

Karsten Schlüter

*Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik*

Karsten Schlüter

*Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz der
Simulationstechnik*

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Carl Hanser Verlag München Wien

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Universität Erlangen–Nürnberg

Tag der Einreichung:	20. Juli 1988
Tag der Promotion:	4. November 1988
Dekan:	Prof. Dr.rer.nat F. Hofmann
Berichterstatter:	Prof. Dr.–Ing. K. Feldmann Prof. Dr.–Ing. H.–P. Wiendahl

CIP–Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Schlüter, Karsten:

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik / Karsten Schlüter. – München

; Wien : Hanser, 1989

(Fertigungstechnik – Erlangen)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1988

ISBN 3–446–15542–2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilme oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich genannten Sonderfällen –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1989

Herstellung: Druckerei Bresler, Erlangen

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen – Nürnberg angefertigt.

Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. H.-P. Wiendahl, dem Leiter des Instituts für Fabrikanlagen der Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferates, seine fachlichen Anregungen sowie die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen, Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Dies gilt insbesondere für Herrn Dipl.-Inf. H.M. Biehler, Herrn Dipl.-Inf. W. Pfülb, Herrn Dipl.-Inf. P. Diezel und Herrn Dipl.-Inf. H. Höhleln.

Einen besonderen Dank möchte ich Frau L. Wahl, Frau A. Wiesner und Herrn R. Rimane sagen, die bei der Bild- und Textgestaltung mitgewirkt haben.

Karsten Schlüter

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung mit Problemstellung und Zielen	1
2	Grundlagen der Nutzungsgradbestimmung und Simulation	6
2.1	Verfügbarkeit und Nutzungsgrad	6
2.1.1	Definition der relevanten Kenngrößen	6
2.1.2	Vorgehensweise zur Ermittlung der Kenngrößen	12
2.1.3	Vorstellung von Untersuchungsergebnissen	17
2.2	Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen . .	23
2.2.1	Personelle und organisatorische Maßnahmen	23
2.2.2	Strukturelle und technische Maßnahmen	26
2.2.3	Verringerung äußerer Einflußfaktoren	29
2.2.4	Störungsreduktion und Störungskompensation	30
2.3	Effizienzanalyse der Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung . . .	32
2.3.1	Realisierung der Maßnahmen am bestehenden System . . .	32
2.3.2	Effizienzanalyse am Modell	34
2.3.3	Berechnungsverfahren nach Janisch	39
2.4	Simulation als Planungsinstrument	45
2.4.1	Einsatzgebiete in der Produktion	47
2.4.2	Klassifizierung von Simulatoren	48
2.4.3	Exemplarische Simulationen im Produktionsbereich	52

3	Simulation in der Montagetechnik	57
3.1	Einsatz der Simulation im Lebenszyklus von Montagelinien	57
3.1.1	Rechnergestützte Montageplanung	57
3.1.2	Betrieb von Montageanlagen	60
3.1.3	Abstraktion und Detaillierung im Lebenszyklus	61
3.2	Spezifische Anforderungen der Montage an die Simulation	62
3.2.1	Typische Montagesystemstrukturen	63
3.2.2	Besonderheiten der Montagesystemsteuerung	65
3.2.3	Bestückung elektronischer Bauelemente als Teilgebiet der Montagetechnik	66
3.3	Vorgehensweise bei Simulationsstudien	68
3.3.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung	68
3.3.2	Systemanalyse und Modellbildung	70
3.3.3	Simulationsdurchführung	74
3.4	Zusammenwirken von Planern und Simulationsexperten	76
3.4.1	Datenerhebung und -verdichtung	77
3.4.2	Interpretation der Simulationsergebnisse	77
3.4.3	Akzeptanz der Ergebnisse von Simulationsstudien	78
4	Planungsbegleitende Simulationsstudie für ein flexibles Montage- system mit GPSS-FORTRAN Version III.	81
4.1	Das Simulationspaket GPSS-FORTRAN Version III	81
4.1.1	Aufbau des Simulators	81
4.1.2	Grundelemente des diskreten Programmteils	82
4.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	84

4.2.1	Vorstellung der geplanten Montagelinie	84
4.2.2	Problembereiche im Planungsstadium	85
4.2.3	Ziele der Simulationsstudie	87
4.3	Simulation des flexiblen Montagesystems	88
4.3.1	Modellierung der Anlage	88
4.3.2	Implementierung des Simulationsprogramms	95
4.3.3	Planung und Durchführung der Experimente	97
4.3.4	Ergebnispräsentation und Interpretation	99
4.4	Erfahrungen und Konsequenzen aus der Studie	105
5	Simulationssystem SIMU für die Montageplanung	107
5.1	Beschreibung des Simulators SIMU	107
5.1.1	Intention und Konzept	107
5.1.2	Aufbau des Simulationsprogramms	109
5.1.3	Eingabedaten für die Simulation	111
5.1.4	Programmmodul zur Selbstdimensionierung der Puffer	112
5.1.5	Ergebnisse aus Simulationen mit SIMU	114
5.2	Validierung des Programmsystems	115
5.2.1	Reihenanzordnung von Montagestationen	115
5.2.2	Kombinierte Reihen- und Parallelstruktur	118
5.2.3	Animation zur Validierung von Modellen	119
5.3	Demonstration von SIMU an einem Montagesystem	120
5.3.1	Vorstellung der Montageanlage	121
5.3.2	Automatische Dimensionierung der Puffer im System	122

5.3.3	Simulation und Animation des Montagebeispiels	123
5.3.4	Präsentation und Interpretation der Ergebnisse	126
5.4	Vergleich der Montagesimulation von SIMU und GPSS- FORTRAN- Modellen	130
5.4.1	Datenbereitstellung und Modellbildung	130
5.4.2	Durchführung der Simulation und Ergebnisdarstellung . . .	131
5.4.3	Abschätzung von Aufwand und Nutzen	131
6	Nutzungsgradoptimierung verketteter Bestückungsautomaten	134
6.1	Problemfelder in der SMD-Bestückung	134
6.1.1	Technische Randbedingungen in der SMT	134
6.1.2	Aufbau und Arbeitsprinzipien von Bestückungsautomaten .	136
6.1.3	Störungsschwerpunkte bei der Bestückung	136
6.1.4	Ansätze zur Nutzungsgradsteigerung	139
6.2	Konzeption des Simulators	140
6.2.1	Anforderungen an die Simulation	140
6.2.2	Struktur des Simulationssystems	142
6.2.3	Modellierung und Dateneingabe	143
6.2.4	Ablauf der Simulation	146
6.3	Vorstellung des Simulators SASB an Beispielen	148
6.3.1	Planung einer SMD-Bestückungslinie	148
6.3.2	Gegenüberstellung zweier Alternativen	149
6.3.3	SASB als Basis für Investitionsentscheidungen	151
6.3.4	Simulation während der Betriebsphase	153

6.4	Tendenzen der Nutzungsgradsteigerung in der Bestückungstechnik	157
6.4.1	Konzept für ein Maschinen-Daten-Management-System . .	158
6.4.2	Integration der Simulation	162
6.4.3	Aspekte der Wirtschaftlichkeit	163
7	Zusammenfassung	165
8	Literatur	167

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik

1 Einführung mit Problemstellung und Zielen

Der in den vergangenen Jahren spürbar angestiegene Konkurrenzdruck beim Absatz von Massenprodukten durch Wettbewerber nicht nur aus Billiglohnländern zwingt die westlichen Industrienationen zur Entwicklung von weltmarktorientierten Produktspektren und zur Einführung kostengünstiger Produktionsstrukturen. Gerade das für die Bundesrepublik Deutschland charakteristische Wirtschaftswachstum basiert nicht zuletzt auf einer kontinuierlich steigenden Produktivität, an der neben der Produktinnovation gleichgewichtig die Prozeßinnovation beteiligt ist. Hierzu ist die Automatisierung der Fertigung, Montage und Prüfung ebenso zu rechnen, wie die nicht zur Wertschöpfung im engeren Sinne gehörenden Prozesse der Handhabung und des Transports [8].

Während in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Rationalisierungsbemühungen primär in der Teilefertigung angesiedelt waren, kommt gerade in jüngster Zeit der Montageautomatisierung eine zunehmende Bedeutung zu. Da gegenwärtig die Montage weitgehend manuell durchgeführt wird, machen die Personalkosten einen sehr hohen Anteil an den Herstellkosten aus. Insbesondere Montagetätigkeiten erfordern bei der Automatisierung jedoch einen hohen technischen und finanziellen Aufwand. Um trotzdem eine ausreichende Wirtschaftlichkeit garantieren zu können, müssen diese kapitalintensiven Produktionsmittel mit einer hohen Auslastung über einen langen Zeitraum genutzt werden [85].

Im Bereich der Elektrotechnik mit 286.000 Mitarbeitern ist die Zahl der in der Montage tätigen Personen besonders hoch [2]. Mit zwei Dritteln un- bzw. angelernter Beschäftigten rangiert diese Branche am unteren Ende des Qualifikationsprofils. Zum Vergleich beträgt der Anteil im Maschinenbau 28 % und in der Feinwerktechnik 35 %. Die Verteilung der vorkommenden Taktzeiten verdeutlicht die Situation in der Elektroindustrie. Mit 37 % ist der Anteil kurzzyklischer Tätigkeiten bis 30 s besonders hoch, was für die Betroffenen eine hohe Belastung darstellt.

Vor allem in kleineren und mittleren Elektrounternehmen werden die Produkte häufig rein manuell oder nur wenig automatisiert montiert. Lediglich in Spezialgebieten, wie z.B. der Leiterplattenbestückung, kommen konventionell automatisierte Sonderanlagen zum Einsatz. Programmierbare vollautomatisch arbeitende Montagesysteme kommen nur selten und in der Regel nur bei Großunternehmen vor [1].

Insbesondere für die Montage von Elektroprodukten geringer und mittlerer Komplexität in Jahresstückzahlen von 50.000 bis 1 Million werden die Automatisierungsinvestitionen steigen. Hier gilt es, nicht nur Entwicklungen bezüglich der Technologie, sondern auch der Strukturplanung und Nutzungsgradgarantie zu forcieren.

Bei der Realisierung wirtschaftlich arbeitender Montagesysteme müssen Planer und Fertigungspersonal eine Reihe von Anforderungen und Einflussfaktoren berücksichtigen (s. Bild 1).

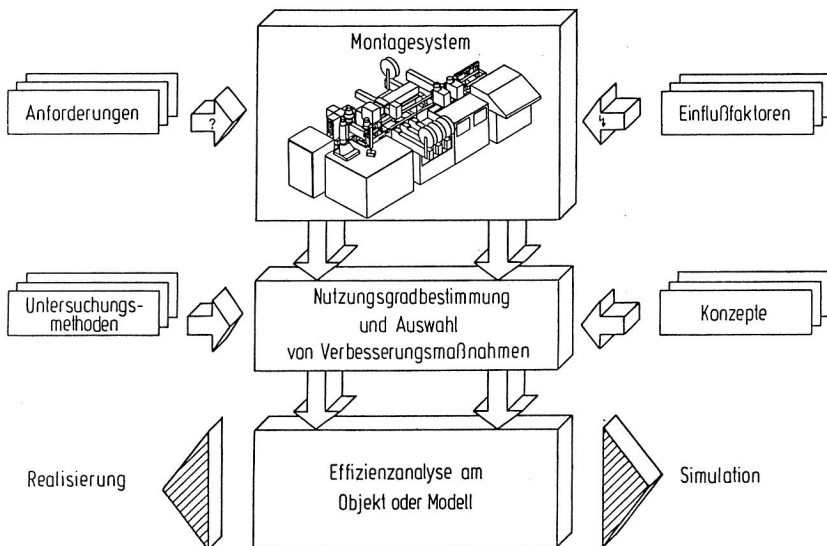
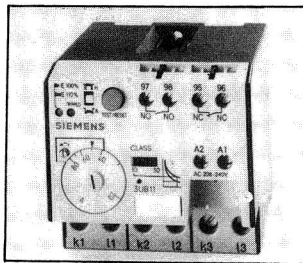
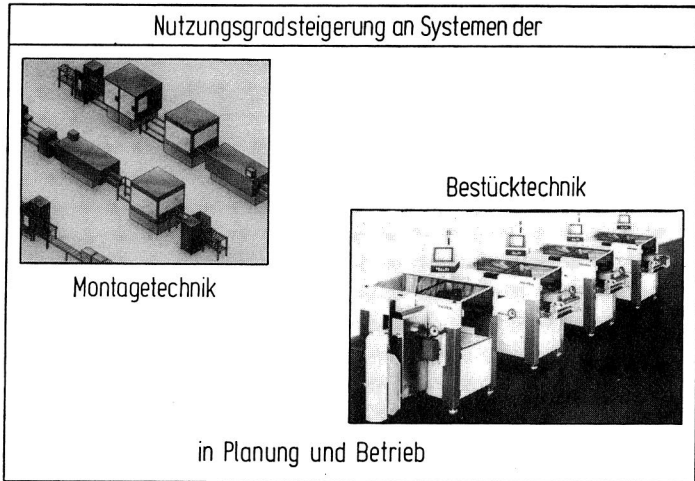


Abbildung 1: Effizienzanalyse nutzungsgradsteigernder Maßnahmen an Montagesystemen

Zur Bestimmung des Nutzungsgrades von bestehenden und projektierten Montagesystemen sind Untersuchungsmethoden zu entwickeln bzw. bereits vorhandene auf ihre Verwendbarkeit in der Elektrogerätemontage zu analysieren. Hier wer-

den zukünftig Diagnosesysteme, wie sie in der Verfahrenstechnik bereits Stand der Technik sind und in der zerspanenden Fertigung zunehmend an Bedeutung gewinnen, eine Ergänzung zu den heute üblichen Vorgehensweisen darstellen.



Elektromechanische Geräte

Flachbaugruppen

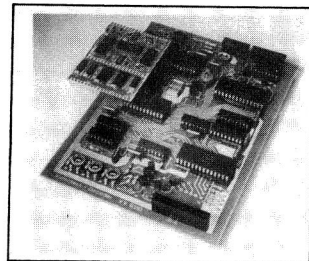


Abbildung 2: Feld der betrachteten Systeme

Dem Planungs- und Betriebsingenieur müssen Konzepte zur Einleitung von Verbesserungsmaßnahmen angeboten werden, aus denen er sich den für sein individuelles Problem günstigsten Weg auswählen kann. Die Überprüfung, ob die getroffene Entscheidung den gewünschten Erfolg, d.h. letztlich eine Steigerung des Nutzungsgrades einer Anlage hat, muß er anschließend anhand einer Effizienz-

analyse durchführen. Diese setzt entweder am Objekt direkt oder an einem das Realsystem abbildenden Modell an. Soll oder kann die Verbesserungsmaßnahme nicht an der Anlage installiert und erprobt werden, so ist die rechnerunterstützte Simulation eine alternative Vorgehensweise.

Im folgenden wird für die in Bild 2 vorgestellten Montagesysteme die Anwendung der Simulationstechnik zur Steigerung des Nutzungsgrades vorgestellt.

Aufbauend auf Untersuchungsergebnissen aus diesem Bereich werden die besonderen Problemfelder der Anlagen zur Montage von Elektrokleingeräten und zur Bestückung von elektronischen Bauelementen analysiert. Anschließend werden die spezifischen Anforderungen, die an die Simulationstechnik zur Effizienzabschätzung von Verbesserungsmaßnahmen gestellt werden, abgeleitet. Insbesondere wird hier auch auf die Erwartungen der diese Aufgaben bearbeitenden Mitarbeiter eingegangen. Die Akzeptanz von Simulationsergebnissen hängt ganz wesentlich von dem transparenten Aufbau dieses rechnerunterstützten Instruments ab.

Anhand einer Simulationstudie mit GPSS-FORTRAN, die begleitend zur Projektierung einer Schaltgeräte-Montagelinie durchgeführt wurde, sollen die Vorgehensweise verdeutlicht und die Möglichkeiten und Grenzen der Simulationstechnik aufgezeigt werden. Es werden neben der Präsentation und Interpretation der Ergebnisse vor allem auch die Erfahrungen vorgestellt, die bei einer sehr detaillierten Simulation eines hochkomplexen Systems gemacht wurden. Hierauf gründet sich die Entwicklung des bedienerfreundlichen menuegesteuerten Simulators SIMU, dessen Leistungsfähigkeit anhand eines Beispiels präsentiert wird. Mit Hilfe einer Aufwand-Nutzen-Abschätzung wird ein Vergleich mit GPSS-FORTRAN durchgeführt.

Die Bestückung elektronischer Bauelemente als Teilgebiet der Montagetechnik stellt individuelle Anforderungen an die Simulation. Gerade am Beispiel der in den vergangenen fünf Jahren stark an Bedeutung gewonnenen Oberflächentechnik (SMT) läßt sich das beobachten.

Zur Nutzungsgradbestimmung und -verbesserung von SMD-Bestückungslinien wurde ein systemspezifisches Simulationsprogramm (SASB) konzipiert, das sowohl in der Projektierung, als auch bei der Betriebsführung eingesetzt werden kann. Hiermit liegt eine Alternative zu SIMU vor, um vor allem die Abbildung von Systemen mit kleinen Losgrößen und vielen unterschiedlichen Bauelementen komfortabel zu realisieren. Ein Beispiel zeigt die Einsatzmöglichkeiten von SASB und grenzt den Simulator gegenüber anderen ab.

Abschließend werden Entwicklungstendenzen der Simulationstechnik in der Montage aufgezeigt. Hier wird in erster Linie auf die Integration dieses Instruments in die rechnergestützte Montageplanung hingewiesen. Eine Verbindung zu CAD-Systemen und die Kommunikation mit Datenbanken wird entscheidend zur Komfort- und Leistungssteigerung der Simulationstechnik beitragen.

2 Grundlagen der Nutzungsgradbestimmung und Simulation

2.1 Verfügbarkeit und Nutzungsgrad

Die betriebliche Praxis zeigt, daß beim Dialog zwischen Konstrukteur, Planer und Betreiber von Anlagen immer wieder Mißverständnisse entstehen, wenn Begriffe wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Nutzungsgrad verwendet werden. Die Ursache hierfür liegt zumeist in der mangelnden Kenntnis der Definitionen dieser Kenngrößen. Die Konsequenzen dieses zunächst als unbedeutend beurteilten Problemfeldes können jedoch sehr weitreichend sein. Bereits bei der Anfertigung von Pflichtenheften ist es deshalb unabdingbar, daß Kunde und Anbieter zu einer einheitlichen Definition finden.

Diese Problematik gewinnt noch mehr an Wert, will man das zu erwartende Betriebsverhalten mit Hilfe der Simulationstechnik ermitteln. Da diese Parameter in Simulationsstudien eine zentrale Bedeutung haben, müssen sie zwischen Planer und Simulationsfachmann eindeutig festgelegt werden. Die Vielfalt der in der Literatur bekannten Definitionen, insbesondere der Verfügbarkeit [21, 61, 73, 74, 102, 117], trägt allerdings nur wenig dazu bei, eine allgemeinverständliche und in der Fachwelt anerkannte Sprachregelung zu finden. Diese Situation wird noch durch zahlreiche firmenspezifische Richtlinien verkompliziert.

2.1.1 Definition der relevanten Kenngrößen

Die dieser Arbeit zugrundegelegten Definitionen und ihre funktionalen Zusammenhänge werden im folgenden vorgestellt.

Zuverlässigkeit

Gerade weil der Begriff der Zuverlässigkeit im täglichen Sprachgebrauch immer wieder benutzt wird, bedarf er einer eindeutigen Definition, will man ihn als technische Kenngröße verwenden. Die DIN 55 350 [65] lehnt sich in ihrer Formulierung stark an das Qualitätswesen an:

”Zuverlässigkeit: Qualität unter vorgegebenen Anwendungsbedingungen für eine vorgegebene Zeit.”

Diese sehr allgemeingehaltene Beschreibung beinhaltet zwar bereits den Zeitfak-

tor, läßt jedoch noch nicht erkennen, daß es sich bei der Zuverlässigkeit $R(A)$ um eine Wahrscheinlichkeit handelt, die als Komplementärfunktion zur Ausfallwahrscheinlichkeit $F(A)$ abgeleitet werden kann.

$$R(A) = 1 - F(A) \quad (1)$$

Dieser Ansatz kommt nach der Definition von Tribus [101], wie sie vor allem auch in der Luft- und Raumfahrttechnik in den USA angewendet wird, zum Tragen:

”Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Einheit während einer definierten Zeitdauer unter angegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.”

Der Zusammenhang zwischen Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit wird in Bild 3 verdeutlicht.

Unabhängig davon, ob ein linearer, degressiver oder progressiver Zeitverlauf vorliegt, gilt für sämtliche Baugruppen $R(t=0) = 100\%$. Für die Bestimmung des Ausfallzeitpunktes von Elementen lassen sich aus empirischen Untersuchungen immer nur Wahrscheinlichkeitsaussagen angeben. Hieraus folgt, daß eine Zuverlässigkeitsangabe nur im Zusammenhang mit der Zeit aussagekräftig ist. Die Zuverlässigkeiten der Baugruppen A und B zum Zeitpunkt t_1 in Bild 3 sind stark unterschiedlich aufgrund der verschiedenen Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Es gibt jedoch keine Garantie dafür, daß die Baugruppe B nicht doch einmal eher ausfällt als A.

Verfügbarkeit

Im Hinblick auf Simulationsstudien hat der Verfügbarkeitsbegriff einen hohen Stellenwert. Sowohl als Eingangsgröße zur Charakterisierung des Stör- und Laufzeitverhaltens von Baugruppen, Vorrichtungen und Stationen als auch als Ergebnis zur Abschätzung der ausgebrachten Stückzahlen spielt die Verfügbarkeit eine große Rolle. Ähnlich wie bei der Zuverlässigkeit gibt es auch hier eine Reihe von Definitionen und verschiedene Spezifikationen der Verfügbarkeit.

Mexis [61] unterscheidet z.B. die theoretische, auslastungsbezogene, effektive, technische, qualitative und organisatorische Verfügbarkeit und wendet diese Begriffe bei der Analyse von verfahrenstechnischen Anlagen der Konsumgüterindustrie an [60]. Er weicht hier in seiner Beschreibung von der üblichen Vorgehensweise insbesondere durch die Einbeziehung organisatorischer Einflußfaktoren ab.

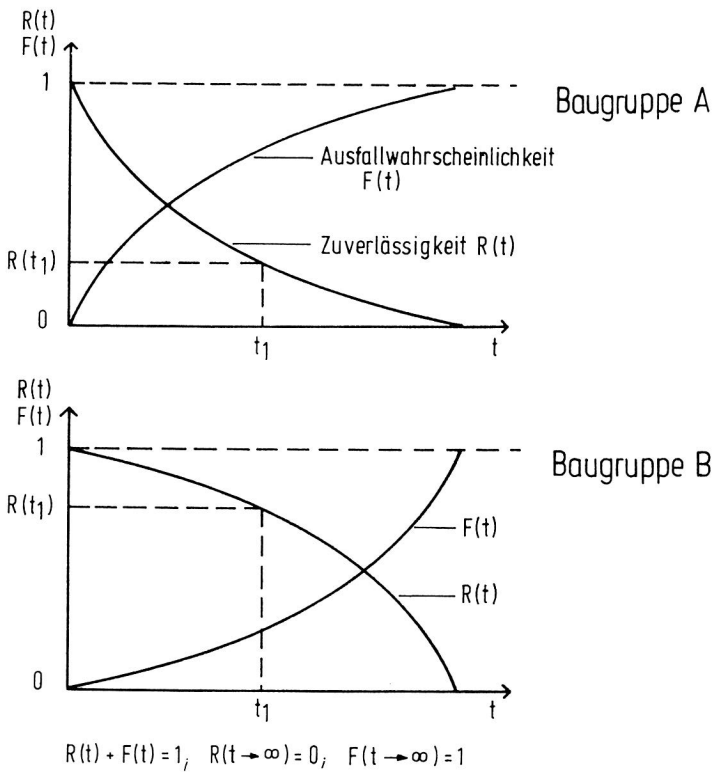


Abbildung 3: Verlauf der Zuverlässigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten an zwei unterschiedlichen Baugruppen

Einen anderen Ansatz wählt Ziersch [118] mit der Berechnung einer personalfreien Verfügbarkeit. Diese Kenngröße läßt wichtige Rückschlüsse auf die Personalbindung einer Anlage zu und wurde in zahlreichen Untersuchungen feinwerktechnischer Montagesysteme ermittelt.

Eine weitverbreitete Definition und Gliederung der Verfügbarkeit geht auf Dreger [21] zurück. Die von ihm beschriebene **Erstverfügbarkeit** (EV) kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem eine Anlage erstmalig in der Lage ist, die für ihren geplanten Einsatz vorgesehenen Anforderungen zu erfüllen. Die **Bereitschaftsverfügbarkeit** (BV) kennzeichnet die Fähigkeit eines nicht dauernd genutzten Systems, während seiner Lebensdauer unvorhersehbar zu jedem gewählten Zeitpunkt betriebsbereit zu sein. Als **zeitbezogene Verfügbarkeit** (ZV) charakterisiert Dreger einen Wert, der den Anteil eines Einsatzintervalls angibt, während dem eine Betrachtungseinheit betriebsbereit ist. Bei dieser stationären Betrachtung

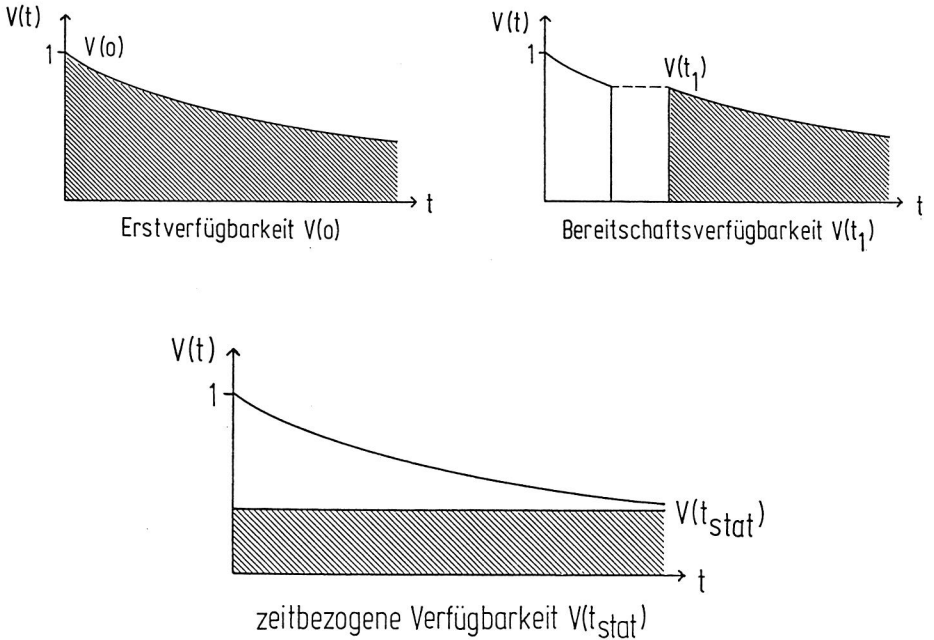
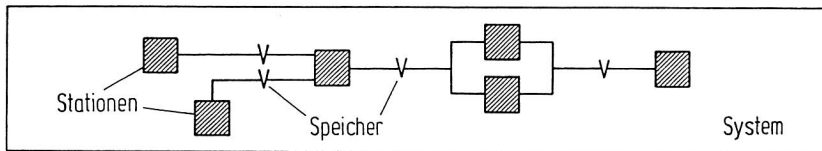


Abbildung 4: Funktionale Abhängigkeit unterschiedlicher Verfügbarkeiten von der Zeit

tungsweise wird aus Erfahrungswerten, wie sich vergleichbare Systeme oder die betrachtete Anlage in früheren repräsentativen Nutzungsperioden verhalten haben, auf die Zukunft mit einer Wahrscheinlichkeitsannahme extrapoliert.

Nach Matull [59] lassen sich diese drei Größen grafisch wie in Bild 4 darstellen.

Für die in dieser Arbeit behandelte Simulation von Montagesystemen hat vor allem die zeitbezogene Verfügbarkeit ZV der in den Simulationsmodellen vorhandenen Elemente (Arbeitsstationen, Vorrichtungen usw.) eine große Bedeutung. Da in erster Linie das Betriebsverhalten von Anlagen während eines großen Zeitraumes zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung zugrundegelegt werden muß, wird zu diesem Zweck von einem stationären Zustandswert auszugehen sein.



System - Betriebszeit T_{Syst}			
Stations - Betriebszeit T_{Stat}		Organisatorische Stillstände T_{Org}	
Störzeit TTS	Gutlaufzeit TBS	Geplante T_{Det} Unterbrechungszeit	Ungeplante T_{Stoch}
technische Fehler, bedingt durch <ul style="list-style-type: none"> • Material • Mensch • Maschine 	Produktion von - systemspezifisch betrachtet - Gutteilen	Instandhaltung Wartung Verteilzeit	Blockierung Mangel an <ul style="list-style-type: none"> • Material • Personal • Information

Abbildung 5: Kenngrößen zur Berechnung von Verfügbarkeit und Nutzungsgrad

Begriffsbestimmung:

Die stationsorientierte Verfügbarkeit ist der wahrscheinliche relative Anteil der Stations-Betriebszeit, in dem eine reparierbare Komponente ihre vorgegebenen Funktionsanforderungen erfüllt.

Aus dieser Definition und den in Bild 5 dargestellten Kenngrößen errechnet sich die Verfügbarkeit wie folgt:

$$V_{Stat} = \frac{\sum TBS}{T_{Stat}} \quad (2)$$

V_{Stat} Stationsorientierte Verfügbarkeit

TBS Time Between Serve, d.h. die Zeiträume, in denen Gutteile gefertigt werden, ohne daß ein Eingriff des Bedienpersonals vorgenommen wird oder ein Stillstand infolge Störung auftritt.

T_{Stat} Stations-Betriebszeit, d.h. der Zeitraum, in dem die betrachtete Station arbeiten könnte.

Formel (1) und Bild 5 unterstreichen noch einmal die Bedeutung der stationsorientierten Verfügbarkeit als rein technische Kenngröße ohne Einflüsse aus dem organisatorischen Bereich.

Nutzungsgrad

Die dritte wichtige Kenngröße zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens komplexer Systeme ist der Nutzungsgrad. Aus ihm läßt sich eine Aussage über einen wirtschaftlichen Einsatz einer Anlage in einem festgelegten Zeitabschnitt ableiten [73]. Bei Habenicht [41] wird der Begriff Nutzungsgrad sogar direkt gleichgesetzt mit der Anlagenleistung.

Der wesentliche Unterschied zur Verfügbarkeit liegt hier in der Berücksichtigung organisatorisch bedingter Stillstandszeiten. Geplante und ungeplante Stillstände, wie z.B. Instandhaltungsmaßnahmen, Blockier- und Wartezeiten werden bei der stationsorientierten Verfügbarkeit nicht mit in die Berechnung einbezogen.

Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wird der Nutzungsgrad nach Formel (3) definiert:

$$N = \frac{\sum TBS}{T_{Syst}} \quad (3)$$

N Nutzungsgrad

TBS Time Between Serve

T_{Syst} System-Betriebszeit, d.h. der Zeitraum, in dem das Gesamtsystem arbeiten könnte (vgl. Bild 5).

Die vorgestellte Definition zeigt, daß der Nutzungsgrad in erster Linie eine Größe zur Beurteilung des Gesamtsystems ist. Er läßt sich jedoch ebenso wie die Verfügbarkeit auf eine einzelne Station beziehen, nur mit dem Unterschied, daß deterministische und stochastische Unterbrechungen aufgrund organisationsspezifischer Ursachen berücksichtigt werden.

Mit Hilfe des Nutzungsgrades lassen sich somit folgende Fragenkomplexe beurteilen:

- Wie groß ist der Einfluß der Ausfälle von Teilsystemen auf die Gesamtanlage?

- Wie wirkt sich die Art der Verkettung benachbarter Stationen aufeinander aus?
- Wie effektiv ist die Organisation des gesamten Produktionsablaufs?

Der Maximalwert von N wird für den Fall $T_{Org} = 0$ identisch mit V_{Stat} .

2.1.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Kenngrößen

Die Planung von Montagesystemen mit hohen Nutzungsgraden bzw. die Verbesserung des Einsatzverhaltens bestehender Anlagen setzt eine genaue Kenntnis der zuvor beschriebenen Kenngrößen voraus. Hierbei ist es nicht allein ausreichend, die stationsorientierten Verfügbarkeiten zu analysieren, sondern es bedarf genauerer Aussagen über die Stör- und Laufzeiten der Maschinen.

Zur Gewinnung entsprechender Daten werden nicht selten manuelle Aufschreibungen durch das Bedien- und Instandhaltungspersonal vorgenommen. Das kann jedoch zu Ungenauigkeiten führen, da kurzzeitige Störungen häufig nicht berücksichtigt werden oder aufgrund des Zeitdrucks im Fehlerfall die Beschäftigten nicht in der Lage sind, ausführliche Protokolle zu erstellen [96]. Selbst das Ausfüllen vorbereiteter Formblätter ist z.T. zu zeitintensiv und auch die sich anschließende manuelle Auswertung und Aufbereitung der Ergebnisse wird nur in Ausnahmefällen realisiert.

