin 1998 Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Aufbau und Steuerung von Transport- und Lagersystemen.
2. überarbeitete und erweiterte Auflage.
Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg und Sohn, 1998.
- Martin 1999 Martin, D. P.: Capacity and Cycle Time – Throughput Understanding System (CACTUS).
In: IEEE; SEMI (Hrsg.): ASMC'99 Proceedings. 10th Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, September 8-10, 1999 in Boston MA (USA).
Piscataway NJ (USA): IEEE, 1999, S. 127-131.
- Meyersdorf 1998 Meyersdorf, D.; Taghizadeh, A.: Fab Layout Design Methodology: Case of the 300mm Fabs.
In: Semiconductor International (1998) Nr. 7, S. 187-196.
- Moldaschl 1986 Moldaschl, J.: Verhalten von Transportsystemen bei unterschiedlichen Fahrzeugeinsatzstrategien.
Stuttgart, Universität, Dissertation, 1986.
- Müller-Merbach 1971 Müller-Merbach, H.: Operations Research.
2. Aufl. München: Vahlen, 1971.
- Noche 1990 Noche, B.: Simulation in Produktion und Materialfluss – Entscheidungsorientierte Simulationsumgebung.
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1990.
Dortmund, Universität, Dissertation, 1989.

- OMG UML 2001 Norm OMG UML Version 1.4 September 2001:
Unified Modeling Language Specification.
- Padillo 1998 Padillo, J. M.; Meyersdorf, D.: Improving wafer fab productivity
with efficient floor layouts.
In: Solid State Technology 41 (1998) Nr. 2, S. 59-64.
- Park 2001 Park, K.: Fab Layout for 300mm Mass-Production Lines.
In: Semiconductor Fabtech (2001) 14th Edition, S. 21-24.
- Plata 1997 Plata, J. J.: 300mm Fab Design - A Total Factory Perspective.
In: Future Fab International (1997) Nr. 4, S. 21-27.
- Plata 2000 Plata, J. J.: Resource Optimisation for 300mm.
In: Semiconductor Fabtech (2000) 12th Edition, S. 109-113.
- Plata 2002 Plata, J. J.: DMOS6: The Shift from 200mm to 300mm –
Or When is a Conversion not a Conversion?
In: Future Fab International (2002) Nr. 12.
- Rode 1990 Rode, M.: Produktionslogistik – Analyse und Strukturierung
durch Simulation.
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1990.
Paderborn, Universität, Dissertation, 1990.
- Ruge 1984 Ruge, I.: Halbleiter-Technologie.
Berlin; u.a.: Springer, 1984.
- Rumbaugh 1993 Rumbaugh, J.; u.a.: Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen.
München; Wien: Hanser, 1993.
- Schließer 1998 Schließer, J.: Integrales Reinheitssystem zur Herstellung
von Halbleiterprodukten.
Berlin; u.a.: Springer, 1998.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 281)
Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions- und
Fertigungstechnik, Dissertation, 1998.
- Schmidt 1989 Schmidt, F.: Komplexe Fahrerlose Transportsysteme –
Fahrzeuganzahl, Investitionsaufwand, Wirtschaftlichkeit.
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1989.
Dortmund, Universität, Dissertation, 1989.
- Schmutz 1991 Schmutz, W.: Flexible Material Distribution System (FMDS)
für die Halbleiterfertigung.
In: Ryssel, Heiner (Hrsg.): Semiconductor Production: Fachtagung,
12. November 1991 in München.
München: GME-Fachbericht, 1991, S. 55-72.