Durch die zunehmende Integration speicherprogrammierbarer Steuerungen und Rechner in der Montagetechnik wird auch hier - ähnlich wie bei der Teilefertigung in den vergangenen Jahren - zukünftig mit dem Einsatz automatisierter Überwachungs- und Diagnosesysteme zu rechnen sein. Dadurch besteht die Möglichkeit, über lange Zeiträume repräsentative Daten zu bekommen.

Die für Fertigungseinrichtungen angewendeten Methoden einer automatisierten Überwachung lassen sich wie bei Eißler [22] in die in Bild 6 dargestellten vier Bereiche gliedern.

In der Literatur [11] werden auf dem Gebiet der Prozeßüberwachung an Produktionsmaschinen Verfahren beschrieben, bei denen durch den Einbau zusätzlicher Sensoren charakteristische Kenngrößen typischer Störungen erkannt und in einer angepaßten Logik ausgewertet werden können. Bei [62] werden in der automatischen Prozeßüberwachung das Inprozeßmessen und das Postprozeßmessen für die Werkzeugkontrolle genannt.

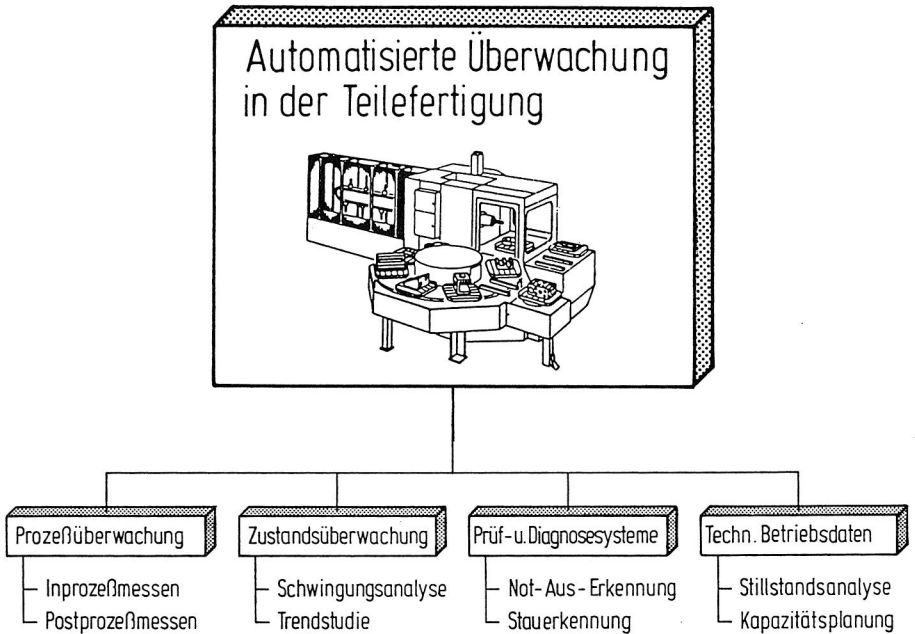


Abbildung 6: Automatisierte Überwachungsverfahren an Fertigungseinrichtungen

Diese Verfahren tragen vor allem zur Verbesserung der Werkstückqualität und der Verringerung des Ausschusses und damit indirekt zur Steigerung der Nutzung der Fertigungsmittel bei. Jedoch lassen sich mit diesen Strategien keine Kenngrößen für Simulationsstudien ableiten. Der zweite Bereich erstreckt sich auf die Zustandsüberwachung durch die Aufnahme des Schwingungsverhaltens von Maschinen und Baugruppen. Hier lassen sich durch Trendstudien vorzeitig Fehler erkennen und dadurch rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten. Als Verfahren zur Beschaffung von Daten bezüglich des Einsatzverhaltens von Fertigungssystemen ist auch die Zustandsüberwachung nicht geeignet.

Vielversprechender sind Prüf- und Diagnosesysteme an Werkzeugmaschinen. Gegenwärtig werden noch modellgestützte Diagnosesysteme zur flexiblen Überwachung der Fertigung insbesondere unter dem Aspekt der Schadensfrüherkennung konzipiert [86]. Zukünftig sollen durch eine zunehmende rechnerintegrierte Fertigungsorganisation Störungs- und Verfügbarkeitsdaten abgeleitet werden. Eine

weitere Möglichkeit der automatischen Überwachung liegt in der Verwendung der ohnehin vorhandenen speicherprogrammierbaren Steuerungen zur Aufnahme ausgewählter Signale, wie z.B. Not-Aus, Zyklus- Zeitstörung, Maschinenfehler, Produktfehler, Stückzahlmeldungen und Stauerkennung. Jedoch lassen sich die ermittelten Daten nur eingeschränkt auswerten, da umfangreiche Rechenoperationen gar nicht oder nur sehr stark vereinfacht möglich sind [23]. Andere Verfahren [53, 97] verwenden einen getrennt arbeitenden Mikrocomputer, der die Meldungen von den Maschinensteuerungen empfängt und anschließend auswertet.

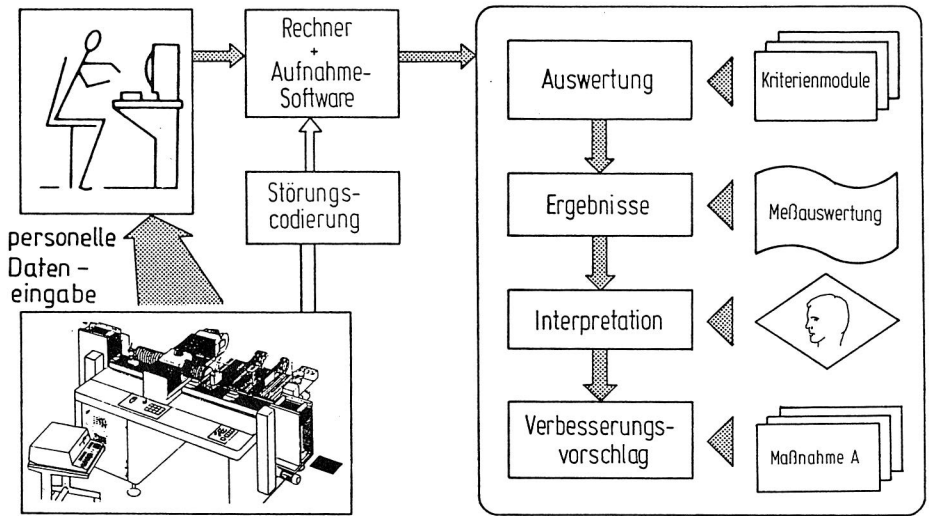
Als letztes Gebiet wird die Erfassung technischer Betriebsdaten genannt. Die Betriebsdatenerfassung (BDE) wird als integraler Bestandteil übergeordneter Produktions-Planungssysteme (PPS) vornehmlich eingesetzt, um die Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Kapazitätsauslastung und Halbfabrikatebestände mit den Vorgaben der Fertigungssteuerung zu vergleichen [12, 40, 4]. Hierbei ist es erforderlich, aus der großen Anzahl von Informationen aus dem Produktionsprozeß die wesentlichen herauszufiltern und einer weiteren Verdichtung zuzuführen. Die Erfassung der Daten erfolgt zum einen automatisch über die Anlagensteuerung und zum anderen manuell über besondere BDE-Terminals.

Bei Verwendung der heute am Markt verfügbaren "intelligenten" Terminals lassen sich ohne Verbindung zum BDE-Leitrechner direkt an der Maschine Stillstandsanalysen durchführen [106]. Die Betriebsdatenerfassung erweist sich somit als wichtige Quelle von Informationen für die Durchführung von Simulationsstudien.

Eine effektive und repräsentative Ermittlung der Kennzahlen über das Einsatzverhalten von Fertigungssystemen setzt eine gezielte Auswahl der Überwachungsmethoden voraus [26].

Für die Untersuchung von Montageanlagen [116, 45, 41, 34, 46] und Bestückungssystemen in der Elektronikproduktion [79, 108] werden personelle Erfassungsmethoden mit Rechnerunterstützung eingesetzt. In Bild 7 wird die prinzipielle Vorgehensweise dieser Analysen am Beispiel eines SMD-Bestückungsautomaten gezeigt.

Neben der Maschine wird ein Personal-Computer plaziert, auf dem die Einsatzanalysesoftware installiert ist. Vor der Aufnahme phase werden im Programm alle in Betracht kommenden Ereignisorte, wie z.B. Bestückwerkzeuge, Zuführsysteme für Bauelemente, Leiterplattentransport usw. definiert. Nicht vorhergesehene Situationen können auch noch während der Untersuchung nachträglich benannt werden.



Beispiel : SMD - Bestücksystem

Abbildung 7: Vorgehensweise zur Erfassung des Betriebsverhaltens von automatisierten Montagesystemen

Die Analysephase setzt sich im Regelfall aus einigen mehrstündigen Zeitintervallen zusammen, um ein repräsentatives Ergebnis zu ermitteln. Die Aufnahme wird von zwei Personen durchgeführt. Ein Beobachter verfolgt die Funktionen der Maschine und stellt so ohne Verzögerung jede Abweichung des Soll-Zustandes, wie z.B. Störungen des Automaten, fest.

Die Ereignisse, die beispielsweise auf mangelhafte Bauelemente zurückgeführt werden können, werden der zweiten Aufnahmeperson mitgeteilt, die unmittelbar danach über zuvor verabredete Codierungen die Eingabe der Datensätze am Rechner vornimmt. Durch diese Vorgehensweise wird gewährleistet, daß auch bei kurz aufeinanderfolgenden Störungen keine Informationen verlorengehen.

Nach erfolgter Aufnahme wird eine an unterschiedlichen Zielkriterien orientierte Auswertung vorgenommen. Hier können beispielsweise neben einer rein nach technischen Aspekten ausgerichteten Datenaufbereitung auch organisatorische Einflußfaktoren analysiert werden. Die Interpretation der Ergebnisse sowie die Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen obliegt anschließend dem Aufnahmeteam in Zusammenarbeit mit dem Bedienungs- und Instandhaltungspersonal der Ma-

schine.

Ein halbautomatisches Betriebs-Daten-Erfassungssystem, das speziell die Belange von kurzzyklischen Montageabläufen und Bestückungssystemen berücksichtigt, ist die Maschinenorientierte Datenerfassung mit Dialogführung und Optimierbaren Registrierdatenmengen MADADOR [66]. Bild 8 zeigt die drei Ebenen von MADADOR.

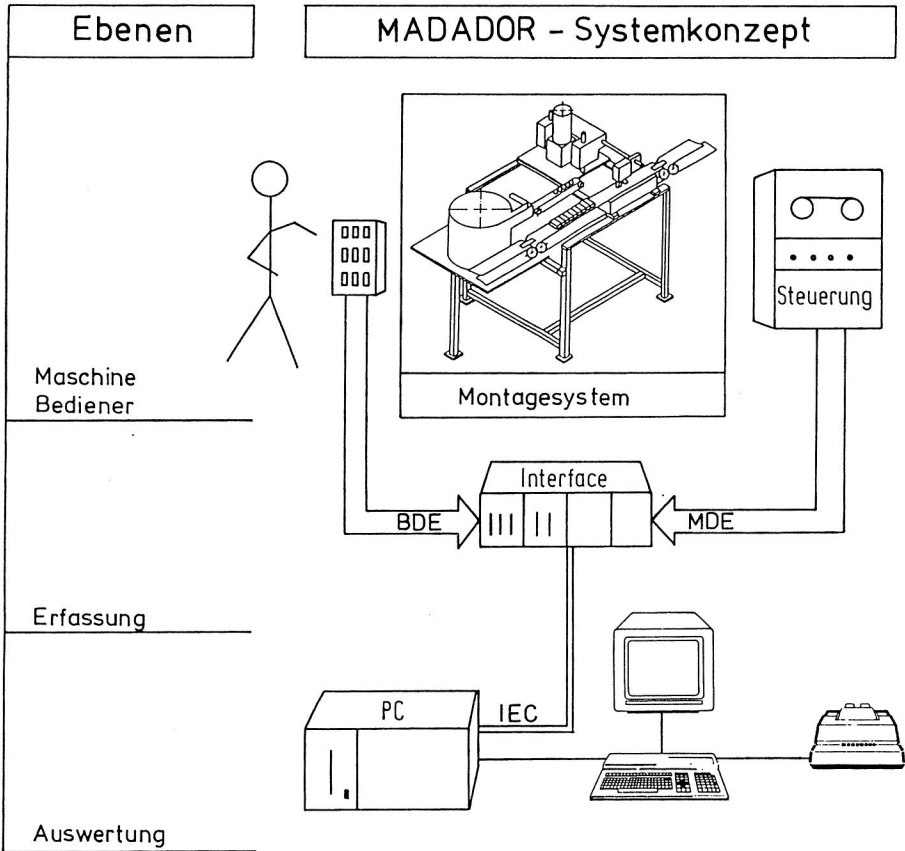


Abbildung 8: Das BDE-MDE-Konzept MADADOR [66]

Die Grundgedanken des Systemkonzepts sind:

- Ohne Eingriff in das Maschinensteuerprogramm sind beliebige Maschinen und Automaten anschließbar.
- In einem Kollektorinterface werden die in der Steuerung aufgenommenen Signalzustände und die über eine Bedientastatur eingegebenen Betriebsdaten gesammelt und zwischengespeichert.
- Das Interface arbeitet autark und stellt dem Rechner die Daten zur Auswertung und Speicherung nach Anfrage bereit.

Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, daß die Datenaufnahme rückwirkungsfrei auf die Anlage ist und somit nicht zu Taktzeitverlusten führt. Außerdem können auch bei Ausfall oder anderweitiger Verwendung des Rechners Ereignisse erfaßt und festgehalten werden.

Ein neuer Weg für die Diagnose des Betriebsverhaltens von verketteten Montagestationen wird von Wiendahl [113] vorgestellt. Auf der Basis eines Expertensystems wird mit dem Programm SOMA die Möglichkeit geschaffen, Diagnose-, Prognose- und Steuerungsverfahren zu testen.

2.1.3 Vorstellung von Untersuchungsergebnissen

Umfangreiche Untersuchungen haben ergeben, daß die Verfügbarkeiten spanender Werkzeugmaschinen in komplexen Fertigungsanlagen und Flexiblen Fertigungssystemen zwischen 75 und 99% liegen [96, 111].

Streifinger [95] differenziert in seinen Untersuchungen nach Drehmaschinen und Bearbeitungszentren für die Fräs- und Bohrbearbeitung. Während er für die mittlere technische Verfügbarkeit bei Drehmaschinen einen Wert von 94% ermittelt hat, beziffert er diese für Bearbeitungszentren mit 84%. Die Zahlen beinhalten keine Wartungsarbeiten, da diese außerhalb der angesetzten Produktionszeiten durchgeführt werden. Auffällig hoch sind die in Bild 9 dargestellten Zeiten für die durchschnittlichen Störungsabstände und Störungsdauern [95]. Hieraus läßt sich der Schluß ziehen, daß aufgrund der relativ selten auftretenden Störungen repräsentative Aussagen nur nach mehrmonatigen Untersuchungen zu erwarten sind.

Der Vergleich zwischen Drehmaschinen und Bearbeitungszentren zeigt, daß die störungsfreie Betriebsdauer (ausgedrückt durch MTBF) im Verhältnis 1 zu 5 liegt, während die Reparaturdauern in einer gleichen Größenordnung rangieren. Die bei der Bohr- und Fräsbearbeitung häufiger auftretenden Fehler resultieren aus dem höheren technischen Aufwand und der größeren Komplexität der Maschinen und der Bearbeitung. Allen Untersuchungen gemeinsam ist die Aussage, daß der Einfluß organisationsbedingter Stillstände deutlich stärker ist als technischer Störungen.

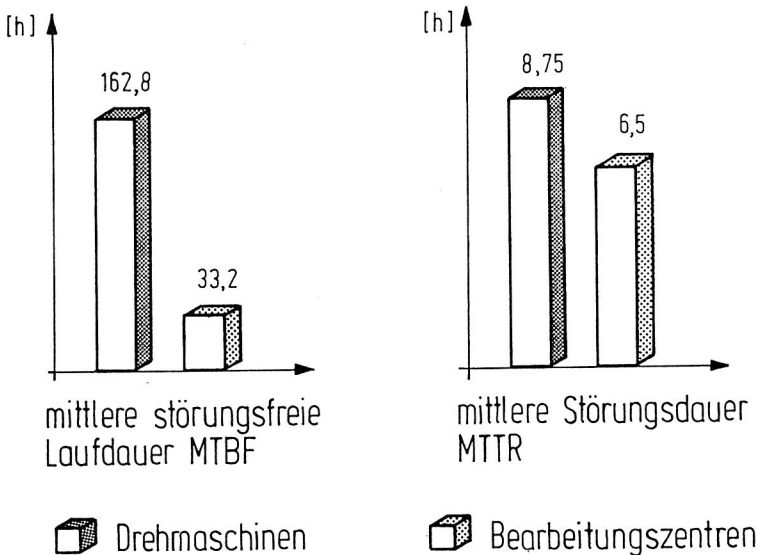


Abbildung 9: Störungsdauern und -abstände an spanenden Werkzeugmaschinen [95]

Ein grundsätzlich unterschiedliches Betriebsverhalten zur spanenden Fertigung weisen Montagesysteme auf. Bei ca. 25 Analysen von Montagesystemen der Feinwerktechnik ergibt sich bei [117] eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 79,5%. Der Minimalwert liegt hier bei lediglich 56,7%. Einige besonders zuverlässige Anlagen haben Werte von 95% bis maximal 96,1% erreicht. Zur Beurteilung des Einsatzverhaltens von Montageanlagen müssen neben der Verfügbarkeit die Störungsdauern und störungsfreien Laufdauern betrachtet werden. In Bild 10 werden die Durchschnittswerte der genannten Größen differenziert nach der Verkettungsart der Anlagen gezeigt.

Beim Vergleich von lose und starr verketteten Systemen wird deutlich, daß eine Entkopplung der Stationen durch Puffer zu einer Steigerung der Anlagenverfügbarkeit um mehr als 10% führen kann. Auch die durchschnittliche störungsfreie Laufdauer der lose verketteten Anlagen liegt mit 5,4 min. deutlich höher als bei un gepufferter Verkettung. Auffällig gut schneiden in diesem Vergleich die Rundtaktautomaten ab, bei denen die Störung eines Moduls zum sofortigen Ausfall der Gesamtanlage führt. Die Ursache hierfür liegt in den hier in der Regel vorkommenden einfachen Fügeoperationen und der Verwendung sehr ausgereifter technischer Konzepte.

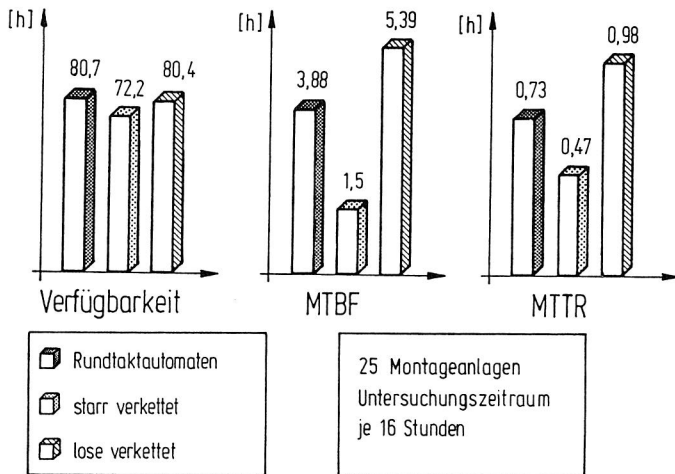


Abbildung 10: Verfügbarkeit, MTBF und MTRR von Montageanlagen [nach 117]

Bei einer Betrachtung der mittleren störungsfreien Laufdauern ergibt sich ein Wert von 4,11 min., der unter Berücksichtigung von manuellen Eingriffen in die produzierende Anlage lediglich 2,11 min. beträgt. Die Entstörtätigkeit dauert im Mittel 50 sek.. Hieraus wird die starke Personalbindung für Entstörtätigkeiten deutlich, durch die das Bedienungspersonal belastet wird.

Ähnliche Ergebnisse wie in der Montage feinwerktechnischer Produkte ergibt die Analyse von Bestückungsautomaten für elektronische Bauelemente. Bei [108] wird die Analyse eines Bestückungsautomaten für bedrahtete IC beschrieben. Bereinigt man die genannten Zahlen um den in dieser Untersuchung berücksichtigten Rüstzeitanteil, so ergibt sich ein Wert von ca. 70% für die Verfügbarkeit.

Analog zu den Untersuchungen bei der Bestückung konventioneller Bauelemente liegen detaillierte Ergebnisse zum Einsatzverhalten sequentiell arbeitender SMD-

Bestückungsautomaten vor. Aufgrund der geometriebedingten Vorteile der oberflächenmontierten Bauelemente können hier bessere Verfügbarkeitswerte erwartet werden.

Die Auswertung der Analyse basiert auf einem Untersuchungszeitraum von ca. 70 Std.. Während der Datenaufnahme wurden über 142 000 Bauelemente automatisch bestückt, die sich auf 16 unterschiedliche Leiterplattenvarianten und -formate beziehen. Mit einer Ausnahme wurden grundsätzlich mehrere Leiterplatten zu einem Nutzen zusammengefaßt. Die Anzahl pro Nutzen schwankte zwischen 4 und bis zu 50 Flachbaugruppen. Die Nutzenwechsel erfolgten manuell zumeist nach der Bestückung von 100 bis 200 Bauelementen, der Extremwert liegt bei 1080. Während der Untersuchung der Bestückungsautomaten wurden 3605 unvorhersehbare Ereignisse registriert. Die daraus resultierenden Nutzungsgradeinbußen werden in Bild 11 dargestellt.

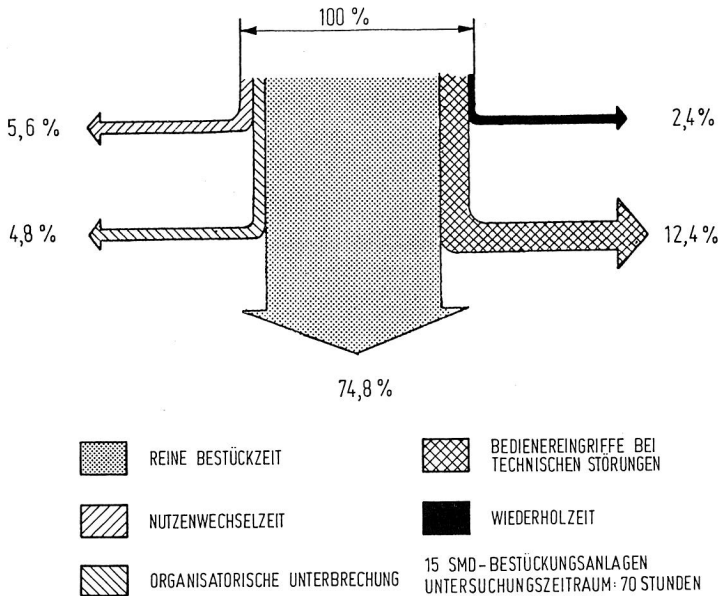


Abbildung 11: Grobauswertung des Betriebsverhaltens von SMD-Automaten mit Einzelbestückung

Der durchschnittliche Maschinennutzungsgrad von ca. 75% bezieht sich auf die Zeit, in der der Bestückungsautomat produzieren sollte. Pausenzeiten der Bediener, Auftragsmangel oder sonstige Fehlzeiten, die nicht dem Bestücker direkt

zuzuordnen sind, wurden hier nicht berücksichtigt.

Die Bedienereingriffe, die mit 12,4% den wesentlichen Anteil ausmachen, resultieren aus technischen Ursachen. Hier sind u.a. Tätigkeiten, wie das Auswechseln einer beschädigten Saugpipette, Reinigung des Kleberauftragsmoduls oder kleinere Reparaturen zu nennen. Organisatorische Unterbrechungen resultieren beispielsweise daraus, daß Bauelemente nachgefüllt wurden.

Die Verlustzeiten durch das Wechseln der Nutzen liegen über denen der organisationsbedingten Stillstände. Die Ursache hierfür liegt darin, daß an sämtlichen untersuchten Automaten ein manueller Wechsel vorgenommen wurde. Die durchschnittlichen Nutzenwechselzeiten der Einzeluntersuchungen bewegen sich zwischen 20 sek. bis zu einer Minute. Der Grund für die relativ langen Zeiträume ist wesentlich in der Motivation und Ausbildung der Anlagenbediener zu sehen. Oft verzögerte sich diese Arbeit auch aufgrund von Nebentätigkeiten, wie z.B. Kontrollfunktionen, die das Bedienungspersonal z.T. erheblich belasteten.

Die Wiederholzeiten mit 2,4% beeinflussen den Nutzungsgrad nur sehr gering. Sie resultieren daraus, daß der Automat beim Erkennen eines Bauelementes mit falschen elektrischen Werten oder bei Fehlern in der Bauteilaufnahme den Vorgang maximal zweimal wiederholt, bis er in eine Warteposition fährt und eine Störungsmeldung abgibt. Dieser Vorgang ist zwar zeitbehaftet, führt aber dazu, daß die Fehlbestückungsrate gesenkt wird und die Entstörtätigkeiten durch die Bediener deutlich reduziert werden, weil der Automat zunächst selbsttätig versucht, den Fehler zu beseitigen.

Die Nutzungsgrade der unterschiedlichen untersuchten Bestückungsautomaten schwanken zwischen ca. 60 bis 90%. Die Hauptursache für diesen großen Streubereich liegt vornehmlich im organisatorischen Bereich, weniger in den technisch bedingten Unterbrechungen.

Die hier vorgestellten Ergebnisse werden durch Analysen an simultan arbeitenden SMD-Bestückungsautomaten bestätigt. Wie Bild 12 zeigt, liegen die technischen Verfügbarkeiten von sequentiell und simultan arbeitenden Bestückungsmaschinen nicht sehr weit auseinander. Hier haben die analysierten Automaten im Vergleich zur Bestückung konventioneller bedrahteter Bauelemente bereits ein sehr gutes Niveau erreicht. Ansätze technischer Verbesserungen liegen im Detail und sind größtenteils im Zusammenhang mit der Bauelementebereitstellung zu treffen. Die Kenngrößen MTBF und MTTR aus Bild 12 zeigen deutlich, daß die technischen Verfügbarkeiten in beiden Fällen aus zahlreichen schnell zu behebenden Störungen

resultieren. Das hat zur Folge, daß in den meisten Fällen an einen reinen Automatikbetrieb ohne ständig vorhandenes Überwachungspersonal gegenwärtig noch nicht zu denken ist. Selbst Pausenzeiten der Anlagenbediener von 15 bis 30 Minuten können nicht überbrückt werden.

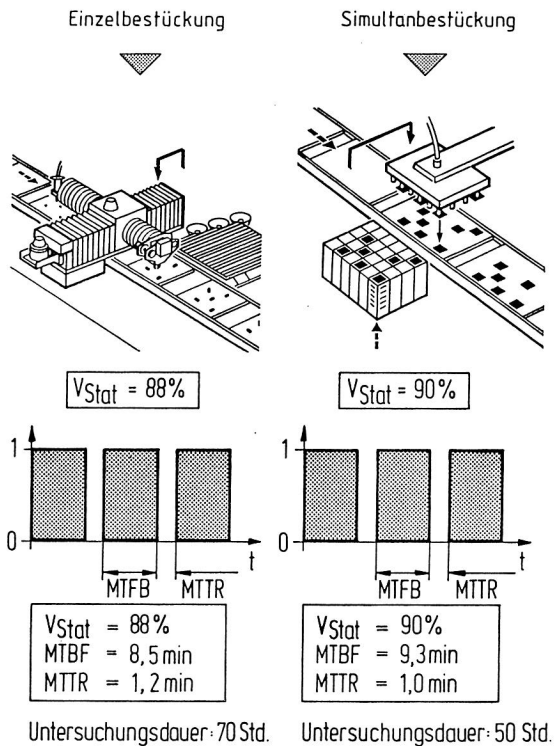


Abbildung 12: Verfügbarkeitsvergleich von Einzel- und Simultanbestückung

Allen Untersuchungen gemeinsam ist der negativ-exponentielle Verlauf der Verteilungen für die Störzeiten und Störungsabstände. Es müssen folglich bereits in der Planung von Anlagen der Montage- und Bestücktechnik zahlreiche kurzfristige Störungen berücksichtigt werden.

2.2 Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen

Die in zahlreichen Untersuchungen ermittelten Verfügbarkeits- und Nutzungsgradwerte geben Anlaß, nach Maßnahmen zur Verbesserung zu suchen. Hier gilt es, zum einen, bei bereits existierenden Anlagen die Schwachstellen zu erkennen und abzustellen und zum anderen, bei in der Planung befindlichen Systemen von vornherein alle denkbaren Einflußfaktoren zu berücksichtigen. In den meisten Fällen reicht es aus, schwerpunktmäßig einige wenige kritische Punkte zu eliminieren, um für einen befriedigenden Nutzungsgrad des Gesamtsystems zu sorgen. In Bild 13 sind die denkbaren Maßnahmen nach den drei Einflußfaktoren, die auf ein Montagesystem wirken, klassifiziert.

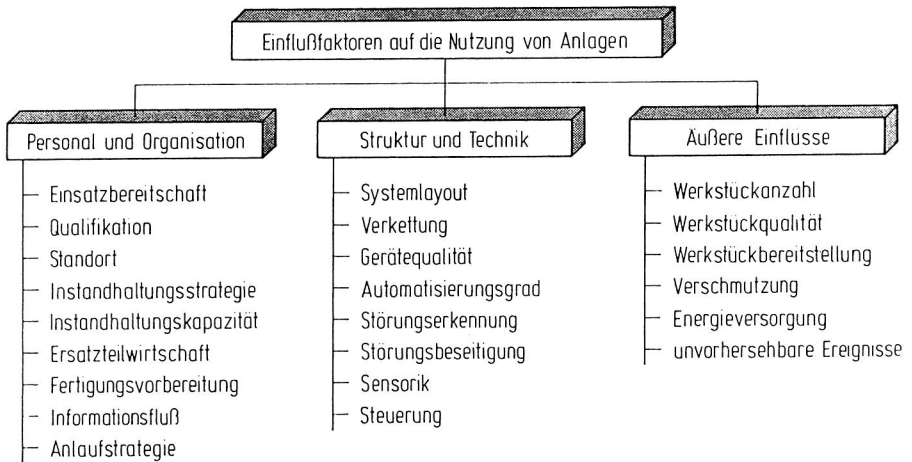


Abbildung 13: Nutzungsgradbeeinflussende Faktoren

2.2.1 Personelle und organisatorische Maßnahmen

Eine häufig unterschätzte Bedeutung vor allem bei teilautomatisierten Montageanlagen hat der Mensch. Der Zuverlässigkeitsgrad der Bedienungsperson wird oft mit 100% angesetzt, ohne Einbußen durch mangelnde Motivation oder Qualifikation

zu berücksichtigen.

Eine Stärkung des Verantwortungsbewußtseins z.B. durch die Einbeziehung des Mitarbeiters bei Modifikationen am System und eine leistungsgerechte Entlohnung sind zwei Ansätze zur Steigerung der Motivation. Insbesondere sollten auch Verbesserungsvorschläge des Bedienungspersonals sorgfältig geprüft werden, da zum einen der Bediener im täglichen Umgang mit dem System die Schwachstellen sehr genau kennt und zum anderen die Realisierung seiner Vorschläge zu einer Erhöhung seines Interesses führen kann [44].

Ein besonderer Wert muß vor allem bei sehr komplexen Montagesystemen auf die Ausbildung der Mitarbeiter gelegt werden. Die Sicherung der Anlagenverfügbarkeit kann auf ein sehr hohes Niveau gesteigert werden, wenn die Bediener bereits beim Aufbau und der Inbetriebnahme die Anlage kennenlernen können. Einfache Reparaturen und Wartungsarbeiten lassen sich dann später in der Produktion durch das Anlagenpersonal zeitsparend durchführen. Ein häufig begangener Managementfehler ist der Einsatz von Mitarbeitern aus niedrigen Lohngruppen an hochkomplexen Einrichtungen. Zur Erreichung einer hohen Wirtschaftlichkeit der Anlagen wird der Lohnkostenanteil sehr gering gehalten, mit der Folge, daß selbst beim Auftreten kleinerer Störungen Fachpersonal aus der Instandsetzungsabteilung angefordert werden muß. Neben einer Erhöhung der Kosten führt das zwangsläufig zu einer Reduzierung des Nutzungsgrades durch verlängerte Reparaturzeiten.

Die Anzahl der zur Betreuung moderner Anlagen eingesetzten Mitarbeiter wird möglichst geringgehalten. Unter diesem Aspekt bekommt die Bestimmung des optimalen Standortes des Personals eine besondere Bedeutung. Bei Herzlieb [45] wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem dieser Ort gefunden werden kann. Zunächst werden die Entfernungen zwischen allen Eingriffsorten bestimmt. Eingriffsorte sind sowohl Störorte als auch Bereiche, an denen planmäßige Tätigkeiten wie das Wechseln von Paletten usw. durchgeführt werden. Aus den Entfernungsdaten wird eine Distanzmatrix aufgestellt. In einem Häufigkeitsvektor wird anschließend die Anzahl der Eingriffe an den definierten Eingriffsorten festgehalten. Durch die Multiplikation von Distanzmatrix und Häufigkeitsvektor entsteht ein Wegsummenvektor, dessen Komponente mit dem betragsmäßig kleinsten Wert den optimalen Standort beschreibt.

Weitere Maßnahmen zur Steigerung des Nutzungsgrades liegen im organisatorischen Umfeld. Hier ist zunächst im Bereich der Instandhaltung dafür zu sorgen,

daß beim Auftreten von Störungen eine zielgerechte Fehlersuche und -beseitigung gewährleistet werden kann. Das setzt unter anderem eine angepaßte Ersatzteilwirtschaft voraus.

Der Nutzungsgrad kann durch einen guten Dialog zwischen Fertigungsvorbereitung und Werkstattpersonal gesteigert werden. Die Zusammenstellung von Tagesprogrammen unter dem Gesichtspunkt geringer Umrüstzeiten ist hier genauso zu nennen wie die Rückmeldung unerwarteter Ereignisse in der Fertigung an die Vorbereitung. Als organisatorischer Einflußfaktor sei hier desweiteren die materialflußgerechte Gestaltung von Montagesystemen genannt, die u.a. bei [9, 103] beschrieben wird.

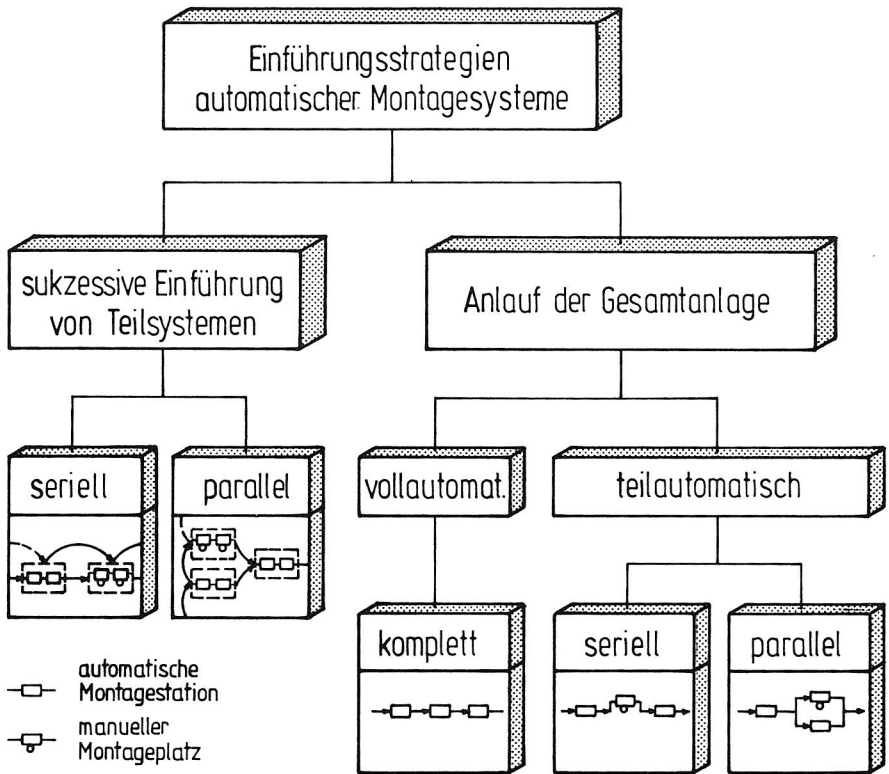


Abbildung 14: Anlaufstrategien automatischer Montageanlagen [33]

Als letzter Einflußfaktor organisatorischer Art seien die Anlaufstrategien bei der

Inbetriebnahme neuer Montagesysteme erwähnt. Zunächst müssen Maßnahmen ergriffen werden, die schon vor dem Anlauf günstige Voraussetzungen schaffen. Hierzu gehört maßgeblich die detaillierte Einweisung des Bedienungspersonals. Nach Gehler [33] sind in Bild 14 verschiedene Ansätze zur Verbesserung des Anlagenanlaufs mit Beispielen vorgestellt.

In erster Linie müssen Methoden zur Anlaufverbesserung während der Produktion auf eine Reduzierung der Störungen gerichtet sein. Damit wird die Anlagenverfügbarkeit und somit die Ausbringungsrate erhöht.

2.2.2 Strukturelle und technische Maßnahmen

Der Grundstein für einen hohen Nutzungsgrad von Anlagen wird bereits in der Konzeptions- und Planungsphase gelegt. Insbesondere das Systemlayout und die Art der Verkettung der in der Anlage vorhandenen Stationen haben einen wesentlichen Einfluß auf den Gesamtnutzungsgrad. Bild 15 zeigt die prinzipiellen Einflüsse der Stationsanordnung und der Verkettungsart auf die Gesamtzuverlässigkeit.

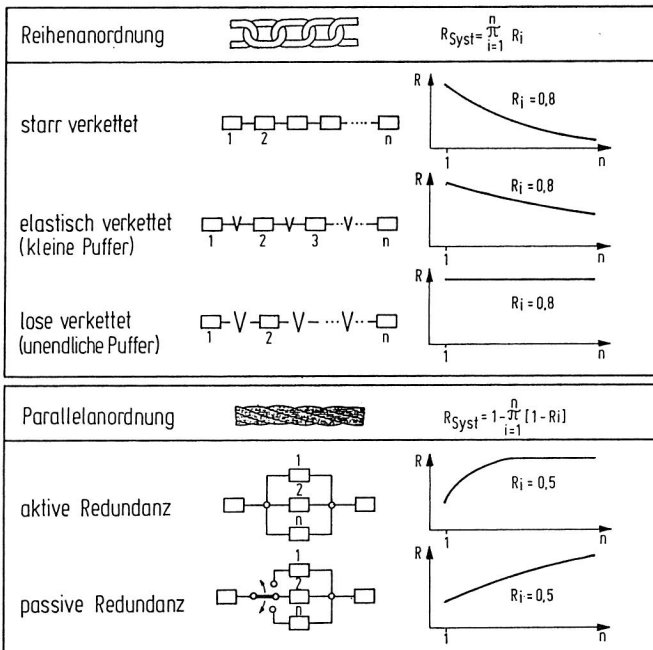


Abbildung 15: Gesamtzuverlässigkeit von Reihen- und Parallelanordnung

Eine hohe Gesamtzuverlässigkeit ist die Grundlage für einen zufriedenstellenden Nutzungsgrad. Bei der Reihenanordnung von Stationen, wie sie vor allem in der Montagetechnik anzutreffen ist, besteht eine starke Abhängigkeit der Zuverlässigkeit von der Anzahl der Stationen und der Verkettungsart. Aufgrund des vorgegebenen Funktionsumfangs einer Montageaufgabe läßt sich die Stationenzahl in der Regel nicht verändern. In der Planung läßt sich jedoch durch die Entkopplung der Systemelemente durch Pufferstrecken der Nutzungsgrad stark beeinflussen. Im Extremfall kann durch die vollständige Entkopplung bei der losen Verkettung eine Gesamtzuverlässigkeit erreicht werden, die der geringsten Einzelzuverlässigkeit entspricht.

Durch die Anordnung redundanter Montagestationen kann die Gesamtzuverlässigkeit eines Systems annähernd auf 100% gesteigert werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch mit einem erhöhten Investment verbunden und scheitert in der Praxis oft an der zu geringen Wirtschaftlichkeit. Dabei sind die aktive und passive Redundanz zu unterscheiden.

Eine aktive bzw. funktionsbeteiligte Redundanz liegt vor, wenn sich die parallel angeordneten Systemelemente ständig im gleichen Betriebszustand befinden wie die zur Funktionsausübung vorgesehene Grundeinheit. Fällt diese aus, so können unmittelbar die benachbarten Stationen ihre volle Aufgabe übernehmen. Diese Vorgehensweise wird heute bei sicherheitsrelevanten und sehr teuren Anlagen durch redundante Rechnersysteme angewandt.

Bei der passiven bzw. nicht funktionsbeteiligten Redundanz sind die Reservestationen ausgeschaltet. Bei Ausfall der Grundeinheit müssen diese in Betrieb genommen werden, so daß für die Zuverlässigkeitsberechnung die Hochlaufzeit mitberücksichtigt werden muß.

Wie bereits in Bild 15 deutlich wird, hat die Gerätequalität - ausgedrückt durch die technische Einzelzuverlässigkeit der Systemelemente - für die Ermittlung der Gesamtzuverlässigkeit einen großen Einfluß. Das hat zur Folge, daß einerseits Geräte und Baugruppen verwendet werden sollten, die eine lange Lebensdauer und Funktionssicherheit garantieren und zum anderen in besonders kritischen Bereichen auch eine Überdimensionierung gerechtfertigt erscheint.

Eine differenzierte Analyse ist notwendig, um den Einfluß des Automatisierungsgrades auf den Nutzungsgrad von Montageanlagen abschätzen zu können. Bei der Beobachtung teilautomatisierter Systeme fällt auf, daß durch häufige manuelle Eingriffe vorbeugend Störungen im Entstehungsstadium vermieden werden [117].

Ebenso werden durch Vorsortierung fehlerhafte Werkstücke eliminiert, die in voll-automatisierten Einrichtungen unweigerlich zu Störungen führen würden. Hieraus wird deutlich, daß wie bei Boothroyd [10] beschrieben, tendenziell mit einer Abnahme des Gesamtnutzungsgrades bei steigender Automatisierung zu rechnen ist.

Andererseits bieten Automatisierungsmaßnahmen die Möglichkeit, Störungen rechtzeitig zu erkennen und zu beseitigen, z.B. durch automatisierte Diagnoseeinrichtungen und Entstörsysteme [31]. Ein denkbare Konzept hierfür zeigt Bild 16.

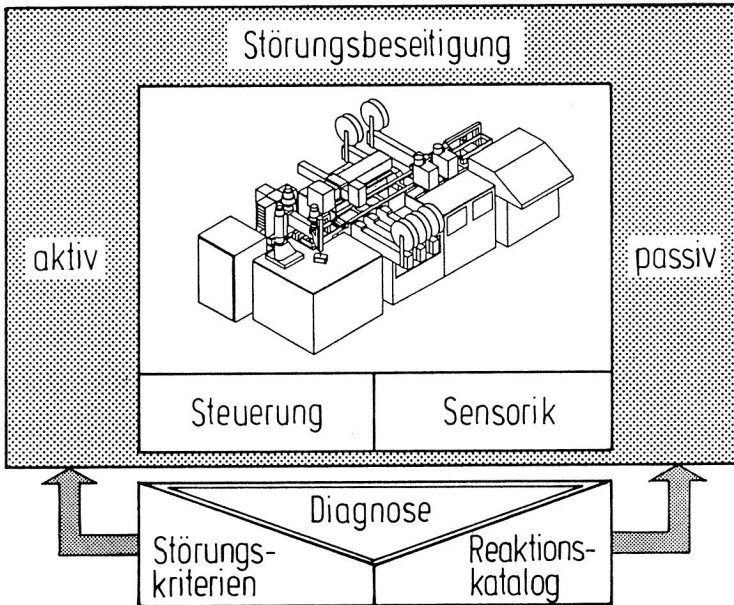


Abbildung 16: Prinzip einer integrierten Störungserkennung und -beseitigung

Über die in automatisierten Montagesystemen zumeist vorhandenen speicherprogrammierbaren Steuerungen sowie die integrierte Sensorik lassen sich Informationen über den Betriebszustand der Anlage gewinnen. Treten Signale auf, die von den geplanten Sollwerten abweichen, so läßt sich durch die Diagnoselogik und den Vergleich mit definierten Störungskriterien die Unterbrechungs- oder Verzögerungsursache ermitteln. Abhängig von der Art und dem Auftreten des Fehlers wird aus einem Maßnahmenkatalog die passende Reaktion abgeleitet. Dies kann im einfachsten Fall eine Störungsmeldung durch eine Warnlampe oder Hupe sein. Komfortabler sind Klartextinformationen, die dem Bedienungspersonal be-

reits wichtige Informationen für die Fehlerlokalisierung geben können. Eine andere Lösung wird bei Ziersch [117] beschrieben. Hier handelt es sich um automatische Entstöreinrichtungen, die nach sensorunterstützter Erkennung des Fehlers die Störung selbsttätig beseitigen können. Aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkte hat sich diese Vorgehensweise jedoch noch nicht in der Praxis durchgesetzt.

Die Störungsbeseitigung kann sowohl aktiv als auch passiv erfolgen. In diesem Zusammenhang bedeutet "aktiv", daß durch die Behebung der Störung kein Ausschußteil entsteht. Dies kann entweder durch eine kleinere Reparatur (z.B. das Geradebiegen eines verbogenen Werkstücks mit einer automatischen Stelleinrichtung) oder durch das Entwirren eines verklemmten Werkstückes geschehen. Bei der passiven Entstörung werden die in die Störung verwickelten Baugruppen und Teile aus dem Montageprozeß eliminiert. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage wird somit zum einen durch die zeitliche Verzögerung beim Entstören verringert und zum anderen geht durch den Fehltakt Produktionszeit verloren.

Durch die Integration dieser selbsttätigen Einrichtungen in den automatischen Montageprozeß wird jedoch die Nutzungsgradeinbuße gegenüber einem manuellen Eingriff deutlich verringert.

2.2.3 Verringerung äußerer Einflußfaktoren

Untersuchungen von Montagesystemen für elektrofeinmechanische Produkte und von Bestückungssystemen der Elektronikproduktion [79] haben bestätigt, daß besonders die Werkstückqualität den Nutzungsgrad der Anlagen stark beeinflusst. Insbesondere stark schwankende Toleranzen führen bei der Zuführung und im Fügeprozeß immer wieder zu Störungen. Grundsätzlich sollte aus diesem Grund die Anzahl der zur Montage eines Gerätes notwendigen Einzelteile so gering wie möglich gehalten werden. Die Grenze hierfür liegt natürlich in der Bedingung, daß die Funktionalität eines Produktes nicht beeinträchtigt werden darf. Ansätze und Beispiele zur Realisierung dieser Forderung werden von Lotter in [57] beschrieben.

Bereits bei der Produktgestaltung der Werkstücke läßt sich daraufhinwirken, daß Mängel nicht entstehen bzw. daß beim Auftreten eines Fehlers dieser mit einfachen Mitteln erkannt und somit auch die Beseitigung des beschädigten Teils unverzüglich durchgeführt werden kann. Grundlagen für die montage- und handhabungsgerechte Werkstückgestaltung wurden Ende der siebziger Jahre vielfältig publiziert [20, 25, 31, 47, 51]. Obwohl sich hier in den vergangenen zehn Jahren

in vielen Fällen Verbesserungen ergeben haben, - man denke z.B. an die montagefreundliche SMD-Technik in der Elektronikbestückung - so besteht für die Zukunft weiterhin ein großer Bedarf an einer Intensivierung des Dialogs zwischen Produktkonstrukteur und Montagesystemplaner. Das beweisen u.a. zahlreiche Veröffentlichungen in jüngster Zeit [29, 32, 98, 115].

Die werkstückseitige Beeinflussung des Nutzungsgrades setzt sich in der Bereitstellung der Teile fort. Zur Aufnahme der Baugruppen und Einzelteile durch ein automatisches Handhabungssystem müssen diese in einer engtolerierten definierten Lage angeboten werden. Die Praxis zeigt, daß vor allem durch den Zuführbereich sehr häufig Störungen in Montageanlagen entstehen. Fehlerhafte oder beschädigte Werkstücke bewirken nicht selten Folgestörungen an Fördereinrichtungen. Ein Beispiel hierfür sind verbogene Schikanen in Vibrationswendelförderern.

Nutzungseinbußen entstehen oft durch Verschmutzungen an Werkstücken, Geräten und Sensoren. Schon in der Planungsphase muß berücksichtigt werden, daß beispielsweise Lichtschranken bei Prozessen, in denen Staub oder Ölnebel auftreten, nicht verwendet werden dürfen. Das Fehlverhalten verschmutzter Sensoren bewirkt Störungen im steuerungstechnischen Ablauf und Fehlermeldungen, die u.U. zu schwerwiegenden Folgestörungen führen können.

Unvorhersehbare Ereignisse im organisatorischen und technischen Umfeld sowie Engpässe in der Energieversorgung können zwar zu Verlusten beim Nutzungsgrad einer Anlage führen, lassen sich jedoch zumeist nicht durch den Montagesystemplaner und -betreiber beeinflussen und sollen deshalb hier nicht zum Gegenstand der Betrachtung werden.

2.2.4 Störungsreduktion und Störungskompensation

Zusammenfassend lassen sich die vorgestellten Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung differenzieren nach Einflußmöglichkeiten zur Reduktion und Kompensation von Störungen. Wie Bild 17 zeigt, wirkt sich die Störungsreduktion primär auf die Stillstandshäufigkeit aus, während die Kompensation das Ziel zur Verkürzung der Störungsdauern hat.

Die Basis für Maßnahmen im Sinne der Störungsreduktion wird im Planungsstadium und in der Konstruktion von Montagesystemen gelegt. Hier gilt es, potentielle Schwachstellen frühzeitig zu erkennen und von vornherein zu vermeiden. Für eine erfolgreiche Durchführung ist hier zum einen die Erfahrung der

beteiligten Mitarbeiter und zunehmend der Einsatz rechnerunterstützter Verfahren maßgeblich [28].

Neben der reduzierenden Wirkung können im Bereich der Instandhaltung z.B. durch kurze Reaktionszeiten auch Kompensationseffekte erreicht werden. Dies gilt in gleicher Weise für die Qualifikation und Motivation der Mitarbeiter. Als organisatorische Möglichkeit zur Verbesserung des Störungsverhaltens in beiden Bereichen sind beispielsweise der Personalstandort oder auch die Beibehaltung einer einmal erzielten Teileordnung zu nennen. Ganz im Sinne der Störungskompensation

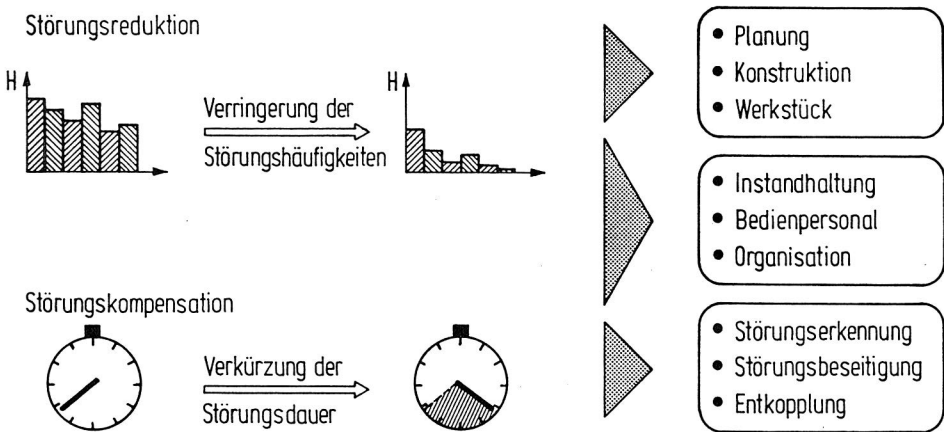


Abbildung 17: Nutzungsgradsteigerung durch Störungsreduktion und Störungskompensation

liegen die Bestrebungen einer möglichst schnellen Erkennung von Fehlfunktionen und einer exakten Lokalisierung der Ursache. Daran schließen sich Strategien zur Vereinfachung und Beschleunigung der Störungsbeseitigung an. Im Hinblick auf den Gesamtnutzungsgrad der Anlagen läßt sich die Auswirkung einer Unterbrechung einer Station auf benachbarte durch die Integration von Entkopplungspuffern verringern. Die Dimensionierung dieser Einrichtungen ist Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen [42, 48, 58, 78, 93] und wird in dieser Arbeit anhand von Simulationsstudien ausführlich behandelt (s. Kap. 5.3.2).

2.3 Effizienzanalyse der Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Maßnahmen müssen vor ihrer Realisierung untersucht werden, inwieweit sie zur Erreichung des angestrebten Nutzungsgrades beitragen. Insbesondere bei aufwendigen Modifikationen im Layout oder bei organisatorischen Veränderungen muß geprüft werden, ob der Erfolg den notwendigen Aufwand rechtfertigt. In der Praxis werden die sich hier aufwerfenden Fragen zumeist durch Schätzungen und Erfahrungswerte beantwortet. Durch den Einsatz moderner Technologien und steigender Komplexität bei Montagesystemen garantieren diese Vorgehensweisen jedoch keine abgesicherten Aussagen.

Abhängig von der Ausgangssituation, müssen zwei alternative Wege zur Beurteilung der Effizienz vorgeschlagener Verbesserungsmaßnahmen unterschieden werden. Dies ist zum einen die Realisierung des Vorschlags am bereits existierenden System und zum anderen die Untersuchung an Modellen, die die Wirklichkeit hinreichend abbilden. Bei in der Planung befindlichen Anlagen kann ausschließlich der zweite Weg beschritten werden. Dieser ist auch bei Veränderungen an produzierenden Anlagen häufig sinnvoll. Das prinzipielle Vorgehen zeigt Bild 18.

2.3.1 Realisierung der Maßnahmen am bestehenden System

In vielen Fällen lassen sich ohne großen technischen und wirtschaftlichen Aufwand Verbesserungsmaßnahmen am System vornehmen. Bei vergleichsweise geringem Risiko sollte dann auch dieser Weg beschritten werden, ohne vorher aufwendige Modelluntersuchungen vorzunehmen. Als Beispiel sei hier die Korrektur einer Schikane eines Vibrationswendelförderers genannt. Wurde bei einer Störzeituntersuchung dieses Zuführsystem als Schwachstelle erkannt, so läßt sich oft durch eine Nachjustage der Ordnungseinrichtung, die im Normalfall nur wenige Minuten dauert, eine deutliche Verbesserung der Förderleistung erreichen.

Es gibt jedoch eine Reihe von Gründen, die die Erprobung vorgeschlagener Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung an produzierenden Anlagen ausschließen oder unvorteilhaft erscheinen lassen [54]. Hierzu sind Experimente zu rechnen, die zu einer Gefahr für Menschen, Maschinen und Material werden können. Darüberhinaus können zeitliche Einflußfaktoren die Untersuchung von Verbesserungsmaßnahmen am System verbieten. Das gilt beispielsweise bei der Gegenüberstellung unterschiedlicher Fertigungssteuerungsstrategien. Um repräsentative Aussagen über deren Funktionalität bekommen zu können, müßten langwierige Untersuchungen

angestellt werden, die im ungünstigen Fall zu gravierenden Produktionsausfällen führen können. Ein weiterer Grund liegt in der Wirtschaftlichkeit von Effizienzanalysen. Es läßt sich nur in seltenen Fällen rechtfertigen, mehrere Layoutvarianten des Realsystems aufzubauen, um beispielsweise Optimierungen im Materialfluß vorzunehmen.

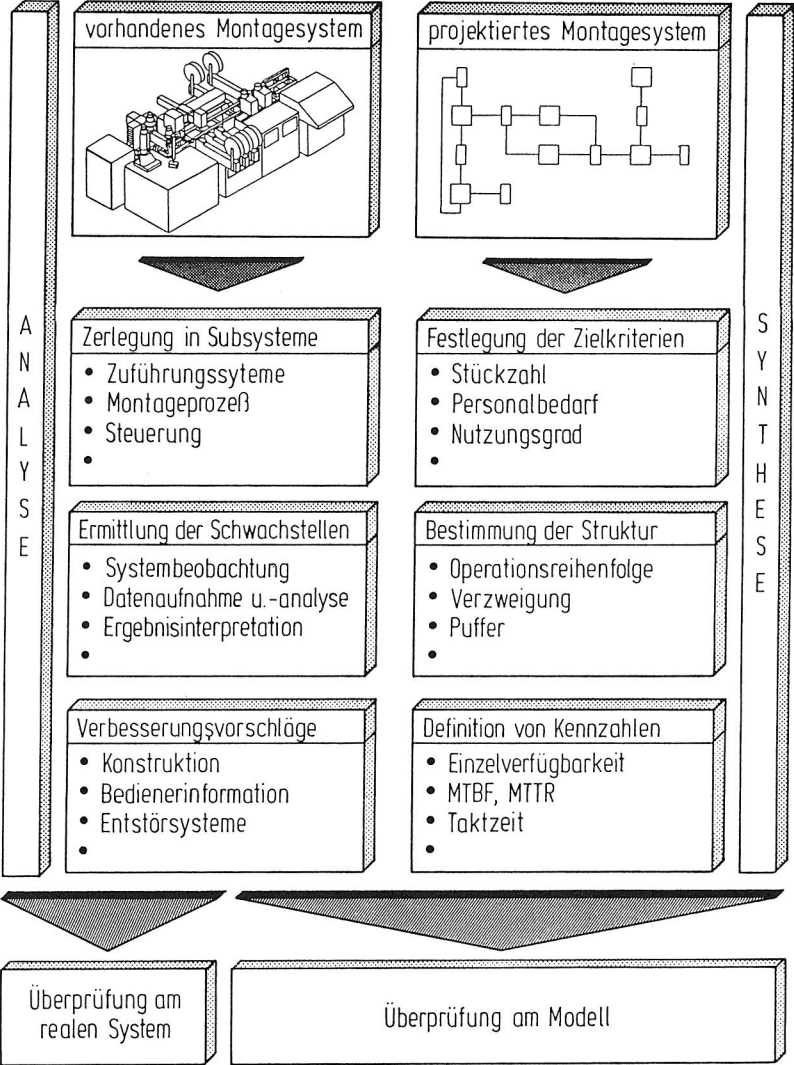


Abbildung 18: Vorgehensweise bei der Effizienzanalyse von Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung

2.3.2 Effizienzanalyse am Modell

Durch die abstrahierende und reduzierende Abbildung realer Systeme entstehen Modelle. Diese können abhängig von der Art der zu untersuchenden Anlage und der mit der Modellierung verbundenen Zielsetzung sehr unterschiedliche Erscheinungsmuster aufweisen. Eine allgemeingültige Methode für die Modellbildung gibt es nicht. Es bleibt vielmehr der kreativen Intelligenz und der Erfahrung des Modellierers überlassen wie konkret sein Modell die Wirklichkeit abbildet.

Da im Kapitel 3.3.2 eingehend auf die Modellbildung bei Simulationsstudien eingegangen wird, sollen an dieser Stelle zunächst einige Modelltypen gezeigt werden.

In Bild 19 werden gegenständliche und mathematisch-physikalische Modelle unterschieden.

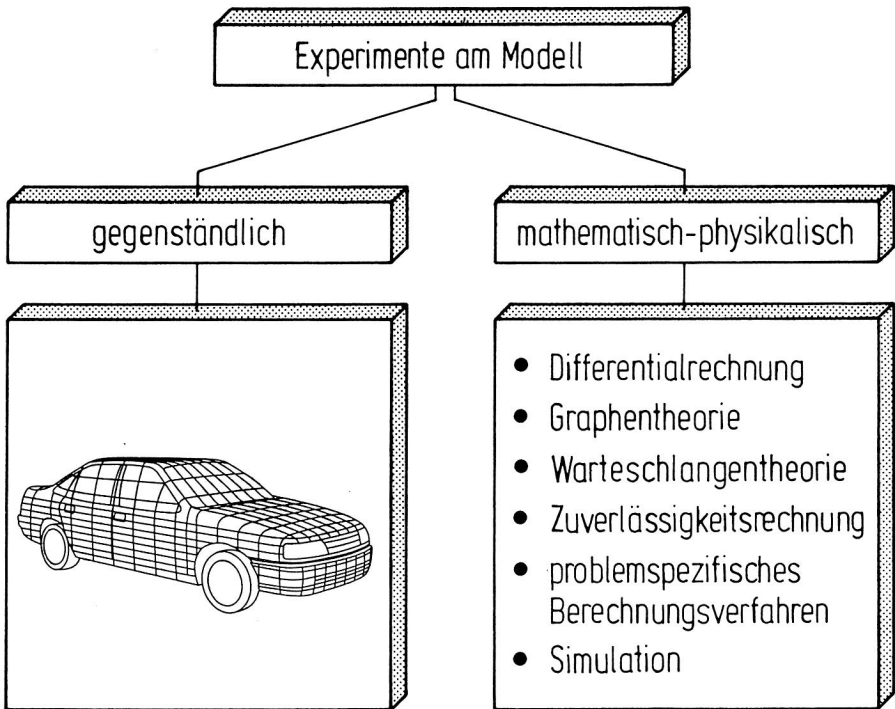


Abbildung 19: Unterschiedliche Modelltypen

Zu den gegenständlichen Modellen zählen Nachbildungen realer Objekte, die entweder in ihrer geometrischen Form dem zu untersuchenden System im mathe-

matischen Sinne ähnlich sind oder durch einen analogen körperlichen Aufbau analyserelevante Funktionen des Ursprungssystems ausführen. Als Beispiel seien hier für den ersten Fall Modelle genannt, die für Windkanalversuche benötigt werden. Die Wirklichkeit wird hier in einem bestimmten Maßstab nachgebaut, wobei u.U. einige Funktionen unberücksichtigt bleiben. So läßt sich das Ziel, strömungstechnische Erkenntnisse zu gewinnen, erreichen, ohne beispielsweise Innenaustattung, Motor und Getriebe eines PKW nachzubilden. Diese Art Modelltyp findet in der Auslegung von Produktionsanlagen keine Verwendung.

Über eine andere Möglichkeit, gegenständliche Modelle auch für Fragestellungen in Produktionsbereich einzusetzen, berichtet Reinhardt [72]. Für den Entwurf von Materialflußsystemen und deren Steuerung werden Realzeitexperimente an einem handelsüblichen Modellbausystem durchgeführt. In Analogie zum Layoutentwurf beliebiger Anlagen können in Spielzeugtechnik Verteilwagen, Weichen, Maschinen usw. zu einem Modell kombiniert werden.

Die Differenzierung mathematisch-physikalischer Modelle in die in Bild 19 dargestellten Verfahren resultiert aus den in der fertigungstechnischen Literatur beschriebenen Vorgehensweisen. Unter den Aspekten von Fragestellungen aus anderen wissenschaftlichen Disziplinen ließen sich hier auch Gliederungsschemata wie in [82] beschrieben, wählen.

Eine weitere Art der Unterscheidung macht Bäckers [6]. Bei ihm wurden Optimierungstechniken den heuristischen Verfahren gegenübergestellt. Als optimierende Techniken werden analytische (z.B. Differentialrechnung) und numerisch exakte Vorgehensweisen (z.B. Simplex-Algorithmus) ebenso genannt wie approximierende Methoden, wobei im letzten Fall die optimale Lösung mit einer aufwandsabhängigen Genauigkeit gefunden werden kann.

Ein Beispiel für heuristische Techniken ist neben der Simulation die Netzplantechnik. Beide Vorgehensweisen haben den Nachteil, daß zur Erlangung eines Suboptimums durch Probiervverfahren ein vergleichsweise großer Aufwand zu treiben ist. Sie bieten jedoch die Vorteile einer guten Anschaulichkeit der Modelle, eines geringen Aufwands zum Erlernen der Modelltechnik und der leichteren Modellkonstruktion. Gerade diese bei den Optimierungsverfahren nicht vorhandenen Vorteile führen dazu, daß der zumeist ohne hochqualifizierte mathematische Ausbildung arbeitende Planer die Optimierungstechniken in der Praxis nicht einsetzt. Das heuristische Vorgehen in der Netzplantechnik hat sich jedoch weitgehend in Planungsprozessen etabliert.

Betrachtet man die in Bild 19 genannten Modelltypen, so stellt man fest, daß die Verfahren für produktionstechnische Belange von sehr unterschiedlichem Wert sind.

Die Differentialrechnung eignet sich als Abbildungsform für kontinuierliche Systeme. Die Zustandsübergänge bei fertigungs- und montagespezifischen Fragestellungen sind in der Regel jedoch diskretisierbar und werden somit nicht durch partielle oder gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben.

Vielversprechender erscheinen jedoch die Ansätze aus der Graphen- und Warteschlangen- bzw. Bedienungstheorie. Bei Großeschallau [37] werden diese Techniken zur Beantwortung materialflußtechnischer Fragestellungen genannt. Bild 20 zeigt das typische Aussehen von Graphen- und Bedienungsmodellen am Beispiel einer Fertigungshalle, in der Maschinen von einem Transportsystem ver- und entsorgt werden.

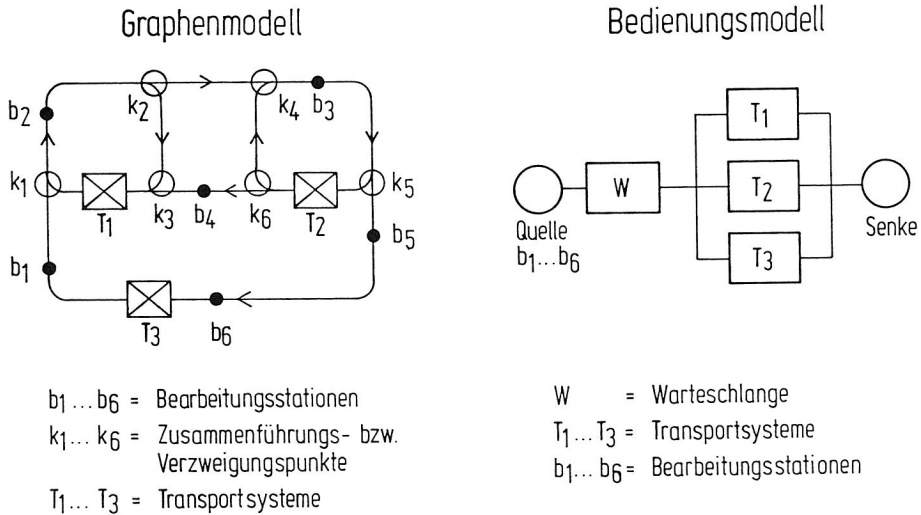


Abbildung 20: Abbildung eines Transportsystems im Graphen- und Bedienungsmodell

Im Graphenmodell werden die Quellen und Senken eines Systems als Knoten aufgefaßt. Die Verbindungselemente werden sowohl als Kanten als auch durch Knoten dargestellt.