- Schumacher 2002 Schumacher, U.: To Infineon ... And Beyond!
In: Future Fab International (2002) Nr. 13.
- SEMI 2000 Norm SEMI E102-0600 June 2000: Provisional Specification for
CIM Framework Material Transport and Storage Component.
- SEMI 2000a Norm SEMI E81-0600 June 2000: Provisional Specification for
CIM Framework Domain Architecture.
- SEMI 2002 Norm SEMI E19-0702 July 2002: Standard Mechanical Interface
(SMIF).
- SEMI 2003 Norm SEMI E103-1103 November 2003: Provisional Mechanical
Specification for a 300mm Single Wafer Box System that
Emulates a FOUP.
- SEMI 2004 Norm SEMI E5-0704 July 2004: SEMI Equipment Communications
Standard 2 Message Content (SECS-II).
- SEMI 2004a Norm SEMI E88-0704 July 2004: Specification for AMHS Storage
SEM (Stocker SEM).
- SEMI 2004b Norm SEMI E82-0704 July 2004: Specification for
Interbay/Intrabay AMHS SEM (IBSEM).
- Shen 2002 Shen, Y.: Robust Capacity Modeling in Semiconductor
Manufacturing.
In: Semiconductor International (2002) Nr. 7.
- Spath 2002 Spath, D.; u.a.: Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken –
Ein Ansatz durch Fabriktypologisierung und unterstützenden
Strukturbausteine.
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb: ZWF 97 (2002)
Nr. 1/2, S. 28-31.
- Spath 2003 Spath, D.; u.a.: Integrative production planning by means of virtual
reality techniques.
In: German Academic Society for Production Engineering 10 (2003)
Nr. 2, S. 57-60.
- Stein 1997 Stein, W.: Objektorientierte Analysemethoden – Vergleich,
Bewertung, Auswahl.
2. Auflage. Mannheim; u.a.: BI-Wissenschaftsverlag, 1997.
- Steinberger 1985 Steinberger, H.: IC-Herstellung: Vom Schaltungsentwurf zum Chip.
In: Elektronik (1985) Nr. 22, S 120-128.
- Sturm 2003 Sturm, R.; u.a.: Materialflussautomatisierung in der
Mikrochipfertigung.
In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003) Nr. 3, S. 157-163.

- Subramaniam 1998 Subramanian, K.; Kenneth, D. K.: Automation Challenges in the Next Generation Semiconductor Factory.
In: Semiconductor Fabtech (1998) 9th Edition, S. 19-26.
- TIN 2003 The Information Network: Semiconductor Factory Automation: Technology Issues and Market Forecasts.
New Tripoli PA (USA): The Information Network, 2003.
- TIN 2003a The Information Network: LCD Processing: Challenges, Directions, Markets.
New Tripoli PA (USA): The Information Network, 2003.
- TIN 2003b The Information Network: Cluster Tools in IC Processing: Technology and Marketing Forecasts.
New Tripoli PA (USA): The Information Network, 2003.
- Treiber 1999 Treiber, T.: Fertigungssteuerung, Umgebung, Herausforderung.
In: Podewils, M. (Hrsg.): CD zur Tagung zu Smart Fabrication Flexible Fab, 3. offener Workshop, 27.-28.01.1999 in Tabarz, Thüringen.
Erfurt: Thesys, 1999.
- VDI 1970 VDI-Richtlinie 2411 Juni 1970: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen.
- VDI 1971 VDI Richtlinie 2319 Juli 1971: Angetriebene Rollenbahn.
- VDI 1974 VDI-Richtlinie 2689 Januar 1974: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.
- VDI 1985 VDI-Richtlinie 3640 Oktober 1985: Selbstfahrendes Werkstückträger-Transportsystem.
- VDI 1987 VDI-Richtlinie 2345 August 1987: Hängebahnen.
- VDI 1990 VDI-Richtlinie 2860 Mai 1990: Montage und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.
- VDI 1992 VDI-Richtlinie 2510 November 1992: Fahrerlose Transportsysteme (FTS).
- VDI 1996 VDI-Richtlinie 3633 November 1996: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffsdefinitionen.
- VDI 1997 VDI-Richtlinie 3596 April 1997: Darstellungsmethoden für den Materialfluss.
- VDI 1998 VDI-Richtlinie 3978 August 1998: Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen.