Bedienungsmodelle bestehen ebenfalls aus Quellen und Senken sowie Bedienungs-

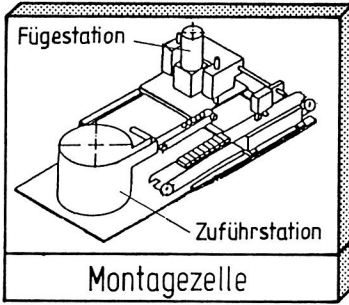
anlagen. Anforderungen bzw. Objekte, die eine Bedienung in der Anlage verlangen, entstehen in den Quellen. Zur Bedienungsanlage gehören ein Warteraum und ein Bedienungsknoten mit parallelen Kanälen. Nachdem sie bedient werden, verlassen die Objekte das System an den Senken.

Mit Hilfe der Graphentheorie lassen sich beispielsweise Fragen nach den kürzesten Wegen zwischen Arbeitsplätzen beantworten. Ein verbreiteter Repräsentant der Graphenmodelle sind Petri-Netze [120]. Insbesondere für große Modelle ist jedoch der Einsatz dieser Methode sehr aufwendig. Durch die Einführung von zwei übereinandergeschichteten Netzhierarchien lassen sich jedoch auch komplexere Probleme bearbeiten [114].

Warteschlangenmodelle finden bei einfachen Systemen und der Frage nach Durchschnittswerten wie beispielsweise Wartezeit und Warteschlangenlänge verschiedentlich [27, 52, 110] Anwendung. Soll jedoch die Zeitdynamik von Anlagen betrachtet werden, so scheiden diese Verfahren aus.

Als mathematische Werkzeuge der Methoden zur zuverlässigkeitstechnischen Modellbildung werden in [84] die elementare und fortgeschrittene Wahrscheinlichkeitsrechnung, die Boolesche Schaltalgebra, die Erneuerungstheorie, Markovsche Differentialgleichungen sowie einige Teile der Graphentheorie genannt. Es wird eine Klassifizierung dieser gängigsten Methoden der Zuverlässigkeitstheorie nach "Zustandsraum-Verfahren" und "Netzwerk-Verfahren" vorgeschlagen und Einsatzmöglichkeiten diskutiert. Der Beitrag kommt zu dem Ergebnis, daß Zustandsraum- und Netzwerk-Verfahren keine echten Alternativen zur Lösung gleicher Problemklassen sind. Die Markov-Methode wird als die einzige wirklich bedeutende Rechenmethode im Zustandsraum bezeichnet. Inwieweit mit Markov-Modellen Untersuchungen an Montagesystemen zur Bestimmung des Nutzungsgrades durchgeführt werden können, wird im folgenden analysiert.

Bei der Modellvorstellung nach Markov spielen zwei Wahrscheinlichkeitsgrößen eine Rolle. Die **Zustandswahrscheinlichkeit** macht eine Aussage darüber, inwieweit sich eine Anlage in einem definierten Zustand - z.B. eine von drei Stationen ist gestört - befindet. Mit der **Übergangswahrscheinlichkeit** geht das System von dem vorliegenden in einen nachfolgenden Zustand über. Für die Ermittlung des Nutzungsgrades einer Anlage ist insbesondere der Zustand "betriebsbereit" von Interesse. Am Beispiel einer einfachen Montagezelle, die aus den Komponenten, Füge- und Zuführstation besteht, wird der prinzipielle Ansatz der Markov-Methode in Bild 21 erläutert.



Bedingung:
Füge- und Zuführefunktion
können nicht gleichzeitig
ausfallen



+ funktionsfähig
- ausgefallen

Zustands- Nr.	Funktion		System- zustand
	Fügen	Zuführen	
Z1	+	+	intakt
Z2	+	-	gestört
Z3	-	+	gestört

Zustandstabelle



- λ_Z Störrate für Zuführstation
- λ_F Störrate für Fügestation
- μ_Z Reparaturrate für Zuführstation
- μ_F Reparaturrate für Fügestation
- Z_i Zustandsnummer

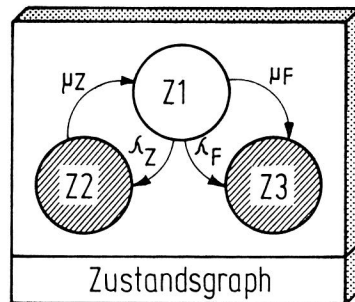


Abbildung 21: Markov-Methode zur Ermittlung der Zustandswahrscheinlichkeit

Zunächst werden die Systemzustände, die sich aus den Elementarzuständen der Komponenten ergeben können, bestimmt. Anschließend erfolgt der Aufbau eines Zustands-Übergangs-Graphen, in dem die Stör- und Reparaturraten der Funktionsträger mitberücksichtigt sind. Zur Bestimmung der zeitabhängigen Zustandswahrscheinlichkeiten dieses stochastischen Prozesses müssen einige Bedingungen erfüllt sein:

- Die Anfangsverteilung der Zustandsvariablen aller Stationen zum Zeitpunkt t_0 müssen bekannt sein.
- Die Stör- und Reparaturraten der Funktionsträger müssen vorliegen.

Die mathematische Beschreibung der Zustands-Übergangs-Graphen führt auf ein System linearer Differentialgleichungen, die es zu lösen gilt. Es ist einsichtig, daß mit zunehmender Zahl von Stationen die Anzahl denkbarer Systemzustände exponentiell zunimmt und somit die Lösung der Gleichungssysteme verkompliziert. Es wird deshalb bei [68] empfohlen, auf Simulationsverfahren überzugehen. Einfache Anwendungen, bei denen es sich um eine sehr begrenzte Anzahl von Stationen handelt, die z.T. auch über Zwischenspeicher verfügen, sind ausführlich bei [35, 93, 117] beschrieben. Der Einsatz von Markov-Modellen zur Untersuchung des Nutzungsgrades bei Montagelinien ist in der Praxis nur wenig verbreitet. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in der bereits angesprochenen Komplexität der Gleichungssysteme bei größeren Anlagen und zum anderen im mangelnden Datenmaterial für die benötigten Stör- und Reparaturraten zur Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeiten.

2.3.3 Berechnungsverfahren nach Janisch

Neben den beschriebenen allgemeingültigen Verfahren gibt es eine Reihe von problemspezifischen Berechnungsverfahren [3, 17, 107] zur Ermittlung der Effizienz nutzungsgradsteigernder Maßnahmen. Eines dieser Verfahren wird von Janisch [70] beschrieben und dient der Pufferoptimierung von verketteten Fertigungssystemen. Gültig ist die Vorgehensweise lediglich für Linien mit einer kettenförmigen Struktur, d.h. integrierende und vernetzte Systeme lassen sich damit nicht berechnen. Vor der Beschreibung des methodischen Ablaufs müssen folgende grundsätzlichen Randbedingungen genannt werden:

- Die Verfügbarkeit des Gesamtsystems kann maximal den Wert der Verfügbarkeit des schwächsten Gliedes in der Kette annehmen, d.h.

$$V_{ges} \leq V_{imin.};$$

- Durch Pufferung kann lediglich erreicht werden, daß V_{ges} annähernd den Wert von $V_{imin.}$ bekommt. Das bedeutet im Idealfall bei loser Verkettung

$$V_{ges} = V_{imin.};$$

- Die schlechteste Verfügbarkeit des Gesamtsystems ergibt sich bei starrer Verkettung, d.h. ohne jegliche Pufferung. Hierbei führt jeder Stillstand einer Einzelstation zum Stillstand der Montagelinie.

Folglich liegt die reale Verfügbarkeit der Gesamtlinie zwischen den Verfügbarkeitswerten für lose und starre Verkettung der Stationen.

$$V_{lose} > V_{real} > V_{starr}$$

Zur Ermittlung der Gesamtverfügbarkeit bei gepufferten Systemen wird die in Bild 22 dargestellte Vorgehensweise angewendet.

Sukzessiv werden der Reihe nach benachbarte Stationen zu Verkettungselementen zusammengefaßt. Die entstandenen Verkettungselemente bilden dann als Pseudostationen die Verfügbarkeit von Teilsystemen ab. Diese Zusammenfassung wird solange fortgesetzt, bis sämtliche Stationen durch ein Verkettungselement (n-1) abgebildet sind, das identisch mit der Gesamtanlage ist.

Zur Berechnung der minimal zu erwartenden Verfügbarkeit des betrachteten Verkettungselementes wird eine starre Verkettung zugrundegelegt.

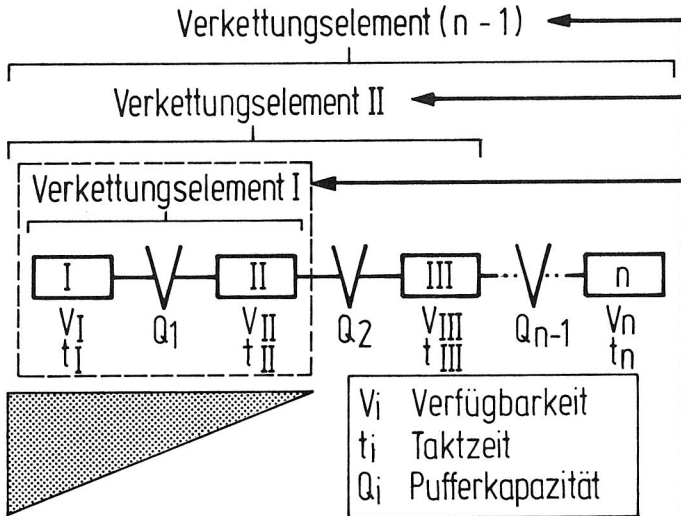
$$V_{starr} = \frac{1}{1 + \frac{1}{t_{TEng}} \sum_{i=1}^n t_{Ti} \left(\frac{1}{V_i} - 1 \right)} \quad (4)$$

V_i Verfügbarkeit der Station i

t_{Ti} Taktzeit der Station i

t_{TEng} Taktzeit der Engpaßstation

① Zusammenfassung zu Verkettungselementen



② Verfügbarkeit bei starrer Verkettung

③ Bestimmung der Elastizität

④ Ermittlung des Verfügbarkeitsgewinns

⑤ Berechnung der Verkettungsverfügbarkeit

Abbildung 22: Vorgehensweise bei der Pufferoptimierung von verketteten Fertigungssystemen nach Janisch

Abhängig von der Größe des Puffers zwischen den Stationen wird die Elastizität E der Verkettung bestimmt, wobei die anzuwendenden Formeln von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen:

- Fall I: Der Engpaß ist deutlich ausgeprägt, was sich in unterschiedlichen Verweildauern der Stationen im Verkettungselement äußert.

$$E_I = \frac{Q * t_{TEng}}{T_{AmazNEng}} \quad (5)$$

$T_{AmazNEng}$ Maximale Ausfalldauer des Nicht-Engpasses

- Fall II: Der Engpaß ist ebenfalls deutlich ausgeprägt. Die Nicht-Engpaßstation hat jedoch eine Verfügbarkeit von mehr als 98%, so daß nur sehr selten mit langen Ausfällen zu rechnen ist.

$$E_I = \frac{2Q * t_{TEng}}{T_{AmazNEng}} \quad (6)$$

- Fall III: Die Stationen haben ein nahezu gleiches Ausstoßverhalten. Ihre Verweildauern unterscheiden sich um weniger als 5%.

$$E_{III} = \frac{Q * t_{TEng}}{6T_{ANEng} + T_{AmazNEng}} \quad (7)$$

T_{ANEng} Ausfalldauer der Nicht-Engpaßstation

Im folgenden Schritt wird aus der Verkettungselastizität und durch empirisch ermittelte Faktoren nach der im Bild 23 vorgestellten Formel der Verfügbarkeitsgewinn, der gegenüber einer starren Anordnung erzielt werden kann, berechnet.

Abschließend kann durch Addition der in Stufe 2 und 4 gewonnenen Verfügbarkeitsdaten die Gesamtverfügbarkeit des Verkettungselementes bestimmt werden.

$$V_I = V_{starr} + V(E) \quad (8)$$

$$\Delta V = (1 - e^{-(\alpha \cdot E)^\beta}) \cdot \Delta V_{\max} \quad \text{mit } \beta = 0,8$$

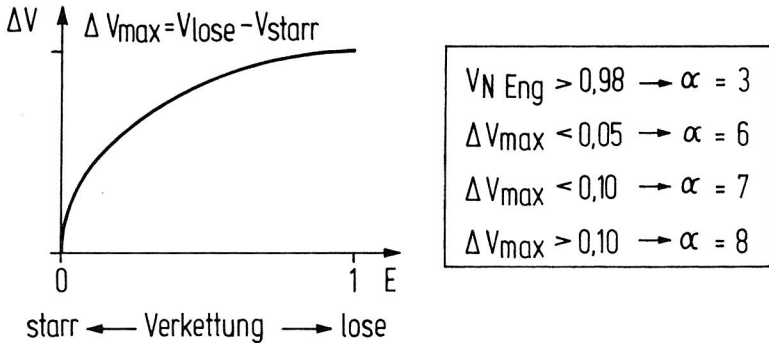


Abbildung 23: Ermittlung des Verfügbarkeitsgewinns durch Puffer

Neben der Einschränkung, daß das vorgestellte Berechnungsverfahren lediglich für rein lineare Systemstrukturen angewendet werden darf, muß an dieser Stelle ein besonderes Augenmerk auf den Einfluß der Ausfalldauern T_A und $T_{A_{\max}}$ gelegt werden.

Wie das in Bild 24 dargestellte Beispiel zeigt, beeinflußt das Ausfallverhalten der Stationen die Verfügbarkeit des Gesamtsystem u.U. ganz entscheidend.

Bei den vorliegenden Kennwerten der Verfügbarkeiten und Taktzeiten ergibt sich ein ähnliches Ausstoßverhalten der Stationen. Die Differenz der Verweildauern beträgt lediglich 1,5%, so daß der Fall III für die Berechnung der Elastizität (Formel 7) zugrundegelegt werden muß. Nach Durchlaufen der Schritte 3, 4 und 5 ergeben sich die Gesamtverfügbarkeiten der Anordnung für die unterschiedlichen Ausfalldauerverteilungen. Die Werte für Fall A und B unterscheiden sich mit 8,2% erheblich. Hieraus muß gefolgert werden, daß bei der Anwendung des Verfahrens von Janisch sehr sorgfältig geprüft werden muß, welche Ausfalldauerverteilung der Berechnung zugrunde gelegt wird. Eine ungenaue Annahme kann das Ergebnis stark beeinflussen.

Zu den mathematisch-physikalischen Modellen nach Bild 19 zählen auch Simulationsmodelle. Mit ihnen lassen sich Maßnahmen zur Verbesserung des Nutzungsgrades sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase bezüglich

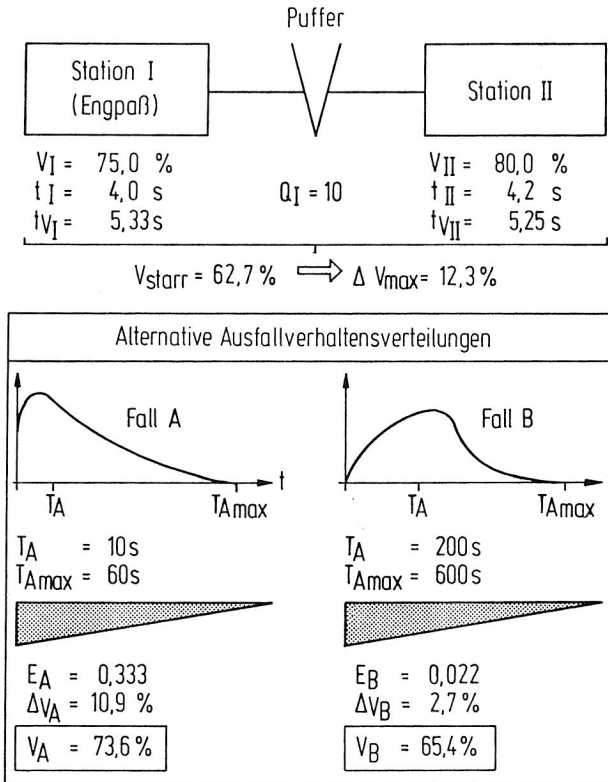


Abbildung 24: Auswirkung unterschiedlicher Ausfalldauerverteilungen auf die Verfügbarkeit verketteter Montagestationen

ihrer Effizienz überprüfen. Die Simulation ist eine Verfahrensart zur Untersuchung des Zeitverhaltens verschiedenartigster Systeme. Im Unterschied zu den beschriebenen Modelltypen ahmt die Simulation nicht nur die Wirklichkeit in der Weise nach, daß sie die Struktur der Realität abbildet, sondern zudem auch das zeitliche Verhalten.

Anhand von Bild 25 sind die Vor- und Nachteile der alternativen Verfahren zur Effizienzanalyse zusammengefaßt.

Bei allen zuvor genannten Verfahren bestehen Grenzen ihrer Anwendbarkeit bei komplexen Systemen, die zudem noch stochastisch bedingte Zustandsübergänge

aufweisen. Durch den Einsatz der Simulationstechnik lassen sich auch komplizierte Probleme behandeln. Sehr drastisch formuliert Stahlknecht [92] die Bedeutung der Simulation: " Wenn man nicht mehr weiter kann, fängt man zu simulieren an". Inwieweit diese Aussage eine Berechtigung hat, und welche Möglichkeiten die Simulation im Produktionsbereich insbesondere für die Montagetechnik bietet, soll im weiteren gezeigt werden.

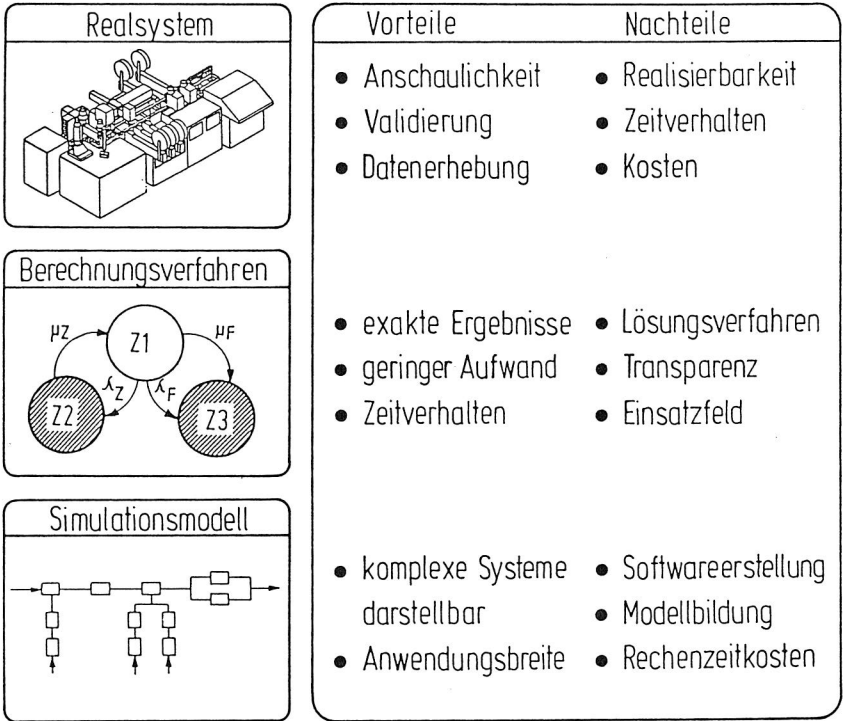


Abbildung 25: Alternative Verfahren zur Effizienzanalyse

2.4 Simulation als Planungsinstrument

Die Simulation wird als ein Weg zur Effizienzanalyse nutzungsgradsteigernder Maßnahmen genannt. Gerade im Planungsstadium gewinnt die Simulationstechnik angesichts der in Bild 26 dargestellten Trends, die sich mit steigender Tendenz in den vergangenen Jahren herauskristallisiert haben, an Bedeutung.

Die Planung verlangt nach systematischen, nachvollziehbaren Hilfsmitteln. Schätzverfahren sind zu grob, um kapitalintensive Anlagen zu dimensionieren. Auch analytische Vorgehensweisen sind aufgrund der Komplexität und der unterschiedlichen Steuerungsstrategien in variantenflexiblen Produktionssystemen nur eingeschränkt anwendbar.

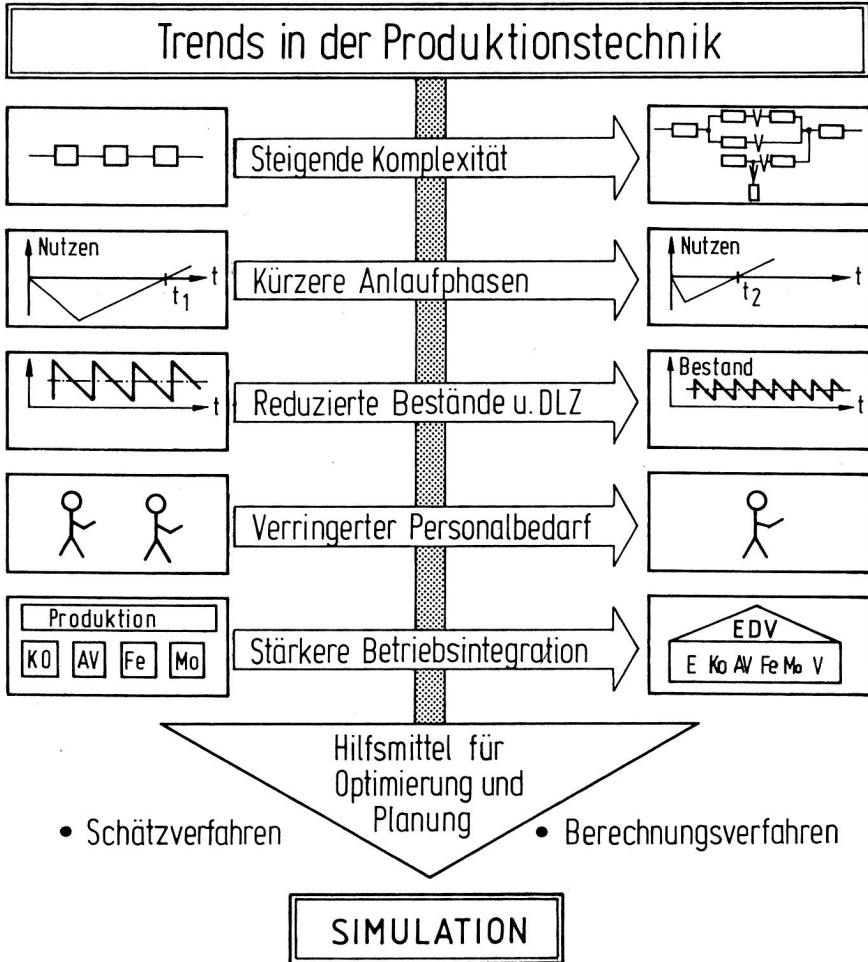


Abbildung 26: Trends in der Produktionstechnik

2.4.1 Einsatzgebiete in der Produktion

Neben der Projektierung von Produktionsanlagen kann die Simulation ebenfalls bei der Optimierung bereits im Betrieb arbeitender Systeme eingesetzt werden. Eine Auswahl der Möglichkeiten, die Simulationsverfahren bieten, zeigt Bild 27.

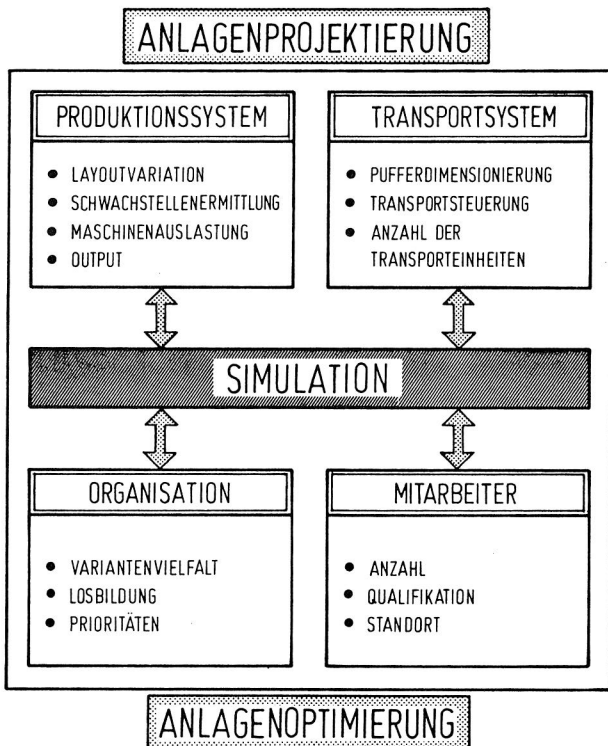


Abbildung 27: Möglichkeiten der Simulation im Produktionsbereich

So lassen sich beispielsweise aus Simulationsläufen die Auswirkungen von Modifikationen des Layouts auf das Gesamtsystem ableiten. Werkstückoutput bzw. Gesamtnutzungsgrad sind hier die Vergleichswerte, die die Qualität der jeweiligen Layoutvariante hervorheben.

Darüberhinaus liefert die Simulation wichtige Informationen bei der Auslegung der Transportsysteme. In diesem Fall besitzen vor allem die Pufferdimensionierung, die Transportstrategie und die Ermittlung der erforderlichen Transportmittel eine hohe Bedeutung.

Desweiteren lassen sich Einflüsse durch die Anzahl, Qualifikation und den Standort der Mitarbeiter am Produktionssystem untersuchen. Sehr wesentlich ist die Einbeziehung organisatorischer Randbedingungen. Probleme durch eine zunehmende Variantenvielfalt und damit u.U. verbundene Rüstzeiten sowie Auswirkungen der Losbildung mit stark schwankenden Größen von mehreren Tausend bis zur Losgröße 1 sind mit Schätzverfahren nicht mehr beherrschbar.

Die Einsatzgebiete der Simulation im Produktionsbereich lassen sich in die in Bild 28 vorgestellten drei Bereiche zusammenfassen.

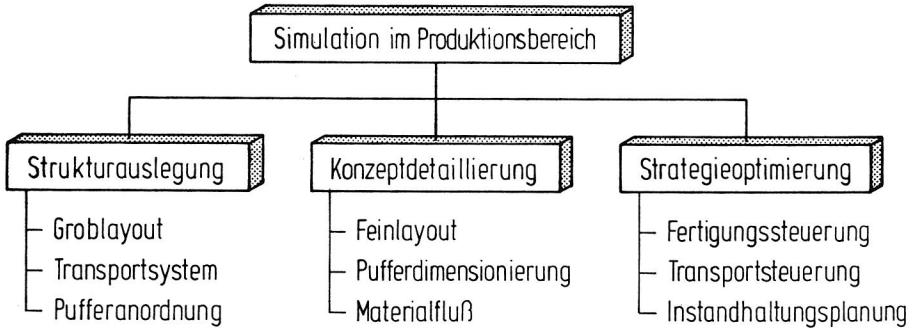


Abbildung 28: Einsatzgebiete der Simulation

2.4.2 Klassifizierung von Simulatoren

Die Palette der am Markt verfügbaren Simulationssoftware ist derart breit, daß eine Klassifizierung unbedingt notwendig erscheint. Das Problem jeder Klassifikation liegt zunächst in der Definition der Unterscheidungsmerkmale. Diese richten sich wesentlich nach der Betrachterperspektive und den durch die Klassifizierung zu erreichenden Ziele.

Ein Klassifizierungsschema, das sich auf das gesamte Spektrum der Simulatoren in allen wissenschaftlichen Disziplinen anwenden läßt, schlägt Schmidt [83] vor. Bild 29 zeigt die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der zugrunde gelegten Kriterien "Paket oder Sprache", "Sprachebene" und "Anwendungsbereich" sowie einige typische Beispiele.

Aus der Perspektive des Montageplaners lassen sich hieraus einige grundsätzliche Empfehlungen ableiten:

- Zur Lösung von Standardproblemen bieten sich aufgrund einer leichten Bedienbarkeit Simulationssprachen an.
- Zur Bearbeitung komplexer Fragestellungen sollten in Kooperation mit dem Simulationsexperten Pakete aufgrund ihres guten Adaptionsvermögens an die Problemstellung eingesetzt werden.
- Als Simulationswerkzeug für den Montageplaner sind systemorientierte Simulatoren besonders geeignet, da für ihren Einsatz kein Simulationsexperte erforderlich ist.

Schema	Unterscheidungsmerkmal	Beispiel
Paket oder Sprache	<ul style="list-style-type: none"> • Unterprogramm-bibliothek • Aufruf von Anweisungen 	GPSS- FORTRAN GPSS, SLAM
Sprachebene	<ul style="list-style-type: none"> • Niedere Simulatoren • Höhere Simulatoren • Systemorientierte Simulatoren 	SIMULA, GASP GPSS SIMU, MOMOS
Anwendungsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Diskret • Kontinuierlich • Kombiniert 	GPSS ACSL GPSS- FORTRAN

Abbildung 29: Klassifizierungsschema nach Schmidt [83]

Die Klassifizierungskriterien sind voneinander unabhängig. So ist beispielsweise GPSS-FORTRAN Version 3, auf das ausführlich in Kapitel 4 eingegangen wird, ein Paket. Es gehört zu den höheren Simulatoren und beinhaltet als Anwendungsbereiche sowohl diskrete als auch kontinuierliche Modelle.

Ein anderes Klassifizierungsschema beschreibt Soliman [88]. Seine Übersicht beschäftigt sich mit Simulationssprachen und -paketen, die für die Codierung diskreter fertigungstechnischer Modelle verwendet werden (s. Bild 30).

Die vorgestellten Schemata erlauben eine Klassifizierung existierender Simulationssoftware nach unterschiedlichen Kriterien. Je nach Fragestellung lassen sich

Schema	Unterscheidungsmerkmal	Beispiel
Systemtyp	<ul style="list-style-type: none"> • Diskret • Kontinuierlich 	SIMSCRIPT CSSL
Sprach- flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> • Universalsprache • Spezialsprache 	FORTRAN SIMSCRIPT
System- struktur	<ul style="list-style-type: none"> • Ereignisorientierung • Aktivitätsorientierung • Prozeßorientierung 	SIMSCRIPT CSL SIMULA
Semantische Ebene	<ul style="list-style-type: none"> • Modellgenerator • Strukturorientiert • Prozedurorientiert 	SIMQUEUE SIMULAP SIMSCRIPT

Abbildung 30: Klassifizierungsschema nach Soliman [88]

den einzelnen Klassen Vor- und Nachteile zuordnen. Insbesondere dem Simulationsexperten wird hierdurch eine Möglichkeit geboten, eine nach den vorliegenden spezifischen Fragestellungen gerichtete Auswahl zu treffen. Aufgrund der fehlenden Detailkenntnis wird jedoch der Planer im allgemeinen überfordert sein, eine Entscheidung zu fällen, inwieweit sein Problem eine Bearbeitung mit dem einen oder anderen Simulator zuläßt. Aus diesem Grunde wird in der vorliegenden Arbeit eine Gliederung der in der fertigungstechnischen Literatur beschriebenen Simulatoren nach deren hauptsächlichen Einsatzbereichen vorgenommen.

Für die Simulation in der Produktionstechnik kommen vornehmlich anwendungsorientierte Programmsysteme oder problemorientierte Sprachen zum Einsatz, die insbesondere für die Lösung von Standardproblemen gut geeignet sind. Darüberhinaus finden für komplexere Fragestellungen auch höhere Simulatoren, wie z.B. SIMAN, SLAM oder GPSS Verwendung. Hier wird in aller Regel ein Simulationsexperte bei der Modellerstellung und Durchführung mitwirken. Nach den spezifischen Fragestellungen läßt sich eine Gliederung der Simulatoren in die drei Anwendungsgebiete "Flexible Fertigungssysteme", "Montagesysteme" und "Materialflußsysteme" durchführen (Bild 31).

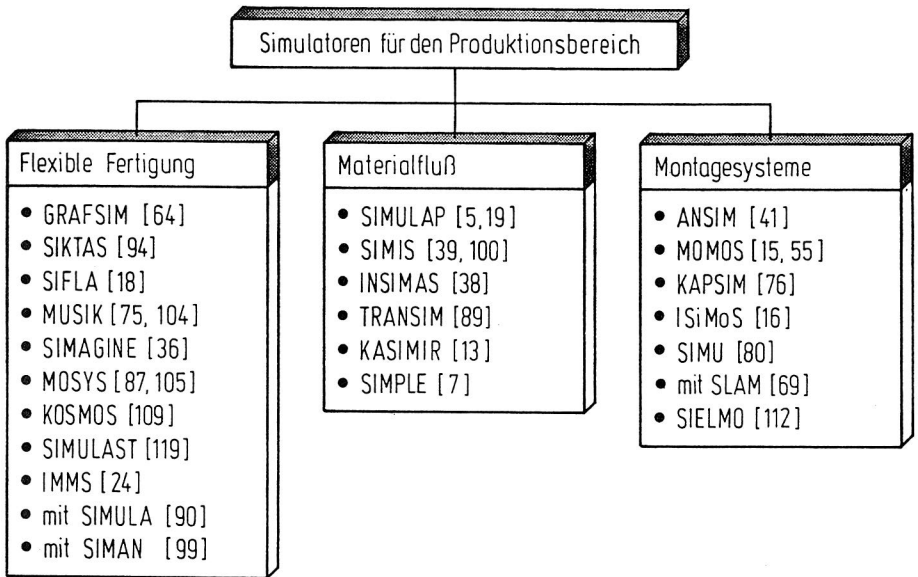


Abbildung 31: Gliederung der Simulatoren nach Anwendungsgebieten in der Produktionstechnik

Bedingt durch die Aufgaben und Strukturen von "Flexiblen Fertigungssystemen" verfolgt die Simulation hier zumeist das Ziel einer Optimierung der Kapazitätsauslastung bei verringerten Durchlaufzeiten und einem möglichst geringen Umrüstaufwand. Das setzt insbesondere voraus, daß neben der Abbildung des Layouts vor allem die Modellierung variierender Bearbeitungsstrategien und Auftragszusammensetzungen im Mittelpunkt steht. Für die Bearbeitung der Werkstücke ist zu unterscheiden, ob die Stationen gleiche Bearbeitungsfunktionen ausführen können oder eine Verkettung unterschiedlicher NC-Maschinen vorliegt. Im zweiten Fall muß ein Werkstück zu seiner Fertigbearbeitung unterschiedliche Maschinen ansteuern, wobei eine Zwischenlagerung unumgänglich ist.

Im Vergleich zur Fertigung stehen bei der Untersuchung von Materialflußsystemen

andere Zielsetzungen im Vordergrund. Die globale Aufgabe von Transportsystemen liegt in einer effizienten Ver- und Entsorgung der Produktionsbereiche mit Material und Hilfsmitteln. Simulationsstudien verfolgen in diesem Bereich bei vorgegebenen Fertigungssteuerungsstrategien vornehmlich die Intention, optimierte Fahrkurse und die notwendige Anzahl von Transporteinheiten zu finden. Die Materialflußsimulation ist in der Praxis bereits relativ weit verbreitet.

Im Gegensatz dazu sind für die Simulation in der Montage und bei der Produktion von Flachbaugruppen nur Einzelfälle bekannt (vgl. Bild 31). Die Ursache hierfür liegt sicher auch in der Tatsache, daß dieser Produktionsbereich sehr spät als Rationalisierungspotential entdeckt wurde und somit eine systematische Automatisierung erst in jüngster Zeit durchgeführt wird. Ließen sich Planungsfehler früher durch den Einsatz oder Umbesetzung von Personal weitgehend nachträglich korrigieren, so ist die Flexibilität kostenintensiver Automatisierungslösungen nur sehr begrenzt. Entsprechend gewinnt eine nach allen Seiten abgesicherte Planung dieser Systeme zunehmend an Bedeutung. Die spezifischen Belange der Simulation von Montage- und Bestückungssystemen werden in Kapitel 3.2 besonders behandelt.

2.4.3 Exemplarische Simulationen im Produktionsbereich

Einige ausgewählte Beispiele sollen die Möglichkeiten und den Aufbau der Simulatoren in den vorgestellten Anwendungsbereichen verdeutlichen. Ein Programmpaket, das benutzerfreundlich mit Grafikunterstützung die Simulation Flexibler Fertigungssysteme erlaubt, ist das Simulationssystem GRAFSIM [64]. Besonderer Wert wurde auf die Gestaltung der Bedienoberfläche gelegt, so daß der Planer oder Bearbeiter ohne die Unterstützung durch einen Simulationsexperten das Modell einer Fertigungsanlage erstellen und Experimente durchführen kann.

Mit GRAFSIM steht ein Werkzeug zur Bewertung des Anlagenentwurfs von FFS, der Beurteilung alternativer Systemlösungen und Optimierung von Anlagenkomponenten zur Verfügung. Desweiteren hilft es bei der Zusammenstellung optimaler Auftragsreihenfolgen.

Der Simulator ist in mehrere Programme gegliedert, deren wichtigste im Bild 32 dargestellt sind.

Mit dem Modelleditor kann auf dem Farbgrafikschirm ein Anlagenbild aus grafischen Symbolen erstellt bzw. geändert werden. Der Arbeitsplaneditor erlaubt die

Eingabe der gewünschten Stückzahlen zu den jeweiligen Aufträgen sowie das Erstellen und Ändern der Arbeitspläne über Masken. Zur Vermeidung von Fehlern erfolgt die Überprüfung des Arbeitsplans auf Übereinstimmung mit dem Anlagenabbild.

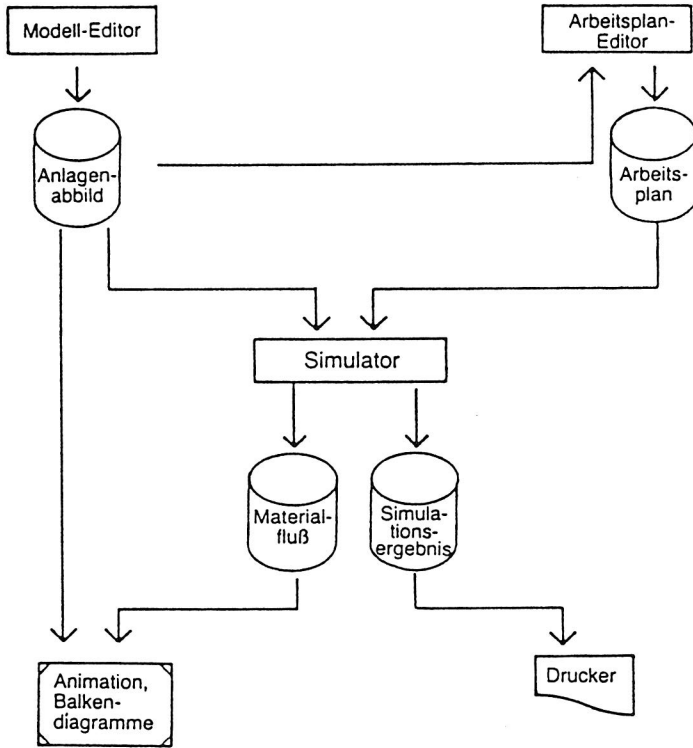


Abbildung 32: Das Simulationsprogramm GRAFSIM

Im Simulationsprogramm werden die Abbild- und Stückzahldaten sowie die Arbeitspläne eingelesen. Die Abarbeitung der Aufträge auf der definierten Anlage wird simuliert und eine Bilddatei mit Informationen für das Auswertungsprogramm angelegt. Parallel hierzu wird eine Protokolldatei mit Ergebnisdaten erstellt.

Das Programm zur grafischen Ergebnisdarstellung liest die Bilddatei und ermöglicht die Darstellung der während der Simulation aufgetretenen Zustandsübergänge.

Die weiteren Entwicklungsziele von GRAFSIM liegen insbesondere in der On-Line-

Simulation zur Unterstützung der Betriebsführung eines FFS und der Werkzeugsimulation, die den Werkzeugbedarf ermitteln und die Transporte optimieren soll.

Ein Programm zur Simulation von Transportsystemen ist TRANSIM [89]. Es gliedert sich in zwei unabhängige Programme für die Grob- und Feinplanung von Materialflußsystemen. Bei beiden erfolgt sowohl die Modellierung als auch die Simulation interaktiv. Die Beschreibung des Transportsystems wird durch bereitgestellte Bildschirmmasken vorgenommen. Im Grobsimulator TRANSIM-III wird die Modellwelt in drei Modellierungsebenen gegliedert. In der Ebene Fördertechnik stehen dem Benutzer sechs vordefinierte Bausteintypen, wie beispielsweise Förderstrecke, Arbeitsstation oder Verteilelement zur Verfügung, denen aktuelle Parameter zuzuordnen sind. Die zweite Ebene verlangt die Formulierung von Steuerungsregeln für die Bausteine Verteilelement, Zusammenführungselement und Arbeitsstation. In der Modellierungsebene "Umweltbeschreibung" wird den Bausteintypen "Quelle" und "Senke" das Zeitverhalten zugeordnet.

Im Feinsimulator TRANSIM-II sind die Modellbildungsebenen analog aufgebaut. Die Abbildungsgenauigkeit unterscheidet sich prinzipiell in den Punkten Baugruppentypkonzept und Steuerungskonzept.

Vor der eigentlichen Simulation des Materialflußsystems übernimmt ein Generator die Erzeugung von PASCAL-Prozeduren aus der Modellbeschreibung. Nach durchgeführtem Simulationslauf werden die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Vergleichbar mit dem Zeitversatz der Rechnerintegration bei Fertigung und Montage vollzieht sich die Entwicklung von leistungsfähigen Simulatoren für die Montage. Neben einigen Simulationsstudien, die auf den Sprachen GPSS-FORTRAN oder SLAM beruhen, gibt es nur sehr wenig Simulationssysteme, die speziell die Belange der Montage berücksichtigen.

Ein Simulationssystem, das bei der Planung von elastisch verketteten Montageanlagen eingesetzt werden kann, ist SIELMO [112]. Es wurde in der Programmiersprache TURBO PASCAL entwickelt und läuft unter dem Betriebssystem MS-DOS auf einer Workstation.

Das Prinzip der Simulation basiert auf einer ereignisorientierten diskreten Zeitfortschreibung mit einer direkten Identifizierung der im Montagesystem umlaufenden Werkstückträger. SIELMO bietet dem Benutzer zur Modellbildung eine Reihe von Bausteinen, wie z.B. "Station", "Puffer", "Übergabe" sowie zur Steuerung des Anlagenbetriebs. Während des Simulationslaufs besteht die Möglichkeit, durch die

Animation, das Betriebsverhalten der Anlage grafisch darzustellen und insbesondere Engpässe in der Logistik aufzuzeigen.

Die primären Ergebnisse, die mit SIELMO erzielt werden können, sind die Bestimmung der erforderlichen Werkstückträgerzahl, die Darstellung des Nutzungsgrades und der Durchlaufzeit.

Ein weiteres Beispiel für die Simulation von Montagesystemen ist MOMOS [15]. Der Montage-Modell-Simulator eignet sich vor allem für Anlagen, bei denen der Mensch, der in einem automatisierten Umfeld arbeitet, im Mittelpunkt steht. Planer und Betreiber von Montagesystemen werden mit MOMOS bei der Grob- und Feinplanung sowie bei Realisierung und Betrieb der Anlage unterstützt. Exemplarisch wird die Anwendung dieses Simulators für die Planung einer Automobil-Montage beschrieben. Kennzeichnend ist die interaktive Vorgehensweise von der Modellierung über die Simulation bis zu deren Auswertung. Die Beschreibung des "Modellsystems" erfolgt durch Parameter. Aus MOMOS wird automatisch ein Simulationsprogramm, das auf der Sprache SLAM basiert, erzeugt. Angesichts der Tatsache, daß dieser Simulator bereits für die Simulation von Montageabläufen mit Taktzeiten von mehreren Minuten einen Minirechner benötigt, erscheint die Praktikabilität bei kurzzyklischen Abläufen, wie sie in der elektrotechnischen Industrie üblich sind, als sehr fraglich. Eine Alternative hierzu ist der Simulator SIMU, auf den in Kapitel 5 näher eingegangen wird.

Neue Entwicklungen der Simulation in der Fertigungstechnik zeigen, daß die Grenzen zwischen Fertigung, Montage und Materialfluß fließend sind und die drei Anwendungsgebiete z.T. mit nur einem Simulator bearbeitet werden können. Aufgrund der beschränkten Bausteinzahl und den eingeschränkten Möglichkeiten der Abbildung von Steuerungsstrategien lassen sich jedoch insbesondere Sonderfälle, wie sie z.B. die SMD- Bestückungstechnik darstellt, nur stark abstrahiert abbilden.

Der Simulator SIMIS 3 [69] beispielsweise dient zur Simulation komplexer Fertigungs- und Transportanlagen, aber auch zur Modellierung von Montagetätigkeiten z.B. in der Automobilproduktion. SIMIS 3 läßt sich vom Planer selbst einsetzen. Nach dem Baukastenprinzip wird das Modell aus fördertechnischen und strategischen Bausteinen zusammengesetzt. In fünf Ebenen kann der Benutzer sein System übersichtlich modellieren. Dabei bietet ihm die Programmierenebene eine Schnittstelle zur Integration eigener Pascal-Quellcodes zur Abbildung benutzerspezifischer Strategien zur Baustein- oder Netzwerksteuerung. Dadurch eliminiert dieser Simulator den typischen Nachteil eines Paketes, der in einer mangelnden

Flexibilität liegt.

Ein weiteres modular aufgebautes Simulationssystem ist GISA (Graphisch interaktive Simulation und Animation). Es wurde konzipiert, um Planer, die über keine speziellen Programmier- und Simulationskenntnisse verfügen, bei der Projektierung von Produktionssystemen zu unterstützen. Der Einsatz ist sowohl im Bereich Fertigung und Montage als auch für das Transportsystem vorgesehen. Das Programmsystem besteht aus den fünf Modulen: Problembeschreibung, Programmgenerierung, Simulation, Ergebnisaufbereitung und -darstellung [50].

In einem grafisch-interaktiven Dialog hat der Benutzer die Möglichkeit, sein System durch spezifische Modellelemente mit einem relativ niedrigen Abstraktionsgrad objektorientiert abzubilden.

Basierend auf dem erstellten Layout und der dazugehörigen Elementdetaillierung erstellt das Programm selbsttätig ein ablauffähiges Simulationsprogramm in der Sprache SLAM II. Die Ergebnisdarstellung sowie die Animation basieren auf der Standardgrafiksoftware GKS, wodurch eine Abhängigkeit von bestimmten Hardwarekonfigurationen vermieden wird.

Der prinzipielle Ansatz von GISA scheint nicht zuletzt durch die vorgesehenen Schnittstellen zu peripheren Planungsbereichen zukunftsweisend zu sein. Die Bewährung in der Praxis wird jedoch in einem hohen Maße abhängig von der Anzahl und Flexibilität der Modellelemente sein. Ebenso läßt sich aus den vorliegenden Informationen noch keine Aussage über die Möglichkeiten der Abbildung unterschiedlicher Fertigungssteuerungsstrategien machen.

3 Simulation in der Montagetechnik

Die Montage als letzter Schritt in der Fertigungskette eines Produktes beinhaltet eine Reihe von Problembereichen. Terminabweichungen, die in den vorgelagerten Bereichen entstanden sind, müssen nicht selten hier wieder ausgeglichen werden. Das führt gerade angesichts sich ständig verkürzender Innovationszyklen und trotz umfangreicher Standardisierungsbemühungen zu Schwierigkeiten. Zu den terminlichen Anforderungen kommen hohe Qualitätsansprüche hinzu. Die Einhaltung eines definierten Qualitätsniveaus wird häufig erschwert durch stark streuende Toleranzen der zu montierenden Gerätebaugruppen und Zulieferteile, die Fehler im Zuführ- und Fügeprozeß nach sich ziehen.

Änderungen in der Gerätekonstruktion und Auftragsstruktur wirken sich durch die geringe Flexibilität heute existierender Montagesysteme besonders negativ aus. Abhilfe läßt sich nur durch eine Verbesserung der Anpassungsfähigkeit an schwankende Stückzahlen und sich verändernde Varianten schaffen. Die Integration von Industrierobotern und freiprogrammierbaren Vorrichtungen und Prüfsystemen ist sicher technisch ein Lösungsansatz, scheidet jedoch oft an der Wirtschaftlichkeit. Lediglich die Einbeziehung sich verändernder äußerer Randbedingungen auf ein Montagesystem bereits in der Planungsphase kann den Betreiber der Anlage vor schwerwiegenden Problemen in der Inbetriebnahme bewahren.

3.1 Einsatz der Simulation im Lebenszyklus von Montagelinien

3.1.1 Rechnergestützte Montageplanung

Eine zielgerechte Erarbeitung optimaler Lösungen im Planungs- und Projektierungsstadium von Montagesystemen setzt die Integration rechnerunterstützter Methoden voraus. Die Verfahrenskette der Montageanlagenplanung beginnt mit einer detaillierten Analyse des Produktes (s. Bild 33).

Dabei gilt es, das zu fertigende Gerät hinsichtlich der erforderlichen Montagetechnologien zu untersuchen. In diesem ersten Schritt zeigt sich, inwieweit bereits in der Produktentwicklung und -konstruktion die Regeln der montagegerechten Gestaltung beachtet wurden. Nicht selten können zu diesem Zeitpunkt noch Maßnahmen in Abstimmung mit dem Gerätekonstrukteur getroffen werden, um

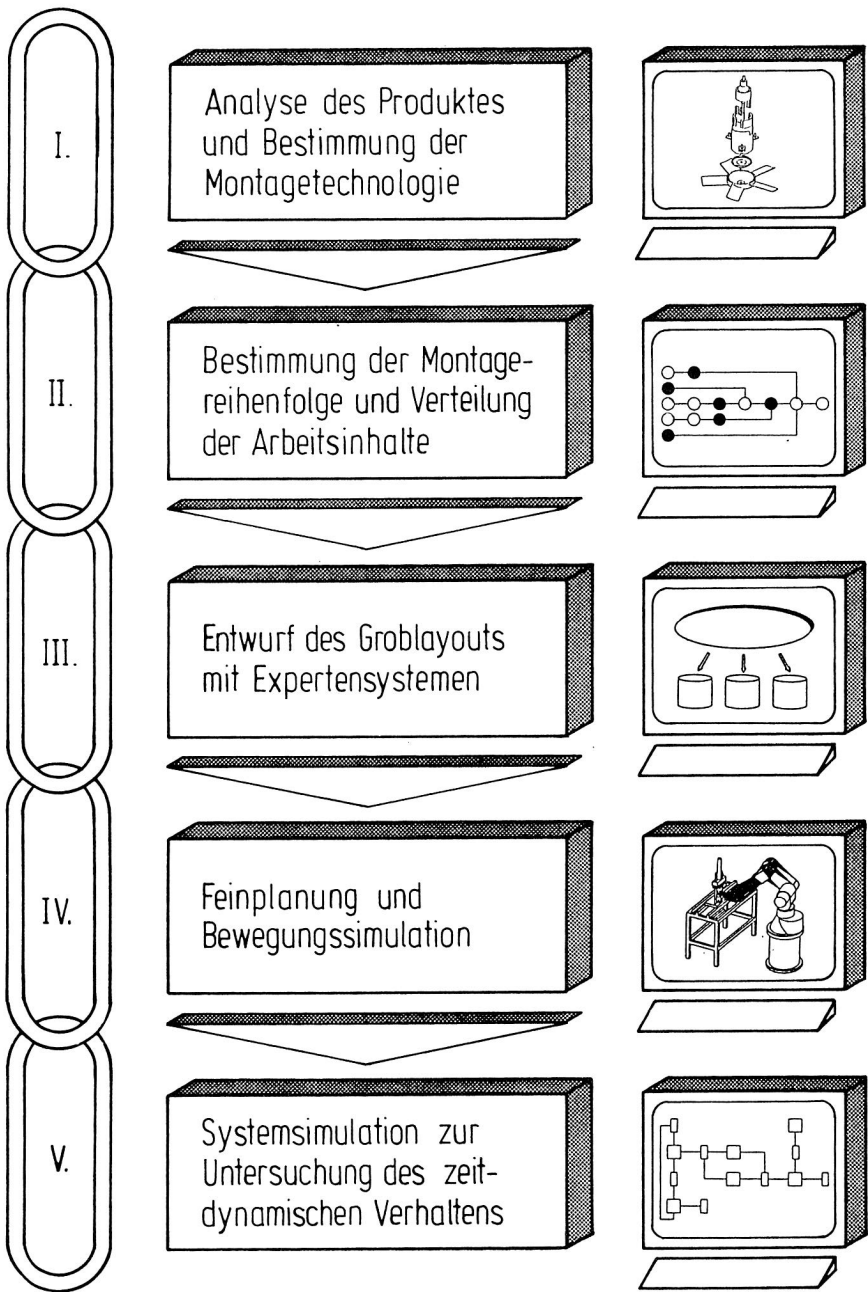


Abbildung 33: Verfahrenskette in der rechnergestützten Montageplanung

den Montageablauf zu vereinfachen und somit Kosten zu sparen.

Nach der Analyse wird die Montagereihenfolge festgelegt und die Zuordnung der Arbeitsinhalte zu den jeweiligen Fügestationen unter Berücksichtigung möglichst kurzer Verlustzeiten getroffen. Ein hierfür geeignetes rechnerunterstütztes Verfahren basiert auf der Theorie der Vorranggraphen und wird von Nolting [67] beschrieben.

Ein erster Layoutvorschlag läßt sich dann durch Anwendung eines Expertensystems gewinnen, das zur Darstellung seiner Ergebnisse mit einem CAD-System gekoppelt wird [43]. Wesentliche Komponenten dieses Expertensystems sind die Wissensbasen, in denen zum einen in sogenannten Frame-Konstrukten Informationen über Geräte, Teile und Technologien gespeichert sind und zum anderen Regelwerke, die die Entscheidungskriterien von Systemplanern abzubilden versuchen.

Im Rahmen der Feinplanung erfolgt die detaillierte Abstimmung der räumlichen Anordnung in den Montagezellen unter Einbeziehung der Bewegungssimulation von Vorrichtungen, NC- Achsen und Industrierobotern. Mit den rechnergestützten Entwürfen ergeben sich durch die grafische Simulation der Bewegungen zusätzliche Möglichkeiten einer optimalen Systemgestaltung [30]. Bereits in der Entwurfsphase können Kollisionen erkannt werden und beim späteren Programmieren der Montagegeräte lassen sich die Bewegungen aktuellen Konfigurationen besser anpassen. Die Anlagenabbildung kann dynamisch oder mit einer schrittweisen Einzelbilddarstellung erfolgen.

Den Abschluß in der Verfahrenskette bildet die Anlagensimulation. Sie basiert auf den Ergebnissen der vorangegangenen Planungsschritte und kann durch Abbildung der Systemstruktur und den die einzelnen Montagestationen beschreibenden Kennzahlen das zeitvariante Verhalten des Gesamtsystems untersuchen. Eine wichtige Zielsetzung liegt hier u.a. in der Dimensionierung der Transport- und Puffersysteme, die den zu erwartenden Nutzungsgrad der Anlage stark beeinflussen.

Der hier vorgestellte Planungsablauf ist in seiner Abarbeitungsreihenfolge nicht als starr zu betrachten. Erkenntnisse in der Feinplanung können durchaus Veränderungen im Groblayout führen und auch die Ergebnisse der Simulationsstudie verlangen oft Veränderungen im Zellenaufbau. Deswegen ist es unerlässlich, Rücksprünge zu vorgelagerten Schritten im Rechnerdialog zu ermöglichen.

3.1.2 Betrieb von Montageanlagen

Ein hohes Maß an Bedeutung haben Simulationstudien an bereits existierenden Montagesystemen. Hier sind insbesondere drei Ansätze zu unterscheiden (Bild 34).

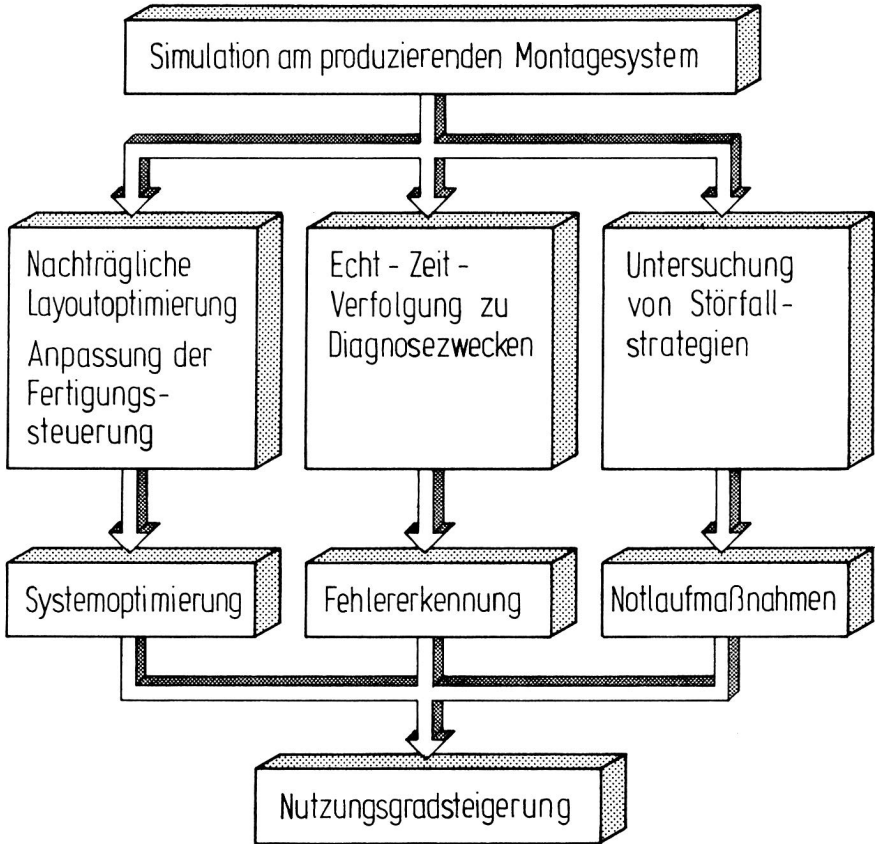


Abbildung 34: Ansätze für Simulationsstudien an produzierenden Montagesystemen

Den Anstoß für eine Simulation einer produzierenden Anlage können z.B. nicht erreichte Stückzahlen oder eine Veränderung des Auftragsprofils bilden. In diesen Zusammenhängen müssen Maßnahmen ergriffen werden, die einerseits sehr kostspielig sein können und andererseits mit der Stilllegung des Montagesystems über

einen gewissen Zeitraum verbunden sind. Vor der konstruktiven Realisierung ist es unabdingbar, diese Modifikationen auf ihre Effizienz für das Gesamtsystem zu untersuchen. Hier bietet sich die Simulation an, um Fragen des Layouts und der Fertigungssteuerung zu untersuchen.

Der zweite Ansatz basiert auf einer in Echtzeit parallel zur realen Anlage laufenden Simulation. Es besteht durch den Vergleich der Ist-Daten aus dem Prozeß mit den in der Simulation gewonnenen Sollwerten die Möglichkeit, den Anlagenzustand zu überwachen. Eine Abweichung läßt frühzeitig auf Fehler im Montagesystem oder in der Steuerung schließen.

Für diese Anwendung sind jedoch in der Literatur noch keine realen Fälle beschrieben worden.

Als weiteres Ziel einer Simulation produzierender Anlagen ist die Untersuchung von Störfallstrategien zu nennen. Gerade bei Anlagen für oft wechselnde Varianten, die deshalb viele Verzweigungen und Redundanzen beinhalten, sind Notlaufmaßnahmen frühzeitig zu planen. So kann mit der Simulation einerseits die Auswirkung eines Ausfalls einzelner Anlagenkomponenten auf das Gesamtsystem analysiert werden und andererseits lassen sich kurzfristige Veränderungen in der Auftragsstruktur, beispielsweise durch Eilaufträge, in ihrer Tragweite abschätzen.

Ein grundsätzlicher Vorteil der Simulation von produzierenden Montagesystemen gegenüber geplanten liegt in der vereinfachten und sicheren Datenbeschaffung.

3.1.3 Abstraktion und Detaillierung im Lebenszyklus

Bei einer Betrachtung des Einsatzfeldes der Simulationstechnik im Lebenszyklus eines Montagesystems wird vor allem die Veränderung von Detaillierungs- und Abstraktionsgrad der Modelle deutlich (Bild 35).

Mit einer fortschreitenden Planung verringert sich stufenweise der Abstraktionsgrad bei gleichzeitig steigender Detaillierung. Die in der Fertigungsplanung zu berücksichtigenden Einzelheiten, zu denen u.a. auch Auftragsschwankungen und Maschinenstillstände gehören, müssen durch entsprechende detaillierte Modelle abgebildet werden. Während gegenwärtig die Simulation primär als quantitatives Planungshilfsmittel eingesetzt wird, so gewinnt sie in Anbetracht einer zunehmenden Automatisierung der Montagetechnik als betriebsbegleitende Systemführung an Bedeutung. Hier bekommt besonders die hohe Abbildungsgenauigkeit der Mo-

delle einen hohen Stellenwert.

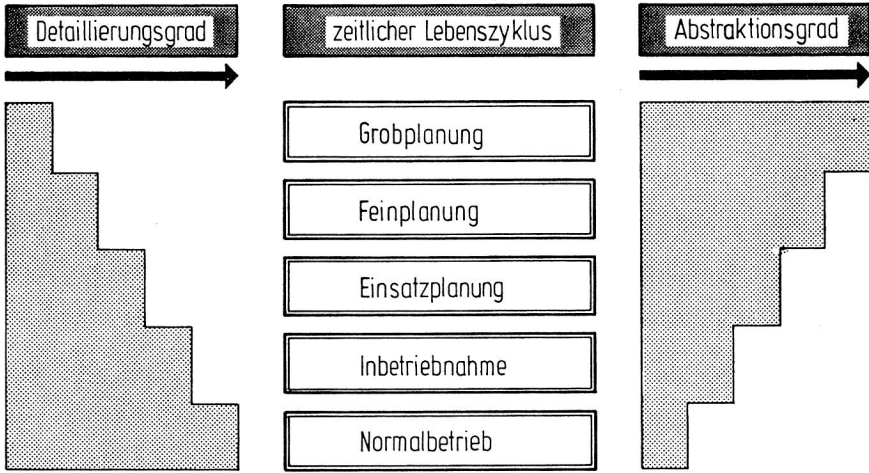


Abbildung 35: Detaillierungs- und Abstraktionsgrad von Simulationsmodellen im Lebenszyklus von Montageanlagen

3.2 Spezifische Anforderungen der Montage an die Simulation

Bislang standen bei der Projektierung von Montagesystemen die Erfahrungen und die individuellen Gewohnheiten der Planer im Vordergrund. Kritische Engpässe wurden häufig nicht erkannt oder bestenfalls durch grobe Schätzverfahren dimensioniert. Aufgrund der Komplexität in der Montage, die sich aus der Problemstellung, eine Vielzahl unterschiedlicher Einzelteile an einem Ort zu einem konkreten Zeitpunkt zusammenfügen zu müssen, ergibt, reicht eine Planung allein auf der Basis von Erfahrungswerten nicht mehr aus.

Da jedoch in Montageanlagen zufallsabhängige Ereignisse das Betriebsverhalten wesentlich beeinflussen, sind auch mathematischen Berechnungsverfahren Grenzen gesetzt. Zustandsänderungen lassen sich lediglich durch Mittelwerte oder einfache Verteilungsfunktionen ihrer Dauer und Häufigkeit analytisch abbilden. Zur Lösung von Dimensionierungsproblemen sind allerdings Extremsituationen, wie sie beispielsweise bei Störungen oder Auftragsspitzen auftreten, von einem besonderen Interesse.

Bei der Planung und für den Betrieb von automatisierten und teilautomatisierten Montagesystemen sind vor allem zwei Fragenkomplexe wichtig, die mit Hilfe der Simulationstechnik behandelt werden können. Zum einen sind hier Probleme bzgl. des Systemlayouts zu klären und zum anderen müssen Strategien zum steuerungs-technischen Ablauf untersucht werden.

3.2.1 Typische Montagesystemstrukturen

In der Montage finden sich ähnlich wie in der Fertigung immer wieder typische Prinzipanordnungen der Arbeitsplätze und ihrer Verkettung. Das gilt sowohl für die Herstellung elektromechanischer Geräte als auch für die Bestückung von Flachbaugruppen mit elektronischen Bauelementen. Die Wahl des jeweiligen Montageprinzips wird durch eine Reihe von Einflußfaktoren geprägt. Hierzu gehören zunächst produktspezifische Anforderungen, wie beispielsweise die Montagereihenfolge, Varianten- und Stückzahl, aber auch unternehmensspezifische Besonderheiten.

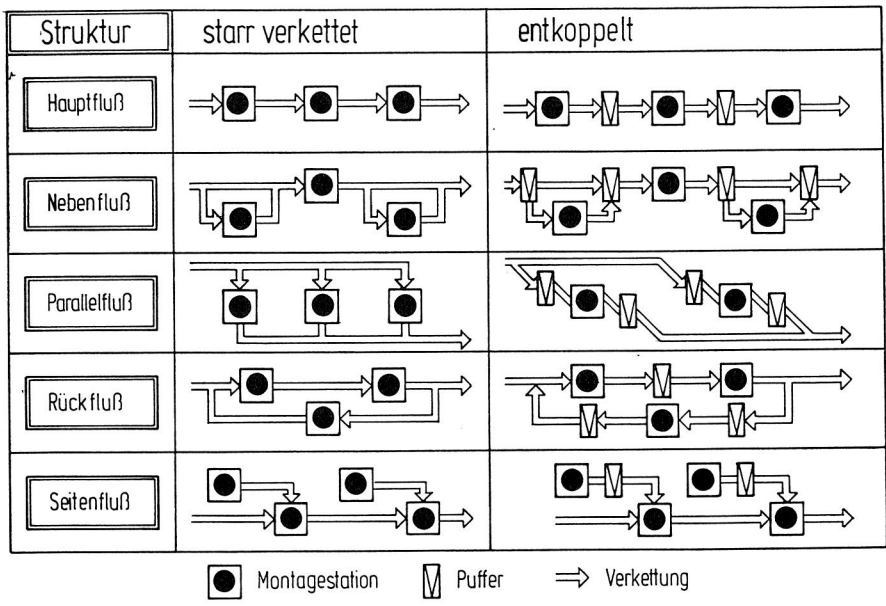


Abbildung 36: Typische Strukturprinzipien von Montagesystemen

Zur modellhaften Darstellung der Vielgestaltigkeit denkbarer Montagesystemstrukturen im Hinblick auf Simulationsstudien lassen sich die in Bild 36 dargestellten

Strukturprinzipien als Grundtypen herausstellen.