- VDI 2000 VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 März 2000: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen.
- Ward 1997 Ward, C.: Automated Material Handling in Flat Panel Display (FPD) Manufacturing.
In: Future Fab International (1997) Nr. 5.
- Weiss 1997 Weiss, M.: Evaluating 300mm fab automation technology options and selection criteria.
In: Micro (1997) Nr. 6, S. 65-78.
- Weiss 1999 Weiss, M.: New Twists on 300mm Fab Design and Layout.
In: Semiconductor International (1999) Nr. 7.
- Westkämper 1977 Westkämper, E.: Automatisierung in der Einzel- und Serienfertigung – Ein Beitrag zur Planung, Entwicklung und Realisierung neuer Fertigungskonzepte.
Aachen, Universität, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1977.
- Westkämper 2002 Westkämper, E.; Winkler, R.: The use of system modelling for the intelligent planning, scheduling and control of agile manufacturing.
In: Seoul National University (Hrsg.): Manufacturing technology in the information age: Proceedings of the 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, May 13-15, 2002 in Seoul (Korea).
Seoul: BK21 School of Mechanical and Aerospace Engineering, 2002, S. 58-64.
- Westkämper 2002a Westkämper, E.; Winkler, R.: Praxisbeispiel und Nutzen der objekt-orientierten Konzeption für die Fabriksimulation.
In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002) Nr. 3, S. 52-56.
- Westkämper 2002b Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik.
5. Auflage.
Stuttgart: Teubner, 2002 (Teubner Studienbücher Technik).
- Westkämper 2003 Westkämper, E.: Fabriksimulation: Trends und aktuelle Herausforderungen.
In: Schraft, R. D.; Westkämper, E.; Sihn, W. (Hrsg.): Fabriklogistik auf dem Prüfstand: Simulation gestaltet "best in class" Logistik.
Fraunhofer IPA Seminar und Workshop F 89, 26. und 27. Juni 2003 in Stuttgart.
Stuttgart: FpF – Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2003, S. 7-30.

- Westkämper 2004 Westkämper, E.: Schneller und häufiger planen.
In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004) Nr. 3, S. 42.
- Wiechers 2003 Wiechers, O.; u.a.: Kostengünstige Produktion von Anlagen zur
Fertigung von Mikrosystemen – Herstellerübergreifender
Simulationsbaukasten für die Mikrotechnik (Teil 1).
In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003) Nr. 3.
- Wiendahl 2003 Wiendahl, H. P.; Nyhuis, P.: Logistische Kennlinien – Grundlagen,
Werkzeuge und Anwendungen.
2. erweiterte und neubearbeitete Auflage.
Berlin; u.a.: Springer, 2003.
- Woolverton 1999 Woolverton, A.; u.a.: Fast Cycle Time in High-Mix Technology
Development and Manufacturing.
In: IEEE; SEMI (Hrsg.): ASMC'99 Proceedings. 10th Annual
IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference,
September 8-10, 1999 in Boston MA (USA).
Piscataway NJ (USA): IEEE, 1999, S. 57-60.
- Wright 1999 Wright, R.; u.a.: 300mm factory layout and automated
material handling
In: Solid State Technology (1999) Nr. 12, S. 35-42.
- Wright 2000 Wright, M.: Theme of the Decade – Predictability.
In: Semiconductor Magazine (2000) Nr. 6.
- Zant 2000 Zant van, P.: Microchip Fabrication: A Practical Guide to
Semiconductor Processing.
4th Edition.
Columbus OH (USA): McGraw-Hill, 2000.
- Zoughby 2000 Zoughby, J.: Improving Planning Decisions Through AutoSimula-
tions AutoSched AP, Regression Analysis and Linear Optimization.
In: Future Fab International (2000) Nr. 9.