Reale Anlagen entsprechen nur selten eindeutig einem dieser Typen; vielmehr liegen zumeist Kombinationen mehrerer Grundtypen vor.

Die Hauptflußstruktur beispielsweise ist typisch für Produkte mit geringer Varianz, aber hohen Stückzahlen. Von der funktionalen Betrachtungsebene gesehen, sind hier sowohl in Reihe angeordnete Maschinen als auch beispielsweise Rundtaktautomaten einzuordnen.

Die Nebenflußstruktur bietet sich insbesondere dort an, wo manuelle und automatisierte Arbeitsplätze eng miteinander verflochten sind, so daß eine Taktentkopplung realisiert werden kann. Karreeanordnungen mit Pufferumlaufbändern gehören u.a. in diese Kategorie von Prinzipianordnung.

Vor allem dort, wo Montagestationen mit geringer Flexibilität eingesetzt werden, jedoch aufgrund der Varianz der zu fertigenden Geräte unterschiedliche Operationen auszuführen sind, bieten sich Parallelstrukturen an. Das gilt auch dann, wenn der Arbeitsinhalt besonders zeitintensiv ist und somit redundante Stationen erforderlich werden.

Sehr typisch für Montagesysteme mit integrierten Prüfarbeitsplätzen sind Rücklaufstrukturen. Nach Erkennung einer Fehlfunktion muß das entsprechende Gerät entweder direkt zur vorgelagerten Montagestation zurückgeschleust werden oder über den Zwischenschritt der Nacharbeit wieder in den Montageprozeß integriert werden können.

Eine weitere montagetypische Prinzipianordnung ist die Nebenlinienstruktur. In diesen Nebenlinien werden Gerätebaugruppen vorgefertigt bzw. vormontiert. Der Vorteil liegt einerseits in der Entkopplungsmöglichkeit von der Hauptlinie durch entsprechende Puffer und andererseits in der Flexibilität, durch Zuschalten verschiedener Nebenlinien eine große Varianz in stark schwankenden Stückzahlen zu montieren.

Die vorgestellten fünf idealisierten Prinzipianordnungen lassen sich durch die in Bild 37 gezeigten Modellelemente simulationstechnisch abbilden.

Einen wichtigen Bestandteil der Modellelemente stellen die Transportstrecken dar. In Kapitel 3.3.2 wird auf diese Problematik, die sehr stark durch die Abstraktionsebene beeinflusst wird, näher eingegangen.

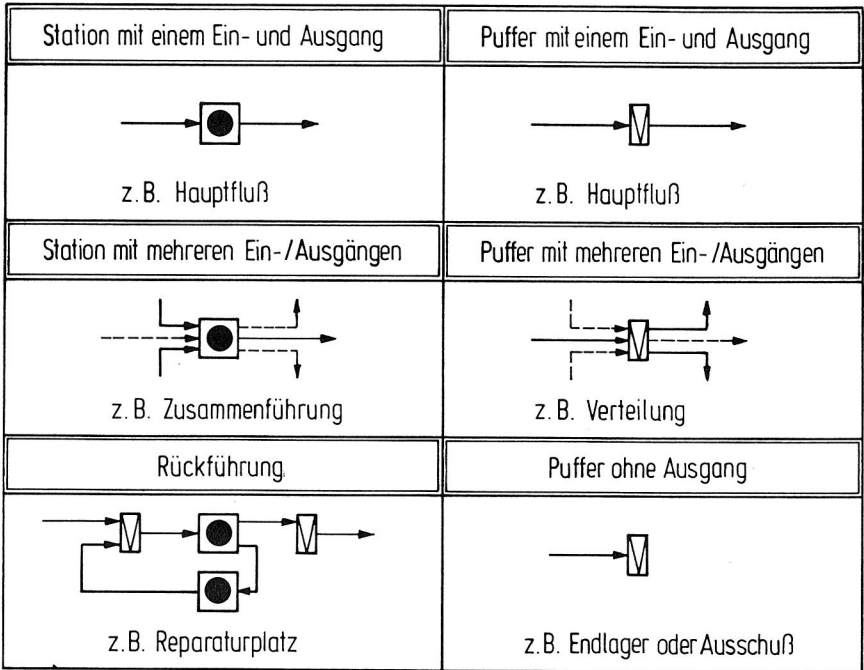


Abbildung 37: Modellelemente zur Simulation von Montagesystemen

3.2.2 Besonderheiten der Montagesystemsteuerung

Im Vergleich zur Vorfertigung sind in der Montage deutlich mehr Restriktionen zu beachten. Das Wesen der Montagetechnik liegt im Zusammenfügen zweier oder mehrerer Teile an einem Ort und zu exakt dem gleichen Zeitpunkt. Daraus folgt, daß der Vorgang erst dann ablaufen kann, wenn sowohl der zu fügende Grundkörper - zumeist im Werkstückträger gespannt - als auch die weiteren Teile in der Station verfügbar sind und die Montagezelle mit den erforderlichen Werkzeugen ebenfalls funktioniert.

Bei Ausfall eines dieser Einflußfaktoren besteht im Normalfall keine Alternative, die Montage durchzuführen. In der Regel ist die Abarbeitungsreihenfolge starr vorgegeben und läßt sich auch im Störfall nur selten verändern. Lediglich beim Vorhandensein von Redundanzstationen ist ein Weiterarbeiten denkbar. Diese parallelen Einrichtungen sind jedoch nur dann anzutreffen, wenn entweder bekannt ist, daß die entsprechende Montagestation sehr störanfällig ist oder aufgrund des umfangreichen Arbeitsinhaltes zum Taktzeitausgleich ein zweiter Arbeitsplatz exi-

stiert. In diesem Fall ist jedoch immer mit Nutzungsgradeinbußen zu rechnen.

Diese Randbedingungen verlangen von der Montagesteuerung insbesondere im Störfall sehr schnelle Reaktionsmechanismen, um beispielsweise beim Fehlen einer Baugruppe, die Einschleusung einer anderen Gerätevariante, bei der die notwendigen Füge­teile bereits vorrätig sind, zu ermöglichen. Diese Forderung wird unter dem Aspekt der z.T. hohen Variantenzahl bei elektromechanischen Geräten und der Vermeidung von Umrüstzeiten noch verschärft.

Eine weitere Erschwernis liegt in der starken Durchdringung der automatischen Montage mit Prüfstationen. Immer wieder müssen defekte Teile ausgeschleust bzw. Nacharbeitsplätzen zugeteilt werden. Von dort gelangen sie wieder in den Montagefluß und zerstören u.U. damit die zuvor vorhandene Ordnung. Lassen sich diese Effekte in modernen Steuerungen durch Codierungen am Produkt selbst oder am Werkstückträger beherrschen, so führen sie bei der simulationstechnischen Abbildung jedoch zu einem erheblichen zusätzlichen Aufwand. In der in Kapitel 4 vorgestellten Simulationsstudie mit GPSS-FORTRAN wird ein derartiger Fall behandelt.

3.2.3 Bestückung elektronischer Bauelemente als Teilgebiet der Montagetechnik

Die Bestückung von Leiterplatten mit elektronischen Bauelementen gewinnt durch die zunehmende Integration elektronischer Komponenten in Produkte der Investitions- und Konsumgüterindustrie immer mehr an Bedeutung. Nicht nur durch die Steigerung der Stückzahlen, sondern auch durch die Entwicklung neuer Technologien, wie z.B. der Oberflächenmontage oder der Multilayertechnik, bekommt die Bestücketechnik als Teilgebiet der Montage eine neue Dimension. Die in Bild 38 dargestellten Einflußbereiche Arbeitsprinzip, Systemstruktur und Technik unterscheiden sich z.T. sehr deutlich von der Montagetechnik mechanischer Geräte.

Neben den unterschiedlichen Einflußfaktoren führen auch die Ziele bei Planung und Betrieb von Bestückungssystemen zu modifizierten Anforderungen an die Simulation in diesem Montagebereich. Liegen die Probleme in der konventionellen Montagetechnik vornehmlich beim Fügen zweier oder mehrerer Teile in einer Station, so müssen in einem Bestückungsautomaten zumeist mehrere Hundert verschiedene Bauelemente gleichzeitig bereitgestellt werden. Der Fügevorgang selbst ist dabei nur von zweitrangiger Bedeutung in Anbetracht der standardisierten Rastermaße

und durch den steigenden Anteil von SMD. Ein störungsfreier Betrieb setzt somit eine zuverlässige Bauelementebereitstellung mit langen Nachfüllintervallen und kurzen Fördererwechselzeiten voraus.

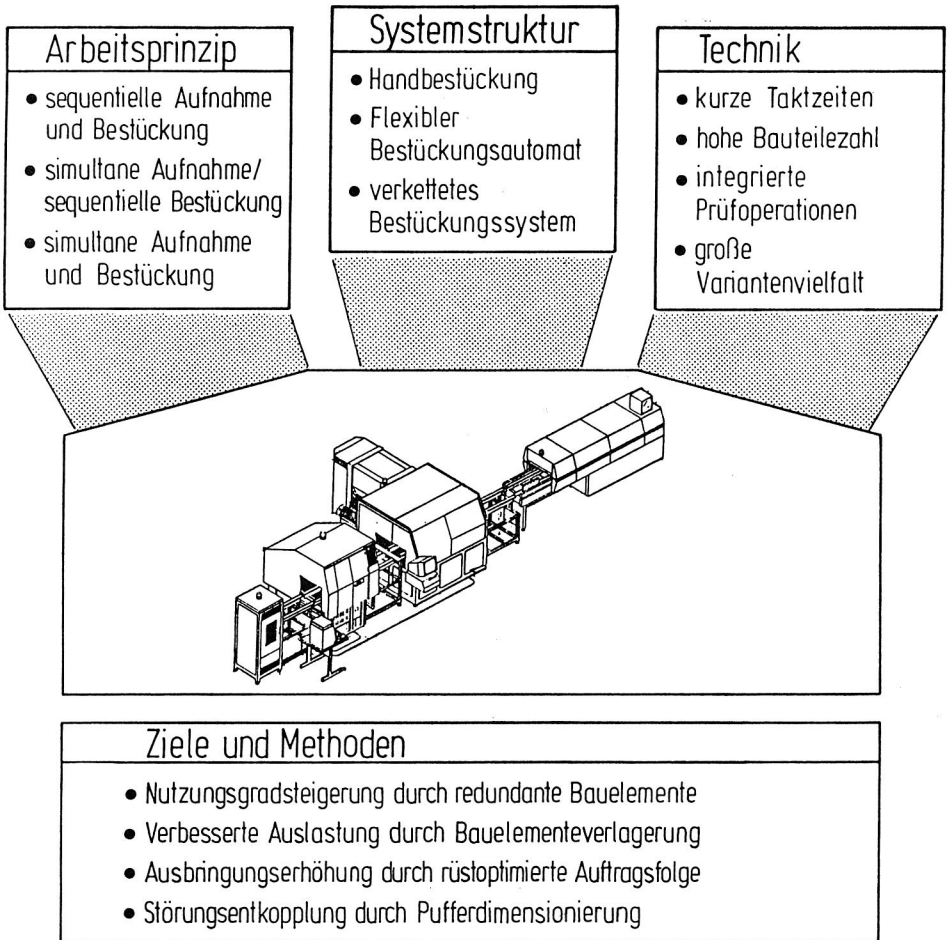


Abbildung 38: Einflüsse und Ziele der Simulation in der Bestücktechnik

Die Ziele von Simulationsstudien an Bestückungsanlagen sind mit denen in der Montage von elektromechanischen Geräten vergleichbar. Die Methoden zur Erreichung akzeptabler Nutzungsgrade sind jedoch sehr unterschiedlich. So ist es insbesondere in der Bauelementebereitstellung durchaus üblich, für einen Bauelementetyp mehrere redundante Zuführsysteme vorzusehen. Durch die Integration von Prüffunktionen in den heute am Markt erhältlichen Automaten erfolgt ein Um-

schalten von einer leeren oder fehlerhaften Spur auf eine andere. Durch den Trend, Bestückungsmaschinen zu kompletten flexiblen Fertigungslinien zu verketteten, besteht auch die Möglichkeit einer Verlagerung der Redundanz auf einen anderen Automaten. Hieraus läßt sich bereits ableiten, daß die Verbesserung der Auslastung der Bestückungsmaschinen und die Steigerung der Nutzungsgrade ganzer Systeme durch die optimierte Anordnung der Bauelemente erreicht werden kann. Die Reihenfolge spielt hier in der Regel keine Rolle. Ein weiterer wichtiger Aspekt liegt in der Berücksichtigung des Umrüstens bei Auftragswechsel [91]. Diesen Anforderungen müssen Simulatoren für die Bestücktechnik entsprechend Rechnung tragen.

3.3 Vorgehensweise bei Simulationsstudien

Die Simulation ist eine Verfahrensart zur Untersuchung des Zeitverhaltens verschiedenartigster Systeme. Gemeinsames Merkmal aller Simulationstypen ist die Abbildung eines zu untersuchenden Systems in einem Modell. An diesem Modell werden Experimente durchgeführt, die beispielsweise aus Gründen zu hoher Kosten, der Sicherheit, der Zeit oder der Größe nicht am System selbst vorgenommen werden können. Die Simulation ist vor allem aber dann ein praktikables Hilfsmittel, wenn das System lediglich im Projektierungsstadium existiert.

3.3.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Unabdingbare Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulationsstudie ist eine definierte Beschreibung, aus der hervorgeht, welche Ziele mit dem Produktionssystem erfüllt werden sollen. Der Simulationsanwender muß in einer sehr frühen Phase Einblick in das Pflichtenheft bekommen. Ausgehend von den Zielen kann die Aufgabenstellung bezüglich der Simulation abgeleitet werden.

An diese Vorarbeiten schließt sich die Systemanalyse an, welche die Grundlage für die Modellbildung ist. Auf diese beiden sehr wichtigen Schritte wird noch detailliert eingegangen.

Bevor ein reales Modell für die Implementierung auf dem Rechner freigegeben werden kann, muß dieses getestet und validiert werden. Der Kreislauf innerhalb des im Bild 39 dargestellten Blockes "Systemanalyse und Modellbildung" wird so oft wiederholt, bis das Modell das System bezüglich der Fragestellung vollständig abbildet.

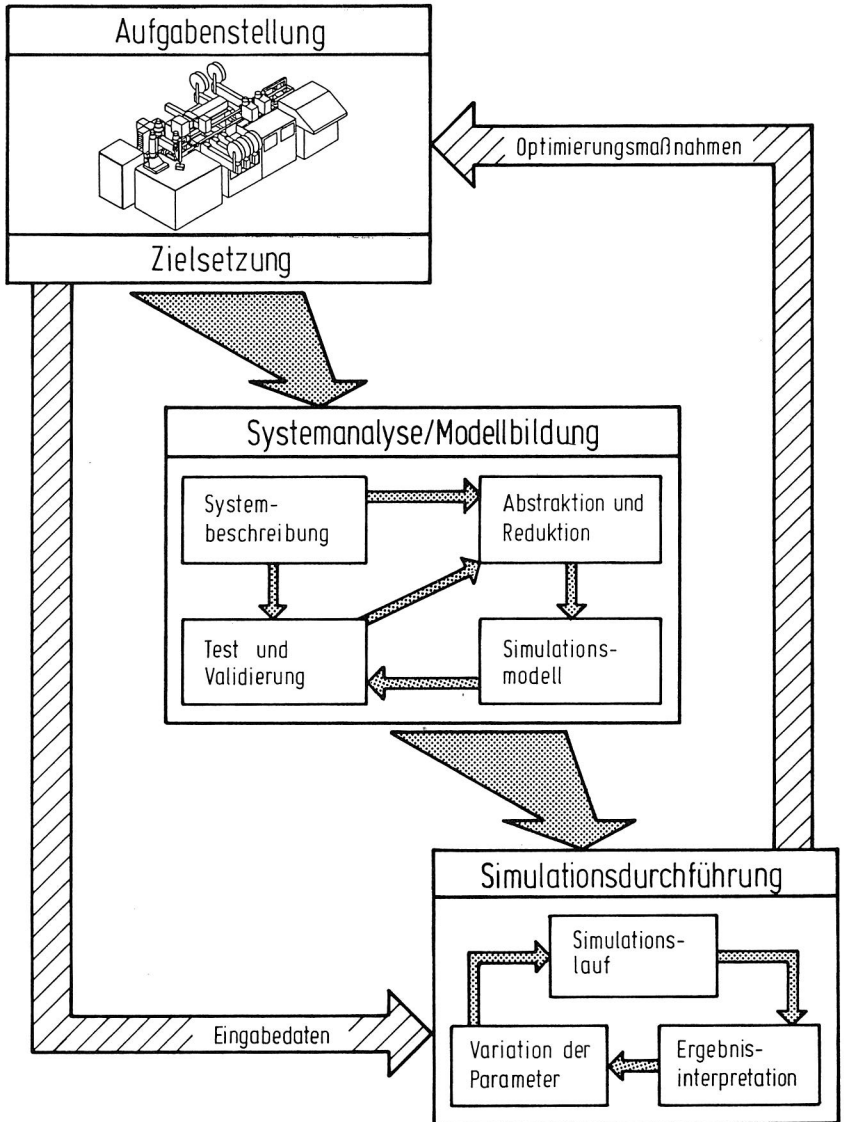


Abbildung 39: Vorgehensweise bei Simulationsstudien

Die eigentlichen Simulationsläufe werden nun in einer iterativen Vorgehensweise durchgeführt. Durch die Variation von Eingabeparametern können unterschiedliche Anlagenzustände, Steuerungsstrategien, Pufferdimensionen oder auch das Störverhalten einzelner Stationen des Systems simuliert werden. Gemeinsam mit dem Planer oder Betreiber des Produktionssystems kann der Simulationsexperte die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen auswerten, vergleichen und optimierende Maßnahmen ableiten, die dann anschließend in einem erneuten Simulationslauf auf ihre Effizienz untersucht werden müssen.

3.3.2 Systemanalyse und Modellbildung

Entscheidend für den Erfolg einer Simulation ist die zu Beginn durchzuführende Systemanalyse, deren Bedeutung gar nicht hoch genug eingeschätzt werden kann, da hier für die nachfolgende Modellierung die Randbedingungen definiert werden. Eine vollständige Systemanalyse läßt sich im wesentlichen in vier Schritte gliedern, wobei jeder für sich einer besonderen Sorgfalt bedarf und stets die Zielsetzungen der beabsichtigten Simulation berücksichtigen muß (Bild 40).

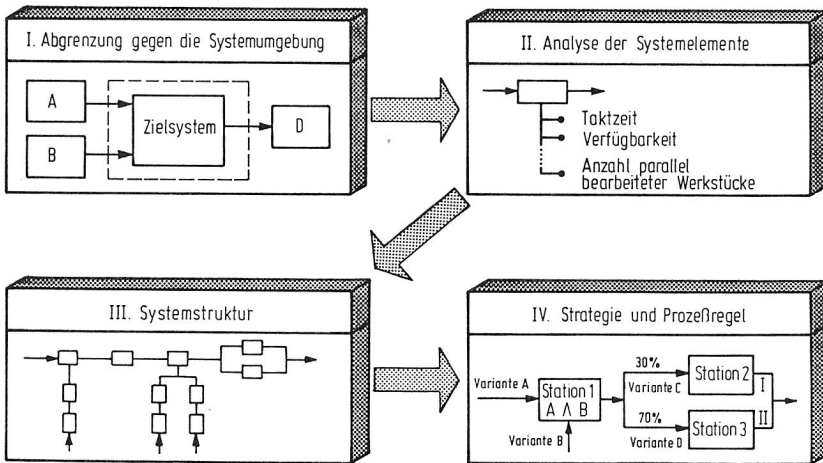


Abbildung 40: Die vier Schritte der Systemanalyse

Zunächst muß die zu simulierende Anlage von der Systemumwelt abgegrenzt werden. Die Schnittstellen zu vor- und nachgeschalteten sowie parallelen Systemen müssen bestimmt werden. Ferner muß entschieden werden, in welcher Ebene sich die Simulation bewegen soll. Es bestehen grundlegende Unterschiede bei der modellmäßigen Abbildung von Grobstrukturen, in denen ganze Vorfertigungslinien

als eine Komponente zusammengefaßt sein können, und Feinstrukturen, bei denen z.B. selbst Montagezellen in ihre Bestandteile - Zuführsystem, Handling, Montageoperation, Prüfvorgang und Steuerung - zerlegt werden.

Bei der Modellbildung erfolgt zunächst grundsätzlich eine Abstraktion der Realität. Das Maß des Abstrahierens orientiert sich an der Zielsetzung der Simulationsstudie und an den Randbedingungen des realen Prozesses. Die Qualität des Modells wird entscheidend durch den Grad der Reduktion des realen Verhaltens auf ein hinreichendes Niveau geprägt. Die besondere Aufgabe des Modellierers liegt im Erkennen der simulationsrelevanten Informationen und in der Vernachlässigung unwesentlicher Details. Am Beispiel der Abstraktion einer Pufferstrecke zwischen zwei benachbarten Montagestationen soll dieser Sachverhalt verdeutlicht werden.

Die Stationen A und B arbeiten mit der konstanten Taktzeit t_T . Die Paletten mit dem zu montierenden Produkt werden von A nach B auf einem kontinuierlich umlaufenden Transportband über den Abstand s bewegt (s. Bild 41).

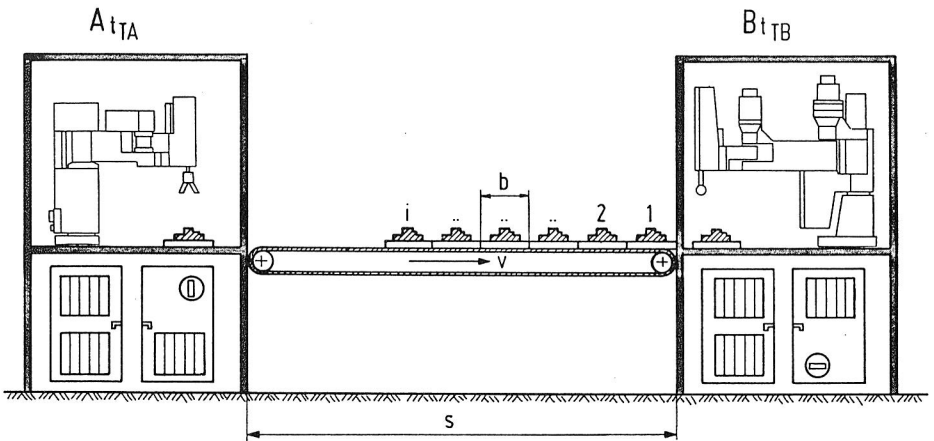


Abbildung 41: Pufferstrecke zwischen zwei Montagestationen

Bei Ausfall der Maschine A kann in B noch die Zeit $i * t_T$ weitermontiert werden, sofern gilt, daß $v \geq \frac{b}{t_T}$, was allerdings für ein korrekt dimensioniertes Transportsystem vorausgesetzt werden muß. Nach Wiederanlauf von A muß Station B warten bis eine neue Palette über das Band ankommt. Je nach konstruktiver Gestaltung können sich hier in der Realität unterschiedliche Zeitverhalten einstellen. Bild 42 zeigt zwei typische Geschwindigkeitsmuster für ein Förderband mit Reibschluß und einen Klinkenförderer.

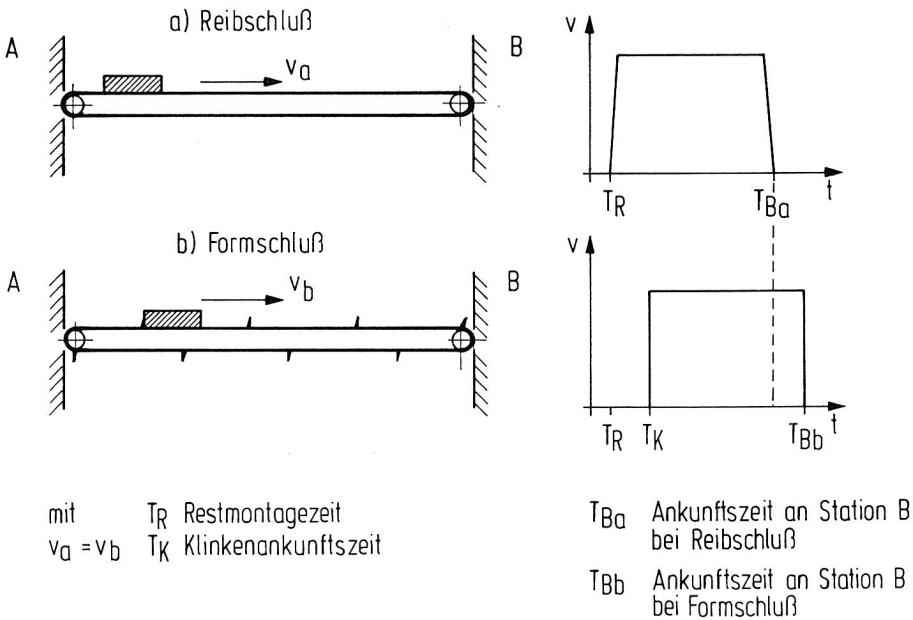


Abbildung 42: Vergleich des Zeitverhaltens unterschiedlicher Pufferstrecken

Es wird deutlich, daß aufgrund der unterschiedlichen Transportkonzepte die Zeiten T_{Ba} und T_{Bb} voneinander abweichen können. Die relative Differenz kann um so größer werden, je geringer der Weg s wird. Im Falle A kann unter ungünstigen Umständen die Maximalgeschwindigkeit nicht erreicht werden, während bei B die Zeit wesentlich von dem zufälligen Ankunftszeitpunkt einer Klinke abhängt.

Je nach Zielsetzung der Simulationsstudie und nach der Bedeutung dieses Transportteilsystems für die gesamte Anlage kann der Abstraktionsgrad sehr unterschiedlich gewählt werden. Bei einer sehr detaillierten Modellierung und einer insbesondere nach dem konkreten Verhalten dieses Transportbandes orientierten Aufgabenstellung würden die hier angesprochenen physikalischen Gegebenheiten im Modell Berücksichtigung finden. Gerade bei kurzzeitigen Ausfällen der Station A und geringen Transportgeschwindigkeiten v könnten Lücken auf dem Band entstehen, die durchaus Auswirkungen auf das Laufzeitverhalten der Maschine B hätten.

Sind die beschriebenen Stationen inkl. Transport von eher sekundärem Interesse bezogen auf die gesamte Anlage, so ist die Abbildung des realen Verhaltens durchaus mit geringerem Aufwand möglich. Die maximale Wartezeit bei Station

B ließe sich aus $tw = \frac{s}{v}$ berechnen. Dieser Wert muß zugrunde gelegt werden, wenn die Warteschlange vor B leer ist. Die Situation, daß nur sehr wenig Paletten zwischengepuffert werden und somit durchaus eine Lücke und damit eine Wartezeit an Station B auftritt, wird hier vernachlässigt. Der Modellierer muß prüfen, ob dieser Abstraktionsgrad noch eine hinreichend genaue Abbildung der Realität garantiert.

Im dritten Schritt der Vorgehensweise wird die Systemstruktur untersucht. Hier interessiert im wesentlichen die prozeßbedingte Anordnung der Systemelemente, deren Abhängigkeiten untereinander und die Entkopplung von Systemelementen durch zwischengeschaltete Puffer oder Redundanzen.

Den Abschluß der Systemanalyse bildet die Ableitung von Prozeßregeln und von Strategien für die Fertigungssteuerung. Hier gilt es, dynamische Wechselbeziehungen der Systemkomponenten untereinander deutlich werden zu lassen. Es müssen Bedingungen für Zustandsübergänge untersucht werden, vorhandene Prioritätsregeln sind darzustellen und weitere wichtige Punkte insbesondere bei Variantenfertigung und -montage sind zu berücksichtigen:

- Nach welchen Kriterien werden Lose zusammengestellt und gesplittet?
- Wann und in welcher Stückzahl erfolgt die Fertigung von Baugruppen für bestimmte Varianten?
- Sollen ereignisorientierte Umrüstvorgänge zugelassen werden?

Das Resultat einer konsequent durchgeführten Systemanalyse stellt letztlich ein abstraktes Modell dar. Aus einem zuvor offenen System wurde ein geschlossenes, dessen Elemente nach den spezifischen Fragestellungen idealisiert und abstrahiert sind.

Abstrakte Modelle lassen sich in zwei Klassen gliedern. Zum einen sind hier diskrete Modelle zu nennen, denen beispielsweise graphentheoretische und Warteschlangenmodelle zuzuordnen sind. Die zweite Klasse umfaßt die kontinuierlichen Modelle, für die z.B. System Dynamics ein typischer Vertreter sind. Die abstrakten Modelle geben allerdings noch keine verwertbaren Informationen über das Systemverhalten, sondern bilden den Zwischenschritt von der Systemanalyse zum realen Modell, an dem dann Fragestellungen gelöst werden können.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, mit analytischen Lösungsverfahren Aussagen über Systemverklümmungen oder zeitkontinuierliche Veränderungsdaten zu ge-

winnen. Ebenso lassen sich mit der Warteschlangentheorie Probleme bezüglich der Wahrscheinlichkeit für die Belegung von Maschinen, der Bestimmung von durchschnittlichen Pufferfüllgraden oder mittlerer Durchlaufzeiten von Werkstücken bearbeiten.

Eine Einschränkung in der Anwendbarkeit dieser Methodik liegt jedoch bei der Komplexität moderner Fertigungsanlagen. Stochastisch verteilte Störungen, wechselnde Varianten, das Einfließen von Nebenlinien in Montagesystemen und Verzweigungen, die unterschiedlichen Prioritätsregeln unterworfen sind, führen zu Problemen, welche die Warteschlangentheorie nicht lösen kann. Ein Weg zur Gewinnung von Erkenntnissen aus einem abstrahierten Modell ist die Bildung eines realen Modells. Einen hohen Stellenwert bei der realen Modellierung haben Simulationsmodelle. Im Gegensatz zu physikalischen Modellen, bei denen das abstrakte Modell auf ein neues reales System abgebildet wird, erfolgt hier eine Übertragung auf ein Simulationsprogramm einer Rechanlage. Dort werden die Zustandsübergänge des abstrakten Modells nachvollzogen. Dabei ist auf die exakte Einhaltung der vorgegebenen Reihenfolge und auf die Bedingungen, unter denen die Übergänge ablaufen müssen, streng zu achten.

Bevor jedoch die eigentliche Simulation durchgeführt werden kann, muß unbedingt eine Validierung erfolgen. Sämtliche Aussagen und Ergebnisse, die entweder direkt mit einem analytischen Verfahren aus dem abstrakten Modell oder über ein reales Modell ermittelt wurden, bedürfen einer genauen Überprüfung, ob sie das Verhalten des realen Systems ausreichend repräsentieren. Oft stößt man erst bei der Validierung auf Fehler, die schon bei der Systemanalyse oder Bildung des realen Modells entstanden sind. Hier zeigt sich, warum die Validierung des Modells gar nicht hoch genug eingeschätzt werden kann. Grundsätzlich muß man jedoch beachten, daß eine vollständige Übereinstimmung zwischen System und Modell niemals erreicht werden kann.

3.3.3 Simulationsdurchführung

Besonders bei Simulationsstudien an Montagesystemen mit einer stark vernetzten Struktur und komplexen Steuerungsalgorithmen ist eine sorgfältige Planung der Experimente durchzuführen. Das Vorgehen orientiert sich in erster Linie an den zuvor definierten Zielsetzungen, wobei bezüglich der Reihenfolge der variierbaren Parameter Prioritäten zu setzen sind. Ebenso müssen die Randbedingungen des realen Systems berücksichtigt werden, um nicht Simulationsläufe mit Vorgaben zu

starten, die sich später in der Realität nicht umsetzen lassen.

Empfehlenswert ist zunächst die singuläre Simulation von Subsystemen. Dadurch besteht die Möglichkeit, ohne großen Rechenzeitaufwand bereits die Leistungsfähigkeit von Nebenlinien zu ermitteln. Werden bereits hier Schwachstellen deutlich, so lassen sich diese in einer sehr frühen Phase ohne den Aufwand einer langwierigen und teuren Gesamtsimulation eliminieren. Bild 43 zeigt exemplarisch dieses hierarchische Vorgehen. Sind auf diese Weise sämtliche Systeme einer Ebene simuliert, so kann man in der nächsthöheren Stufe die Wechselwirkungen aller Nebenlinien zueinander simulieren.

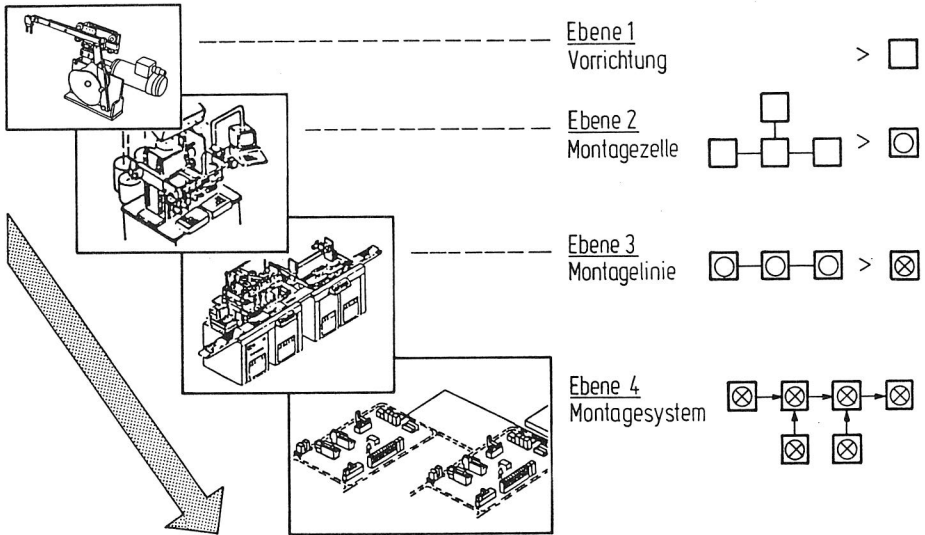


Abbildung 43: Stufenweise Simulationsdurchführung

Eine abschließende Beurteilung zum dynamischen Zeitverhalten einer Anlage kann letztlich erst dann abgegeben werden, wenn das Gesamtsystem geschlossen in einem Lauf simuliert wird (s. auch Kap. 4.4).

Ein wesentliches Problem bei der Durchführung betrifft die Simulationsdauer. Einen pauschalen Richtwert zur Bestimmung einer repräsentativen Laufdauer gibt es nicht. Aufgrund des stochastischen Verhaltens von Montagesystemen wird man niemals einen eingeschwungenen Zustand erreichen und somit auch nur ein Abbruchkriterium mit sehr großen Toleranzen für den Simulationslauf bekommen. Die erforderliche Laufdauer hängt neben der Komplexität des Systems vor allem von den Taktzeiten und dem Störverhalten der abgebildeten Stationen ab. Wichtig

ist, daß während eines Simulationslaufs alle deterministischen und stochastischen Ereignisse, die denkbar sind, vorgekommen sind.

In der Optimierungsphase steht der Benutzer immer wieder vor der Frage, welche Parameter verändert werden sollen. Es ist wie bei allen mehrparametrischen Prozessen zu beachten, daß nie mehrere Eingabeparameter gleichzeitig verändert werden dürfen, da sich die Auswirkungen auf die Ergebnisse überlagern können und eine Analyse sehr erschweren, wenn nicht unmöglich machen.

3.4 Zusammenwirken von Planern und Simulationsexperten

Die Vorgehensweise bei der Durchführung von Simulationsstudien hat deutlich gemacht, daß insbesondere bei der Untersuchung sehr komplexer Systeme eine intensive Zusammenarbeit zwischen Planern und Simulationsexperten unabdingbar ist.

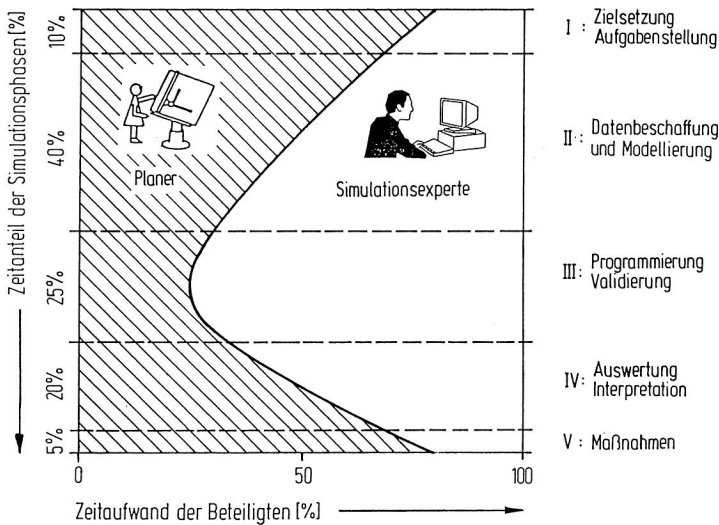


Abbildung 44: Zeitaufwand und Aufgabenverteilung einer Simulationsstudie

Das gilt vor allem für die Datenbeschaffung und -verdichtung sowie für die Interpretationsphase. Wie Bild 44 zeigt, ist der Arbeitsanteil des Planers und Simulationfachmannes in den einzelnen Phasen sehr unterschiedlich. In jeder Phase sollte jedoch ein informeller Dialog vorhanden sein, um eine möglichst hohe Effizienz der Studie zu gewährleisten.

Die ebenfalls in Bild 44 dargestellten Zeitanteile der fünf Phasen basieren auf Erfahrungswerten. Sie unterstreichen jedoch nochmals die starke Bedeutung der Datenbeschaffung und Modellierung sowie die Interpretation der Simulationsergebnisse.

3.4.1 Datenerhebung und -verdichtung

In Kapitel 2.1 wurden bereits Kenngrößen zur Nutzungsgrad- und Verfügbarkeitsbestimmung vorgestellt und Methoden zu deren Beschaffung beschrieben. Grundsätzliche Unterschiede bestehen dabei für bereits vorhandene Systeme und denen, die nur in der Planung existieren. Die Auswahl der für die Simulation notwendigen Daten muß gemeinsam vom Planer und Simulationsexperten getroffen werden. Zur Strukturierung empfiehlt sich hier eine Trennung in zeit- und mengenorientierte Größen.

Zu den Zeitparametern zählen im wesentlichen Takt- und Bearbeitungszeiten, Handling-, Transport- und Störungsdauern. Mengenspezifische Kenngrößen sind beispielsweise Stückzahlen, Pufferkapazitäten, Transportmittelanzahl oder Störungshäufigkeiten.

Eine weitere wichtige Entscheidung liegt in der Festlegung, welche Daten in Form von Verteilungsfunktionen anzugeben sind. Häufig - und das hängt wesentlich von der notwendigen Abbildungsgenauigkeit des Systemverhaltens ab - reicht die Angabe von Mittelwerten aus.

3.4.2 Interpretation der Simulationsergebnisse

Zur Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen ist eine sorgfältige Interpretation der Simulationsergebnisse notwendig. Hier kann eine übersichtliche und den Zielsetzungen der Studie angepaßte Ergebnisaufbereitung sehr nützlich sein.

In erster Linie besteht die Aufgabe der Ergebnisinterpretation in der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Resultaten verschiedener Simulationsläufe. Hierzu gehört auch die Entscheidung, ob weitere Simulationen mit veränderten Eingabeparametern durchzuführen sind, um z.B. Ergebnisse weiter abzusichern. Gerade in dieser Phase ist wieder eine intensive Zusammenarbeit zwischen Planer und Simulationsfachmann erforderlich.

Ergeben sich bei Simulationsuntersuchungen Hinweise auf Nichtfunktionalität des Systems, z.B. durch ständige Blockierungen, so müssen gegebenenfalls auch Veränderungen am Modell vorgenommen werden. Das kann zu einem erneuten Planungs- und Simulationszyklus führen.

3.4.3 Akzeptanz der Ergebnisse von Simulationsstudien

Gerade in Fertigungsbetrieben verlangen die Mitarbeiter der Planungs- und Projektierungsabteilungen sehr komfortable Bedieneroberflächen bei Arbeiten am Rechner. Zur Erreichung einer hohen Akzeptanz der Simulationssoftware bietet sich die Einbeziehung der Grafik insbesondere in vier Bereichen an (Bild 45).

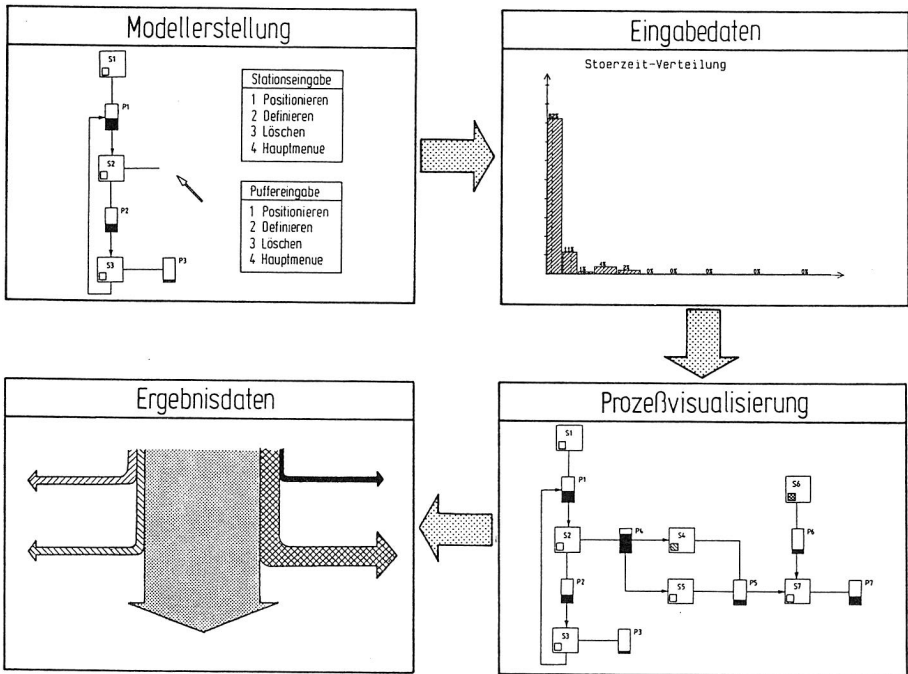


Abbildung 45: Einsatzfelder der Grafik bei der Simulation in der Fertigungstechnik

Den sich während des Planungsverlaufs häufig ändernden Randbedingungen der Aufgabenstellung muß sich der Komfort bei der Modellerstellung anpassen. Nicht selten muß beispielsweise eine bereits fertige Layoutvariante des Gesamtsystems verändert werden, weil eine nachträgliche Produktänderung die Integration einer

weiteren Maschine verlangt. Das evtl. bereits ausgetestete Simulationsmodell muß nun eine schnelle und einfache Anpassung an die neuen Verhältnisse ermöglichen. Durch das Einfügen der zusätzlichen Station und der Definition ihrer Vorgänger- und Nachfolgebeziehungen erfolgt die Aktualisierung. Zur Kontrolle muß auf dem Grafikbildschirm diese Veränderung im Layout verdeutlicht werden.

Der zweite Bereich der Grafikunterstützung bezieht sich auf die Eingabedaten. Hier wird die Übersichtlichkeit besonders bei der grafischen Darstellung von Laufdauer- und Störzeitverteilungen deutlich gesteigert. Allerdings kann die Abbildung statistischer Verteilungen in Form von mathematischen Funktionen u.U. zu starken Idealisierungen führen oder sehr komplexe Formeln bewirken. Der Simulationsanwender kann zudem diese Darstellungsform nur selten richtig deuten und verliert somit das Vertrauen zu den ermittelten Ergebnissen. Es ist deshalb sinnvoll, die aus Störzeituntersuchungen gewonnenen Histogramme in der gleichen Form wie sie ermittelt wurden, dem Simulationsprogramm wieder anzubieten. Bild 45 zeigt die relativen Häufigkeiten der Störungsdauern in den vorher definierten Zeitklassen.

Das wohl wichtigste Einsatzfeld der Grafik für die Simulation in der Fertigungstechnik ist die Animation oder Prozeßvisualisierung. Hier lassen sich im wesentlichen zwei Anwendungen unterscheiden. Zum einen kann über die dreidimensionale grafische Darstellung von Maschinen, Transportstrecken, Industrierobotern usw. das Zusammenspiel dieser Geräte durch Simulation untersucht werden. Andererseits ist durch eine symbolische zweidimensionale Darstellung der Systemkomponenten die Möglichkeit gegeben, z.B. durch Farbumschaltung, das dynamische Zeitverhalten des Systems zu demonstrieren.

Eine Steigerung des Komforts liegt in der Darstellung von Transporten, wobei jedoch berücksichtigt werden sollte, mit welcher Taktzeit das Realsystem arbeitet. Bei sehr kurzen Bearbeitungszyklen und der Zeitraffung im Simulationsrechner wären die Transportbewegungen derart schnell, daß keine visuelle Verfolgung mehr möglich wäre.

Die Prozeßvisualisierung bietet neben der Möglichkeit zur Unterstützung der Modellvalidierung und zur Durchführung von Plausibilitätstests vor allem sehr anschauliche Informationen über das Einsatzverhalten des Gesamtsystems. Der Anlagenplaner kann während des Simulationslaufs insbesondere die gegenseitigen Wechselwirkungen benachbarter Stationen in der Grafik verfolgen. Der Einfluß von Speichergrößen beim Eintreten von Störungen unterschiedlicher Dauer wird ebenso deutlich, wie die Auswirkungen geplanter Wartungsintervalle einzelner Sta-

tionen auf das Gesamtsystem. Durch die grafische Darstellung der während der Simulation intern durchgeführten Zustandsübergänge gewinnt das Verfahren an Transparenz und gibt dem Nutzer die notwendige Sicherheit bei der Auswertung der Ergebnisdaten.

Die grafische Aufbereitung der Simulationsergebnisse stellt den vierten Bereich dar. Da die Simulation kein Verfahren zur selbständigen Optimierung von Anlagen ist, sondern lediglich ausgehend von gezielten Fragestellungen die realen Abläufe mit Hilfe eines Modells nachvollzieht und somit das zu erwartende Einsatzverhalten einer geplanten Anlagenvariante zeigt, bedürfen die Simulationsergebnisse einer sachkundigen Interpretation. Diese kann nur mit dem Anlagenplaner bzw. -betreiber durchgeführt werden, und er sollte deshalb die Ausgabedaten in einer Form vorfinden, die ihm erlaubt, möglichst konkret zu reagieren und seine Entscheidungen anhand eines weiteren Laufes zu überprüfen. Hilfreich ist die Präsentation der Systemnutzung beispielsweise in Form eines Sankeydiagramms.

Auf einen Blick ist der Anteil von Störungen, Wartungsdauern und Blockierzeiten an der Gesamtnutzungsdauer erkennbar. Wichtige Informationen beinhaltet der zeitliche Verlauf der Pufferfüllgrade. Die Ergebnisspräsentation muß neben der Aufbereitung einzelner Simulationsläufe den Vergleich verschiedener Simulationen mit variierten Parametern erlauben. So sollte beispielsweise durch Balkendiagramme der Vergleich unterschiedlicher Alternativen erleichtert werden.

Die hier beschriebenen Einsatzgebiete für die Grafik beinhalten eine Auswahl möglicher Darstellungsformen. Dieses Angebot ist selbstverständlich erweiterbar, nur sollte im Interesse einer Übersichtlichkeit der Informationsgehalt auf die Bedürfnisse des Anlageplaners beschränkt bleiben.

4 Planungsbegleitende Simulationsstudie für ein flexibles Montagesystem mit GPSS-FORTRAN Version III.

Die Planung von komplexen Montagelinien, auf denen ein breites Gerätespektrum produziert wird, wirft eine Reihe von Fragen auf, die sich mit konventionellen Schätzverfahren oder stark vereinfachenden analytischen Berechnungsmethoden nicht beantworten lassen. Daher gewinnt der Einsatz der Simulation als planungsbegleitendes Hilfsmittel zunehmend an Bedeutung. Die in Kapitel 3.3 vorgestellte Vorgehensweise von Simulationsstudien soll hier an einem konkreten Beispiel aus der Praxis verdeutlicht werden. Untersuchungsgegenstand ist ein Montagesystem zur Produktion elektromechanischer Schaltgeräte mit einer sehr großen Typenvielfalt und stark schwankenden Losgrößen. Da die auf die Belange der Montagetechnik zugeschnittenen Simulatoren die Behandlung von Anlagen dieser Größenordnung nur mit Einschränkungen zulassen, wird auf das Simulationspaket GPSS-FORTRAN Version III zurückgegriffen.

4.1 Das Simulationspaket GPSS-FORTRAN Version III

Der Simulator GPSS-FORTRAN Version III eignet sich zur Simulation diskreter, kontinuierlicher und kombinierter Modelle. Sein Einsatzgebiet erstreckt sich aufgrund der universellen und modularen Struktur nicht nur auf ingenieurwissenschaftliche Bereiche. Die Entscheidung, GPSS-FORTRAN Version III zur Simulation einer Montageanlage einzusetzen, basiert einerseits auf dem breiten Angebot bereits vorhandener Unterprogramme zur Abbildung von Systemelementen, wie sie auch in der Montagetechnik immer wieder vorkommen und andererseits auf der Möglichkeit, spezifische Anforderungen durch die Entwicklung eigener FORTRAN-Routinen abzudecken.

4.1.1 Aufbau des Simulators

GPSS-FORTRAN Version III ist ein Simulationspaket, das aus einem Hauptprogramm und einer Bibliothek von Unterprogrammen besteht. Das Hauptprogramm beinhaltet die Teile

- Initialisierung
- Ablaufkontrolle
- Endabrechnung

Bei der Initialisierung werden neben der benutzerspezifischen Vorbesetzung die Systemgrößen vorbelegt. Ferner werden die Zeitpunkte der ersten Generierung einer Transaction und der ersten Ereignisaufrufe festgelegt.

Die Ablaufkontrolle übernimmt die Ausführung der Simulation und ist in GPSS-FORTRAN Version III durch das Unterprogramm FLOWC realisiert. Es verwendet zur Klassifikation und Verwaltung der Zustandsübergänge verschiedene Listen. In ihnen sind sämtliche Aktivitäten, die ausgeführt werden sollen, mit dem jeweiligen Ausführungszeitpunkt in korrekter zeitlicher Reihenfolge verzeichnet. Dabei entspricht jede Liste einem bestimmten Typ von Aktivität. Die "Eventliste" beispielsweise enthält ausschließlich die Ereignisse.

Für die Endabrechnung stehen eine Reihe von Hilfsprogrammen zur Verfügung, die je nach Benutzerwunsch aufgerufen werden können. Hier erfolgt die Berechnung der Simulationsergebnisse, die dann in Listen oder Tabellen ausgegeben werden.

Zur Simulation montagesystemtechnischer Fragestellungen müssen zeitdiskrete Zustandsübergänge der Stationen betrachtet werden. Der diskrete Teil des Simulationspaketes enthält eine Reihe von Unterprogrammen, die die Elemente von Montagesystemen abbilden.

4.1.2 Grundelemente des diskreten Programnteils

Einige besonders häufig vorkommende Grundelemente zur zeitdiskreten Simulation werden im folgenden kurz vorgestellt.

Events

Die während der Simulation vorkommenden Ereignisse werden im Unterprogramm EVENT eingetragen. Dabei erhält jedes EVENT eine Nummer, unter der es von FLOWC aufgerufen werden kann. Zur Abarbeitung eines Ereignisses muß dieses für den gewünschten Zeitpunkt T angemeldet werden.

Zu den Ereignissen bei der Simulation von Montagesystemen gehören beispielsweise Störungen oder geplante Unterbrechungen.

Transactions

Transactions sind mobile Grundelemente, die durch das System laufen. Jeder Transaction ist ein Datenbereich zugeordnet, in dem die Nummer und die Priorität festgehalten sind. Außerdem lassen sich weitere benutzerspezifische Kennungen beispielsweise für den Generierungszeitpunkt definieren. Solange eine Transaction aktiv ist, bewegt sie sich im Modell von Station zu Station. Wird sie blockiert, z.B. aufgrund der Belegung einer Station, wird sie deaktiviert und in eine Warteschlange eingehängt. Typische Beispiele für Transactions sind Werkstücke oder Werkstückträger.

Stationen

Stationen sind ortsfeste Systemkomponenten, in denen Transactions bearbeitet oder gespeichert werden. Zu ihnen gehören neben den Bedienstationen und Mehrfachbedienstationen sowohl Puffer und Speicher als auch weitere Stationstypen. In der Montage sind das z.B. Fügestationen, Zuführungen und Weichen im Transportsystem.

Eine Darstellung typischer Grundelemente mit den zugehörigen GPSS-FORTRAN Programmstatements zeigt Bild 46.




Prozelelement	Blockdiagramm	Programm-Statement (GPSS-FORTRAN)
Förderband (Pufferstrecke) Parameter: Kapazität Durchlaufzeit (DLZ)		CALL ENTER (PU1,...) CALL ADVANC (DLZ,...) CALL LEAVE (PU1,...)
Bearbeitungsstation (ohne Störungen) Parameter: Taktzeit		CALL SEIZE (ST1,...) CALL WORK (ST1,TZ,..) CALL CLEAR (ST1,...)
Bearbeitungsstation (mit Störungen) Parameter: Taktzeit Verfügbarkeit (MTTR, MTFB, Verteilung)		CALL SEIZE (ST1,...) CALL GATE (Bedingung,..) CALL WORK (ST1,TZ,..) CALL CLEAR (ST1,...) SUBROUTINE EVENT Störung generieren Bedingung zurücksetzen Störung beenden Bedingung setzen

Abbildung 46: Darstellung von Puffer und Bearbeitungsstation in GPSS-FORTRAN

4.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

4.2.1 Vorstellung der geplanten Montagelinie

Auf dem Montagesystem werden Schaltgeräte produziert, die aus 15 Bauteilen bestehen. Fünf dieser Baugruppen werden auf Nebenlinien vorgefertigt, die in das Gesamtsystem integriert sind. Die Struktur der Gesamtanlage mit der Einbindung der Nebenlinien zeigt Bild 47.

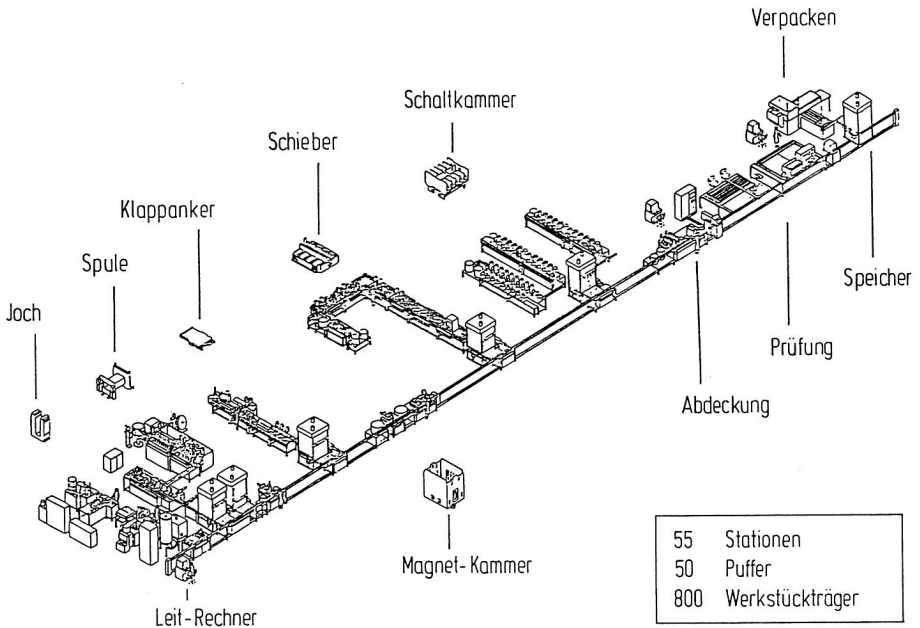


Abbildung 47: Flexibles Montagelinesystem für Schaltgeräte [116]

Bedingt durch die Marktanforderungen werden über 500 unterschiedliche Schaltgeräteversionen auf der Linie gefertigt. Die Variantenvielfalt und stark unterschiedliche Losgrößen, die durch schwankende Auftragseingänge in Verbindung mit der Forderung nach kurzen Lieferzeiten und geringen Beständen entstehen, unterstreichen die großen Flexibilitätsansprüche an die Gesamtlinie. Diese werden durch flexibel automatisierte Montagezellen und eine rechnergeführte Steuerung der Anlage erfüllt. In diesem Zusammenhang besitzt insbesondere die steuerungstechnische Abstimmung zwischen den Nebenlinien und der Hauptmontagelinie eine zentrale Bedeutung. Die Ablaufsteuerung des Gesamtsystems übernehmen ein

zentraler Fertigungsleitreechner an der Hauptlinie und fünf Zellenreechner an den Nebenlinien.

Zur Gewährleistung eines ausreichenden Nutzungsgrades werden bereits in der Konzeptionsphase Pufferstrecken zwischen den einzelnen Arbeitsstationen vorgesehen. Die Nebenlinien werden über Zwischenspeicher von der eigentlichen Montagelinie entkoppelt. In diesen Speichern werden die unterschiedlichen Baugruppenvarianten geordnet abgelegt und bei Bedarf zur Montage freigegeben bzw. bei Unterschreiten eines Sicherheitsbestandes nachgefertigt.

4.2.2 Problembereiche im Planungsstadium

Während der Planung haben sich eine Reihe von Problemen ergeben, die sich einerseits aus Fragen zum Layout und andererseits aus der Fertigungssteuerung des Montagesystems ableiten. Der steuerungstechnische Ablauf der Anlage wird in Bild 48 gezeigt.

Die Auftragsplanung legt täglich - bedingt durch Kundenanfragen und den jeweiligen Bestand im Auslieferungslager - ein Tagesprogramm der zu fertigenden Stückzahlen und Varianten fest. Aus den Variantenummern leitet sich die jeweilige Stückliste ab, aus der ersichtlich ist, welche Baugruppentypen in welcher Anzahl vormontiert werden müssen. Eine wichtige Aufgabe besteht jetzt in dem Abgleich zwischen dem Bestand in den Zwischenspeichern und dem Bedarf aus dem Tagesprogramm. Sind von den benötigten Baugruppen an den Nebenlinien genügend vorhanden, kann der Auftrag durch die Hauptmontagesteuerung aktiviert werden. Fehlen eine oder mehrere Typen oder sind deren Stückzahlen in den Speichern zu gering, so muß entschieden werden, ob der Bedarf für den Gesamtauftrag von den Nebenlinien rechtzeitig nachproduziert werden kann oder eine Rückstellung des Loses erfolgen soll. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Splittung des Auftrags in mehrere kleine Lose.

In den Nebenliniensteuerungen wird jeweils entschieden, welche Baugruppen in der erforderlichen Stückzahl zu fertigen sind. Dabei erhalten diese einerseits direkte Anweisungen von der Hauptmontagesteuerung und andererseits durch ein internes Speichermodell, in dem die Bewegungen des Speicherbestandes, d.h. die Zu- und Abgänge über die Zeit betrachtet werden.

Zwischen den Bestandsgrenzwerten Maximalbestand MB (Speicher ist voll) und Nullbestand NB (Speicher ist leer) gibt es weitere Bestandswerte, denen eine be-

sondere Bedeutung zukommt. Dabei beziehen sich diese Bestände immer prozentual auf den Maximalbestand der betreffenden Variante.

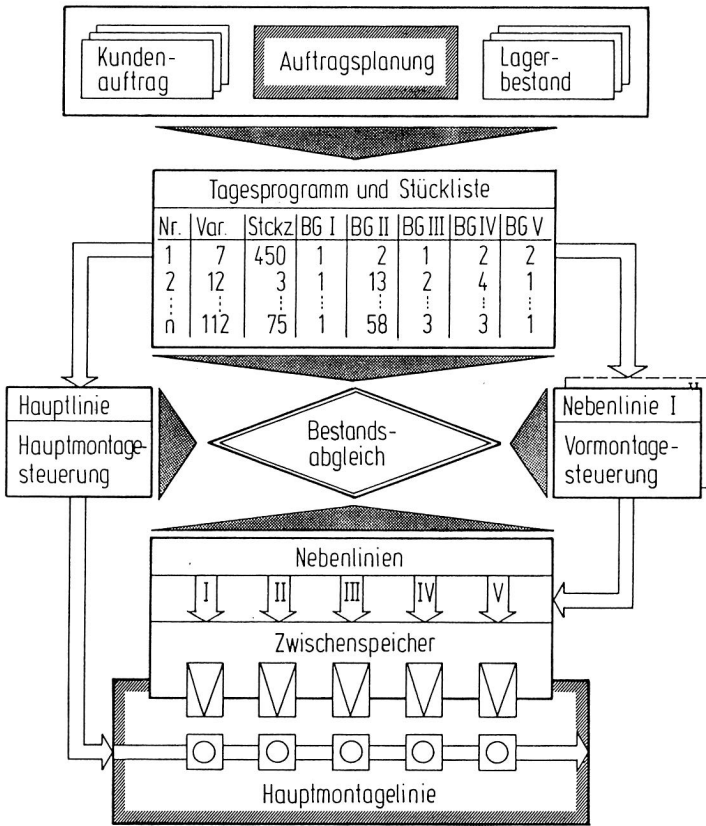


Abbildung 48: Steuerungstechnischer Ablauf

- Höchstbestand (HB)

Der HB kennzeichnet einen Bestand, bei dem die Steuerung die Fertigung einstellen muß, damit durch die sich noch auf der Linie befindlichen Spulen der Maximalbestand nicht überschritten wird.

- Optimalbestand (OB)

Der OB stellt den Bestand dar, mit dem am Tagesanfang die Fertigung und Montage beginnen soll und der bis zum Tagesende von der Steuerung wieder eingestellt werden soll.

- Sicherheitsbestand (SB)

Der SB soll gewährleisten, daß

- Unsicherheiten bei der Bedarfsermittlung, also starke Tagesprogrammschwankungen und
- Unsicherheiten bei der Fertigung durch Störungen ausgeglichen werden.

Das Erreichen des Sicherheitsbestandes stellt für die Steuerung gewissermaßen die "rote Warnleuchte" dar, die der Fertigung der entsprechenden Variante höchste Priorität einräumt.

Der zweite Problembereich bezieht sich auf das Layout des Montagesystems. Hier sind vor allem Fragen der Anordnung der Linien und der Dimensionierung sowohl von Pufferstrecken als auch der Zwischenspeicher zu klären.

4.2.3 Ziele der Simulationsstudie

Entscheidend für den Aufbau des Simulations-Modells ist die Zielsetzung, die mit Hilfe der Simulation erreicht werden soll. Zur Erreichung der Ziele ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen, die sich wiederum auf das Anlagenlayout und die Steuerungsstrategien beziehen.

Fragestellungen zum Anlagenlayout:

- Welche Pufferkapazität muß zwischen je zwei Stationen bereitstehen?
- Wie wirken sich Engpässe in Puffern auf die Gesamtproduktion aus?
- Welche technische Verfügbarkeit muß für die einzelnen Stationen gefordert werden, um einen vorgegebenen Ausstoß zu erreichen?
- Wie stark wirken sich Stillstandszeiten an einzelnen Stationen auf die Gesamtproduktion aus?
- Welche Station ist Engpaß einer Linie und bestimmt damit den maximalen Ausstoß?
- Wie groß müssen die Speicherkapazitäten für verschiedene Varianten in den Zwischenspeichern sein?

- Wieviele Werkstückträger werden für die einzelnen Linien benötigt?
- Welchen Einfluß hat die Transportbandgeschwindigkeit auf die Gesamtproduktion?

Fragestellungen zur Optimierung der Steuerung:

- Welchen Einfluß hat die Zusammenstellung des Tagesprogrammes?
- Wieviele Umrüstvorgänge sind an den Automaten der Nebenlinien sinnvoll?
- Nach welchen Kriterien muß die Fertigung der Nebenlinien angestoßen werden, damit an der Montagelinie die benötigten Baugruppen zeitgerecht verfügbar sind?
- Nach welchen Kriterien darf die Montagelinie ein Los starten oder splitten?
- Wie wirken sich Störungen der Steuerung aus?

4.3 Simulation des flexiblen Montagesystems

Nach der Formulierung von Aufgabenstellung und Zielsetzung folgt anschließend die Bildung des Simulationsmodells. Aufgrund der Größe und Komplexität der zu simulierenden Montagelinie müssen vor der eigentlichen Modellbildung einige Vorüberlegungen angestellt werden, um eine klare Modellstruktur und gegebenenfalls eine modulare Erweiterung zu gewährleisten.

4.3.1 Modellierung der Anlage

Entsprechend den zwei vorgestellten Problembereichen Layout und Systemsteuerung empfiehlt sich für die Modellierung ebenfalls eine Klassifizierung in Materialfluß und Informationsfluß. Für das Simulationsmodell hat das zur Folge, daß eine Ablaufsteuerung entwickelt werden muß, die sich an den in Bild 49 dargestellten Aufgaben orientiert. Das gleiche gilt auch für die Anlagensteuerung.

Aus dieser Klassifizierung ergibt sich zwangsläufig der Modellaufbau in GPSS-FORTRAN. Die Simulationskoordination übernimmt das Unterprogramm FLOWC. Hier werden insbesondere über eine Reihe von Listen die Zustandsübergänge des Systems verwaltet. Bei der Simulation der Montagelinie sind diese Änderungen

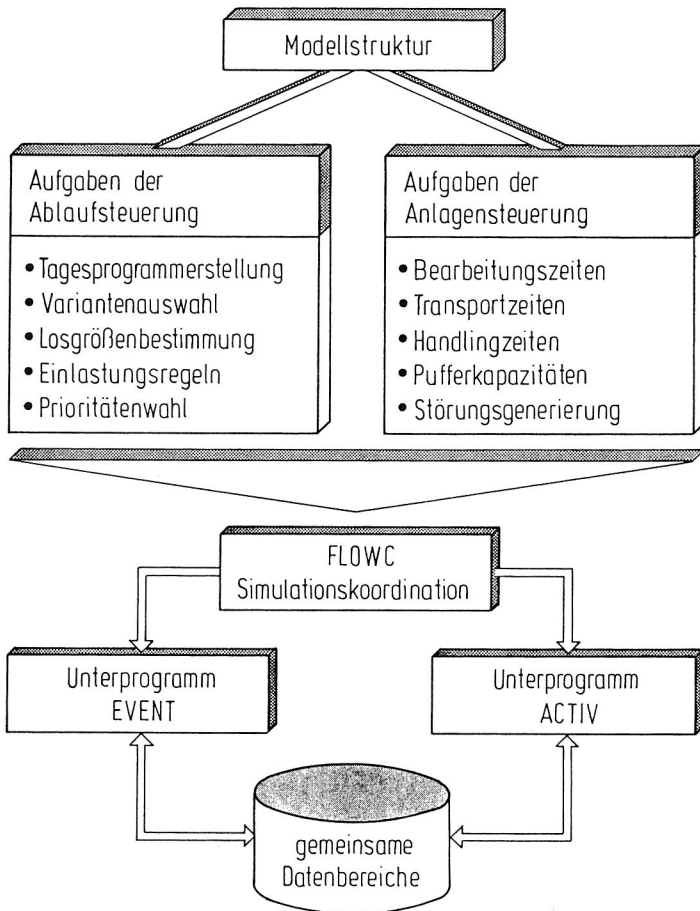


Abbildung 49: Struktur des Modellaufbaus

der Systemzustände immer zeitdiskrete Ereignisse, die entweder durch die Aktivierung einer Transaktion oder durch ein Ereignis behandelt werden.

Im Unterprogramm ACTIV werden die Zustandsübergänge an Transaktionen und Stationen durchgeführt. Hier werden der gesamte Materialfluß nachgebildet und die Bestandteile der Montagelinien sowie die Werkstückträger als Transaktionen modelliert.

Im Unterprogramm EVENT werden die Programmodule zusammengestellt, die die Ablaufsteuerung der Anlage nachbilden sollen. Ebenso werden hier die stochastischen Störungen und deterministischen Unterbrechungen sowie die Umrüstzeiten berücksichtigt. Der Daten- und Informationsaustausch zwischen ACTIV und

EVENT erfolgt über gemeinsame Datenbereiche, auf die beide Unterprogramme zugreifen können.

Auf die Darstellung der mobilen und ortsfesten Systemelemente soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da sie ausschließlich auf GPSS-FORTRAN-spezifischen Unterprogrammen beruhen. Von größerem Interesse jedoch ist die Abbildung der Wechselwirkungen der einzelnen Systemelemente untereinander, da gerade hier die Dynamik und Komplexität des Montagesystems liegt.

Zur Beschreibung der Interdependenzen der beteiligten Stationen, Puffer, Werkstückträger usw. wurden Bearbeitungsregeln entworfen, die sich gliedern lassen in:

- Zutrittsregeln
- Kapazitätsregeln
- Freigaberegeln
- Regeln der Bearbeitungsdauern

So gilt beispielsweise, daß ein Werkstückträger den Puffer nur dann verlassen darf, wenn die nachfolgende Station frei und nicht gestört ist. Analog muß beachtet werden, daß der Werkstückträger erst dann aus der Station herausfahren darf, wenn noch genügend Platz im folgenden Puffer vorhanden ist.

Die Auswirkung der Nichtbeachtung dieser Regeln führt in der Realität dazu, daß eine gestörte Maschine einen Rückstau bei vorgelagerten Puffern und Montagestationen verursacht. Die sich anschließenden Speicher laufen leer und führen zu Wartezeiten der nachgeschalteten Stationen.

Die modelltechnische Abbildung dieses Verhaltens in GPSS- FORTRAN läßt sich durch die in Bild 50 gezeigten verschachtelten Sequenzen von Unterprogrammaufrufen realisieren.

Einen wesentlichen Einfluß auf das Betriebsverhalten von Montagesystemen haben stochastisch auftretende Ereignisse. Der zeitliche Ablauf ist zwar durch die vorgestellten Bearbeitungsregeln festgelegt, wird jedoch immer wieder durch Ereignisse und Aktivitäten beeinflusst, die zufallsorientiert eintreten. Im hier betrachteten Beispiel der flexiblen Montagelinie für Schaltgeräte werden zwei Arten stochastischer Einflüsse unterschieden. Das ist zum einen die Generierung und Abarbei-

tung des Tagesprogramms und zum anderen die Berücksichtigung von auftretenden Störungen an den Stationen und im Transportsystem.

Prozezelement	Blockdiagramm	Programm-Statement (GPSS-FORTRAN)
Verkettung von Bearbeitungsstationen und Pufferstrecken - Puffer wird erst freigegeben wenn Station betreten wird - Station darf nur verlassen werden, wenn der dahinterliegende Puffer nicht voll ist	<pre> graph TD PU1[PU1] --- STOE[STOE] STOE --- ST1[ST1] ST1 --- PU2[PU2] </pre>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> CALL ENTER (PU1,...) CALL ADVANC (DLZ,...) CALL LEAVE (PU1,...) </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> CALL SEIZE (ST1,...) CALL GATE (Bedingung,...) CALL WORK (ST1,...) </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> CALL ENTER (PU2,...) CALL ADVANC (DLZ,...) CALL LEAVE (PU2,...) </div>

Abbildung 50: Wechselwirkung von Pufferstrecke und Montagestation

Die Bestimmung der abzuarbeitenden Tagesprogramme basiert auf einem Mengengerüst, in dem die Häufigkeiten und Stückzahlen der Varianten des Vorgängerproduktes zusammengefaßt sind. Bedingt durch Marktprognosen und Erfahrungswerte kann abgeschätzt werden, welche Stückzahlen der Produktvarianten zukünftig zu fertigen sein werden. Dabei zeigt sich, daß die Häufigkeitsverteilung der Gerätevarianten entsprechend einer ABC-Kurve verläuft. Das bedeutet, daß lediglich zwei Produkttypen ca. 75% der gesamten Produktion darstellen werden. Etwa 15 weitere Varianten beanspruchen 20% der Gesamtstückzahl. Der Rest von nur 5%, das entspricht ca. 100.000 Geräten pro Jahr, verteilt sich auf über 500 Geräteversionen.

Da die Montage und Vorfertigung unterschiedlicher Produkte und Gerätebaugruppen auch unterschiedliche Bearbeitungsdauern und variierende Montageschritte zur Folge haben kann, kommt der Generierung von repräsentativen Tagesprogrammen eine besondere Bedeutung zu. Entsprechend Bild 51 erfolgt die Zusammenstellung der Auftragsreihenfolge und Stückzahlen in vier Schritten.

Es wird dabei so verfahren, daß zunächst die Zahl der an einem Tag zu fertigenden unterschiedlichen Varianten V_{Anz} mit Hilfe einer Normalverteilung bestimmt wird. Hier sind Grenzwerte für die minimale und maximale Anzahl, die vom Betreiber

festgelegt wurden, zu beachten. Entsprechend der ABC-Verteilung für die Variantenhäufigkeiten erfolgt im zweiten Schritt die Auswahl der Variantenart V_{Art} und deren Stückzahlen. Die Ableitung der Anzahl der Montagelose M_{Lanz} wird analog Schritt 1 vorgenommen. Da in einem Los grundsätzlich nur eine Variantenart vorkommen darf, muß gelten $M_{Lanz} > V_{Anz}$, wobei die Möglichkeit des Lossplittings gegeben ist. Im Schritt 4 wird schließlich mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators die Verteilung der vorher festgelegten Varianten auf die Lose durchgeführt.

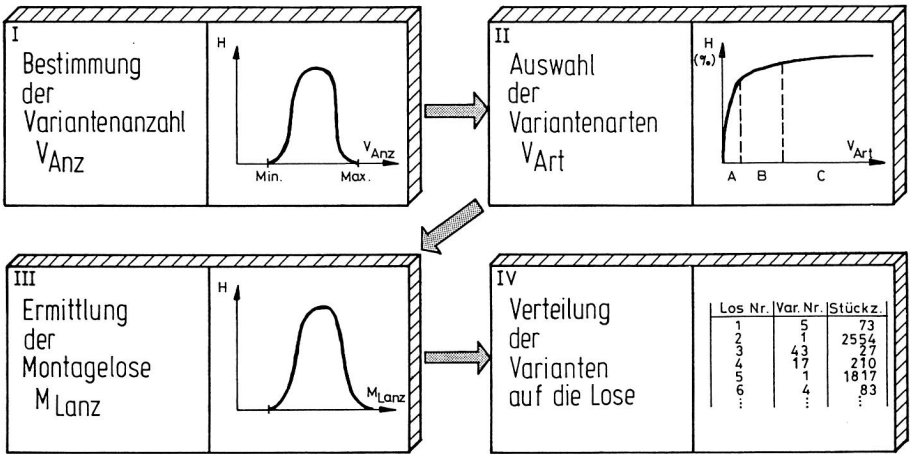


Abbildung 51: Generierung des Tagesprogramms

Alternativ zu der zufallsabhängigen Generierung des Tagesprogramms kann vom Benutzer ein festvorgegebenes Auftragspektrum der Simulation vorgegeben werden, um z.B. besondere Extremsituationen zu untersuchen.

Der zweite wichtige stochastische Einflußbereich resultiert aus technischen Störungen der Bearbeitungsstationen und des Transportsystems. Das Störungsverhalten läßt sich durch die Verteilung des zeitlichen Auftretens sowie die Verteilung der Dauern beschreiben. Generiert und beendet werden die Stillstände im Unterprogramm EVENT. Bei Aufruf des Störungsevents wird die im Betrieb befindliche betroffene Facility gestoppt und gleichzeitig eine Störungsdauer aus einer Exponentialverteilung berechnet.

In GPSS-FORTRAN wird zu diesem Zweck durch einen Zufallszahlengenerator eine gleichverteilte Zufallszahl erzeugt, die durch das Unterprogramm ERLANG mit Grad $k=1$ in eine exponentialverteilte Zufallszahl umgewandelt wird. Diese bestimmt die Störungsdauer und damit den nächsten Aufruf des Events, bei dem

dann die Station wieder freigesetzt wird.

Wie gezeigt, ergeben sich aus der Modellbildung für die Ablauf- und Anlagensteuerung eine Reihe von Detailproblemen, die neben der ohnehin vorhandenen Komplexität durch das Montagesystem zu einer weiteren Steigerung der Anforderungen an das Modell führt. Das muß bei der Wahl der Modellstruktur beachtet werden.

Grundsätzlich ist an dieser Stelle zu entscheiden, ob die Simulation des Gesamtsystems in einem geschlossenen Modell erfolgen soll oder eine Partitionierung auf mehrere Teilmodelle erforderlich ist, in denen beispielsweise jeweils eine Nebenlinie abgebildet ist. In Bild 52 werden die alternativen Konzepte gegenübergestellt.

	Unabhängige Teilmodelle	Geschlossenes Gesamtmodell
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Gute Überschaubarkeit - Einfache Modelländerungen - Kurze Wartezeiten am Rechner - Geringe Rechenzeitkosten 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximale Abbildungstreue - Reale Wechselwirkungen - Realitätsnahe Abbildung der Systemsteuerung - Praxisrelevante Ergebnisse
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Wechselbeziehungen - Steuerung unvollständig abbildbar - Ergebnisse nicht auf die Gesamtanlage übertragbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr große Komplexität - Lange Wartezeiten am Rechner - Hohe Rechenzeitkosten

Abbildung 52: Vor- und Nachteile der alternativen Modellkonzepte

Da beide vorgestellten Vorgehensweisen nicht ohne Nachteile sind, wird ein Verfahren gewählt, bei dem sich die Nachteile aufheben und die Vorteile addieren. Dadurch entsteht ein modulares Modell, das sehr übersichtlich ist und die Möglichkeit bietet, einzelne Teilsysteme singular zu simulieren. Andererseits können durch die Zusammenschaltung aller Nebenlinien die gegenseitigen Wechselwirkungen realitätsnah untersucht werden und somit insbesondere unterschiedliche Steuerungsstrategien überprüft werden.

Am Beispiel der Nebenlinie II, soll der Ablauf der Modellbildung von der Analyse bis zum Simulationsmodell zusammenfassend verdeutlicht werden. Bild 53 zeigt

im oberen Teil den räumlichen Aufbau der Linie.

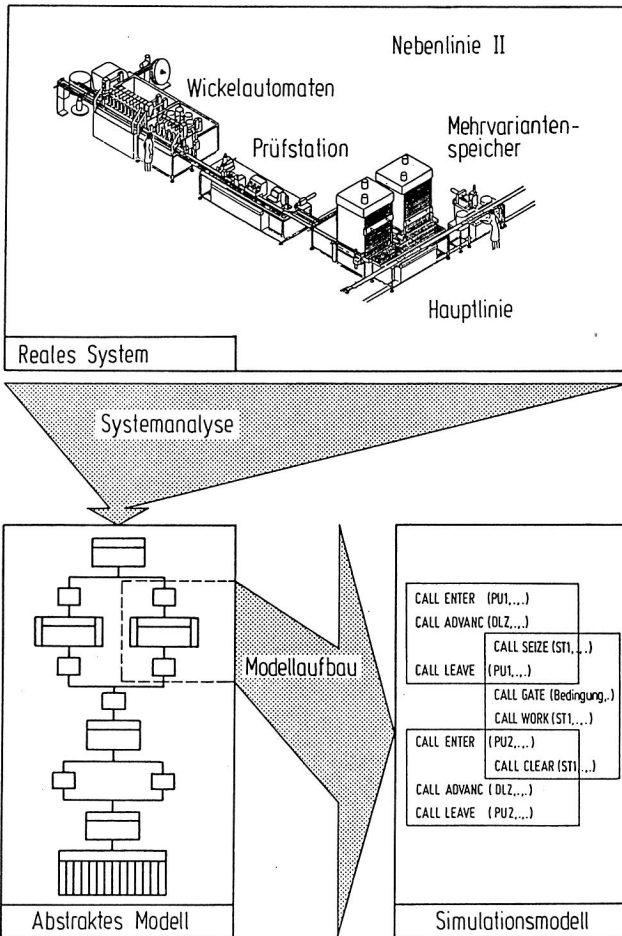


Abbildung 53: Ablauf der Modellbildung

Aus der Analyse des Layouts ergibt sich das "Abstrakte Modell" der Nebenlinie. Hier sind die zur Erreichung der Simulationsziele relevanten Komponenten der Fertigung abstrahiert in Form von Stationen, Puffern und Transportstrecken abgebildet. Von dieser Darstellung wird anschließend das Simulationsmodell abgeleitet. Im rechten Teil des Bildes wird die Unterprogrammstruktur, wie sie für GPSS-FORTRAN [83] typisch ist, deutlich. Neben dem hier vorgestellten materialflußtechnischen Aspekt wird parallel die Abbildung des Informationsflusses

berücksichtigt.

4.3.2 Implementierung des Simulationsprogramms

Vor der Durchführung der Simulationsexperimente muß die Implementierung des aus der Modellbildung hervorgegangenen Programms auf der Rechenanlage erfolgen. Aufgrund der Größe und Komplexität der zu simulierenden Anlage sowie der erforderlichen Detailtreue des Modells können selbst auf einem Großrechner erhebliche Probleme entstehen.

Diese lassen sich lösen, indem die Vorteile der modularen Struktur des Paketes GPSS-FORTRAN Version III genutzt werden. Da nicht allein auf Standardbausteine zurückgegriffen werden kann, müssen einige Ergänzungen und Änderungen am Simulationssystem vorgenommen werden.

Die wichtigste Anpassung des Simulators an die gestellten Anforderungen ist die Dimensionierung der COMMON-Bereiche, in denen festgelegt wird, welche Begrenzungen der Simulator erhält. So wird unter anderem die maximale Anzahl von

- Facilities (im Modell: Automaten)
- Transactions (im Modell: Werkstückträger)
- Pools (im Modell: Puffer)
- Events (im Modell: Steuerung, Störungen)
- Eingabeparametern

definiert. Die Standardvorbesetzung dieser Werte reicht für die Modellierung der flexiblen Montagelinie bei weitem nicht aus. Deshalb werden die meisten Werte z.T. erheblich erhöht.

Neben der veränderten Dimensionierung der Parameter erfolgt eine Modifikation im Aufbau der Transaction-Matrix-Verwaltung. Da auf der Montagelinie annähernd 1000 Werkstückträger im Einsatz sind, die im Simulationsprogramm als Transactions abgebildet werden, ergibt sich zwangsläufig eine Transaction-Matrix mit 1000 Zeilen.

Der Simulator GPSS-FORTRAN bestimmt den freien Bereich für eine neue Transaction in der Transaction-Matrix durch lineares Suchen. Dieses bei großen Modellen sehr zeitaufwendige Verfahren wird durch eine verkettete Freispeicherliste ersetzt. Aufgrund dessen sind Änderungen in den Unterprogrammen GENERA, TERMIN und RESET erforderlich.

Im Laufe der Entwicklung des Simulations-Programms sind zwei Probleme aufgetreten:

- hoher Arbeitsspeicherbedarf
- lange Rechenzeiten

Diesen Problemen wird in dreifacher Weise begegnet.

Segmentierung des Simulations-Programms

Untersuchungen über den Arbeitsspeicher-Bedarf des Simulations-Programms lassen erkennen, daß der dem Benutzer auf der eingesetzten Rechenanlage zur Verfügung stehende Arbeitsspeicher von 370 kB nicht ausreichen wird. Der Gesamtbedarf an Arbeitsspeicherplatz für das Simulationsmodell liegt in der Größenordnung von 800 kB.

Die Lösung des Problems liegt in der Erstellung einer Segmentierungs-Datei SEG, die das Simulations-Programm beim Ladevorgang in vier Teile zerlegt. Mit Hilfe dieser Datei sinkt der Bedarf an Arbeitsspeicher auf jetzt maximal 360 kB ab. Die Segmentierung wird vom Simulator GPSS-FORTRAN Version III unterstützt, da er sich in die drei Abschnitte gliedert:

- Initialisierung,
- Modellablauf,
- Ergebnisanalyse

Einsatz kleiner Bins

Die standardmäßig im Simulator vorgesehenen Bins, die als Zähler für Zustandsänderungen dienen und statistisch ausgewertet werden können, bewirken einen hohen Arbeitsspeicher- Bedarf. Das liegt vor allem an den 500 Meßwerten, die pro Bin

gespeichert werden, um in der Statistik am Simulationsende Konfidenzintervalle berechnen zu können.

Da für die Simulation der Montagelinie die Konfidenzintervall-Berechnung oft gar nicht sinnvoll ist, werden sogenannte kleine Bins entwickelt, die keine Möglichkeit vorsehen, Konfidenzintervalle zu berechnen. Durch diese Einschränkung kann auf die großen Datenbereiche der normalen Bins verzichtet werden. Hier zeigt sich wieder die Flexibilität, die GPSS-FORTRAN Version III im Vergleich zu anderen Simulatoren, die als Sprache arbeiten, auszeichnet.

Änderung des Unterprogramms TEST

Der hohe Rechenzeitverbrauch kann aufgrund von Meßreihen eindeutig dem Verhalten des Unterprogramms TEST zugeordnet werden. Das Unterprogramm TEST dient zur Überprüfung von Bedingungen, die für die Strategieentscheidungen bei der Steuerung eingesetzt werden.

Für die vorliegende Aufgabenstellung ist es ausreichend, wenn die eingesetzten GATES gezielt überprüft werden. Auf diese Weise läßt sich die Anzahl der erforderlichen Unterprogrammaufrufe deutlich reduzieren. Wie Messungen belegen, kann die Rechenzeit auf diese Weise um die Hälfte gesenkt werden.

4.3.3 Planung und Durchführung der Experimente

Für Montagesysteme der vorgestellten Größenordnung und Komplexität ist eine sorgfältige Planung der Experimente unumgänglich. In erster Linie orientiert sich das Vorgehen an den zuvor festgelegten Zielsetzungen, wobei zunächst eine Variation der Parameter erfolgen sollte, bei denen besonders deutliche Auswirkungen auf das Verhalten der Gesamtanlage zu erwarten sind. Grundsätzlich sollte pro Simulationslauf immer nur eine Größe variiert werden, um Interdependenzen eindeutig erkennen zu können. Ebenso müssen die Randbedingungen des realen Systems berücksichtigt werden, um nicht Experimente mit Vorgaben zu starten, die sich später in der Anlage nicht realisieren lassen.

Bei der vorliegenden Simulationsstudie wird in drei Schritten vorgegangen (s. Bild 54).

In der ersten Phase werden die Nebenlinien jeweils allein und ohne Wechselwirkungen mit dem restlichen System untersucht, um die maximal möglichen Ausbringungsraten zu ermitteln.

Der zweite Schritt sieht ein Zusammenschalten von zunächst jeweils einer Nebenlinie mit dem Hauptmontagesystem vor, um so bereits eine grobe Abschätzung der Wechselwirkungen vornehmen zu können.

Die eigentliche Experimentierphase beginnt im dritten Schritt mit der Simulation des Gesamtsystems in einem geschlossenen Modell. Durch den vorher durchgeführten Grobvergleich kann hier mit relativ wenigen Simulationsläufen die Feinabstimmung des Systems vorgenommen werden.

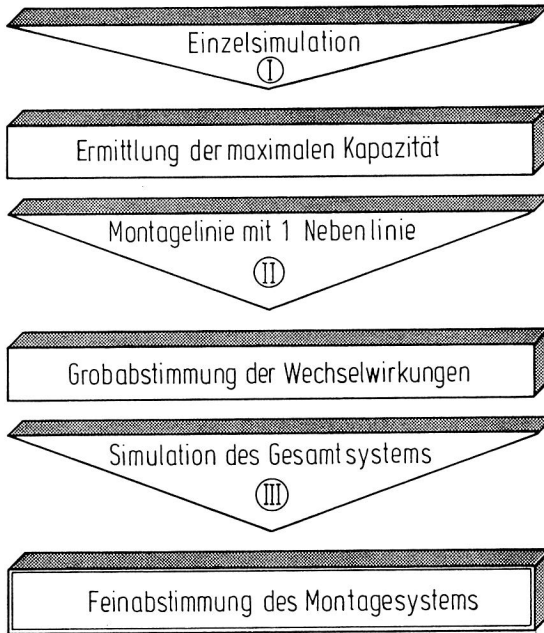


Abbildung 54: Phasen der Simulationsdurchführung

Eine wichtige Entscheidung liegt bei der Festlegung der Simulationsdauer. Sehr lange Läufe führen zu einem erheblichen Aufwand an Rechenzeit und Speicherbedarf. Die Wahl einer zu kurzen Simulationsdauer führt hingegen zu nicht repräsentativen Ergebnisdaten und somit u.U. zu falschen Aussagen. Im hier vorgestellten Fall, d.h. bei dieser Systemkonfiguration mit den relativ kurzen Taktzeiten von weniger als 5 Sekunden und dem variantenreichen Produktionsprogramm liefern die Experimente spätestens nach einem Betrachtungszeitraum von 5 Tagen repräsentative Daten, wie zahlreiche Simulationen gezeigt haben.

4.3.4 Ergebnispräsentation und Interpretation

Von besonderem Interesse für die Planung der Montagelinie ist die Beantwortung der Frage nach der Gesamtausbringung. Zur Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit darf eine vorgegebene Tagesstückzahl nicht unterschritten werden. Es hat sich gezeigt, daß bzgl. des Layouts und der Zeitkriterien der Stationen die Montagelinie in der geplanten Form imstande ist, die geforderte Anzahl von Schaltgeräten zu produzieren. Eine starke Abhängigkeit der erreichbaren Ausbringung besteht von der Struktur des zu montierenden Tagesprogramms. Es wurde ermittelt, daß die Festlegung der Kriterien für Auftragssplitting und -anstoß sehr sorgfältig an die Losgrößen anzupassen sind. Bild 55 gibt exemplarisch eine Übersicht des Montageergebnisses für einen Tag. Angegeben ist jeweils die Variantenummer mit der dazugehörenden Losgröße und Startzeit.

Der Vergleich zwischen dem vorgegebenen und tatsächlich abgearbeiteten Tagesprogramm zeigt, daß zunächst die Rückstände der vorangegangenen Schicht gefertigt worden sind. Anschließend erfolgte die Montage der Varianten 1 bis 7 in den geplanten Stückzahlen. Aufgrund der begrenzten Lieferbereitschaft an der Nebenlinie II wird die Variante 8 gesplittet und Nr.9 vorgezogen. Der Anstoß für die Produktion von 200 Geräten der Variante 15 wird ebenfalls aufgrund einer fehlenden Baugruppe zurückgestellt. Trotz der Verschiebungen, die analog der Fertigungssteuerung nach den gleichen Algorithmen auch in der Simulation erfolgen, bleibt vor Beendigung der zweiten Schicht noch genügend Zeit, sogenannte Renner der A-Varianten für das Lager zu produzieren.

Neben diesen globalen Aussagen über das Betriebsverhalten der Anlage lassen sich für jede Station und die im System vorhandenen Puffer detaillierte Ergebnisse darstellen. Zur Erreichung einer möglichst gleichen Auslastung der Montageautomaten ist neben einer konstanten Taktzeit vor allem die Störungsentkopplung der Stationen untereinander von entscheidender Bedeutung. Die u.a. auch zu diesem Zweck eingesetzten Pufferstrecken müssen sorgfältig dimensioniert werden. Als Grundlage dienen hier sowohl Daten bezüglich der Stillstandszeiten jeder einzelnen Station als auch die Pufferfüllstände, die sich dynamisch über die Zeit verändern.

In dem gezeigten Beispiel (s. Bild 56) wird deutlich, daß die internen Störungen einzelner Automaten zu Warte- und Blockierzeiten benachbarter Arbeitsplätze führen, da keine ausreichenden Pufferkapazitäten zur Verfügung stehen. Die zwangsläufige Schlußfolgerung dieses konkreten Ergebnisses wäre eine Kapazitätserhöhung des Puffers Nr.10, um den hohen Blockierzeitanteil an Station 10 zu reduzieren.

Geplantes Tagesprogramm					
VARIANTE	LOSGRÖSSE	SP-V	KL-V	SI-V	SA-V
1	1200	2	2	6	3
2	900	2	2	5	2
3	900	1	1	8	2
4	1000	1	1	1	4
5	900	1	1	6	6
6	400	2	2	1	1
7	700	1	1	2	12
8	700	1	1	2	5
9	400	2	2	2	2
10	200	1	1	15	13
11	200	1	1	14	11
12	600	2	2	5	2
13	200	2	2	4	1
14	200	11	2	5	2
15	200	2	2	1	11
16	200	12	1	6	6
17	150	11	2	6	3
18	150	2	2	1	4
19	150	5	1	1	11
20	150	20	1	6	3
21	150	2	2	3	3
22	150	2	2	5	5
23	150	9	2	6	3
24	150	12	1	5	2
25	150	3	1	4	4
26	50	4	1	6	3
26	10300				

SP-V Spulenvariante
 KL-V Klappankervariante
 SI-V Schiebervariante
 SA-V Schaltkammervariante

Gefertigtes Tagesprogramm		
VARIANTE	LOSGRÖSSE	STARTZEIT DES LOSES
17	150	0
1	1200	1426.9
2	900	6074.6
3	900	10464.4
4	1000	14869.1
5	900	19495.7
6	400	23617.3
7	700	254675
8	502	287380
9	400	31107.6
8	198	33024.4
10	200	33998.6
11	200	34875.3
12	600	35836.7
13	200	38714.3
14	200	39622.9
16	200	40617.3
17	150	41573.5
18	150	42289.2
19	150	42949.7
20	150	43693.1
15	200	44478.4
21	150	45420.5
22	150	46201.2
23	150	46956.1
24	150	47657.4
25	150	48391.1
26	50	49072.3
1	177	49293.2
2	397	50168.6
1	163	53636.8
2	167	54591.6
32	11354	

Abbildung 55: Vergleich der vorgegebenen und abgearbeiteten Losfolge

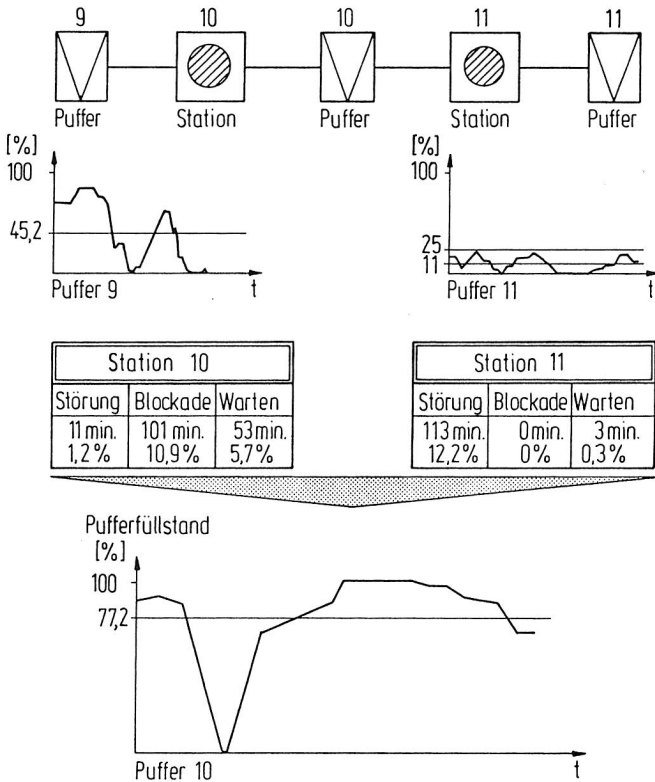


Abbildung 56: Stillstandszeiten ausgewählter Stationen und Füllstände der benachbarten Puffer

In Bild 57 sind die Auslastungen aller Puffer der Hauptmontagelinie festgehalten. Auffällig ist hier, daß sämtliche Puffer während des Simulationslaufs mindestens einmal ihre Maximalkapazität erreicht haben. Sehr stark streuen jedoch die mittleren Belegungen und die damit verbundenen durchschnittlichen Wartezeiten.

Die vorgestellten Durchschnittswerte allein bieten noch keine ausreichende Grundlage für eine abgesicherte Ergebnisinterpretation. Vielmehr ist es wichtig, den zeitlichen Verlauf der Pufferfüllstände zu kennen.

Um eine detailliertere und einfacher zu interpretierende graphische Darstellung zu erhalten, als sie der Simulator standardmäßig bereitstellt, wird eine Graphik-Schnittstelle vom GPSS-FORTRAN-Simulator Version III zum Erlanger Graphik-System (ERLGRAPH Version 2.06 M), einem umfangreichen Graphik-Programm-System, hergestellt.

Auslastung der Puffer					
Puffer			Simulationsergebnisse		
Nr.	Name	Kapazität [Stück]	Max. Beleg. [Stück]	Mittl. Beleg. [Stück]	Wartezeit [Sekunden]
1	SPULE AUF JOCH	30.	30.	5.2	28.4
2	KS-RING AUF MJ	86.	86.	15.2	83.2
3	KLAPPA AUF MJO	87.	87.	44.5	243.4
4	MSYSTEM IN MKA	56.	56.	45.4	248.0
5	SCHIEBER AUF W	47.	47.	34.1	186.7
6	SCHAKA AUF SCH	43.	43.	33.6	183.8
7	SCHAKA AUF MKA	56.	56.	45.2	247.4
8	LASERBESCHR.	15.	15.	9.6	52.3
9	SICHTPRUEFEN	100.	100.	45.2	247.2
10	PRUEFAUTOMAT	50.	50.	38.6	210.9
11	HANDLING : FTS	75.	19.	8.3	45.4

Abbildung 57: Auslastung der Puffer

Ausgangspunkt für die Graphik-Aufbereitung ist der Simulator. Die Datenbereiche, die vom Simulator angelegt werden, um die Meßwerte der Bins zu speichern, setzen sich aus Matrizen zusammen, die am Simulationsende gelöscht werden. Die Aufgabe der Schnittstelle ist die Sicherung der Wertetabellen aller Bins auf der Datei PLOTDAT. Dabei können maximal 500 Werte pro Bin in PLOTDAT gespeichert werden. Diese Datei wird zur Eingabedatei der neuentwickelten, interaktiven Prozedur GRAFIK. Die Anbindung der Graphik-Schnittstelle an den Simulator verdeutlicht Bild 58.

Die Prozedur GRAFIK liest die Datei PLOTDAT ein und erwartet vom Benutzer die Nummer der Bin, für die die graphische Darstellung benötigt wird. Nach der Eingabe der Zeitskalierung und weiterer Daten kann GRAFPRO die ERLGRAPH-Unterprogramme starten, die die graphische Darstellung berechnen und im Metafile GKSM ablegen. Von dort läßt sich das Bild auf den Grafikschiem bringen bzw. ausplotten (s. Bild 59).

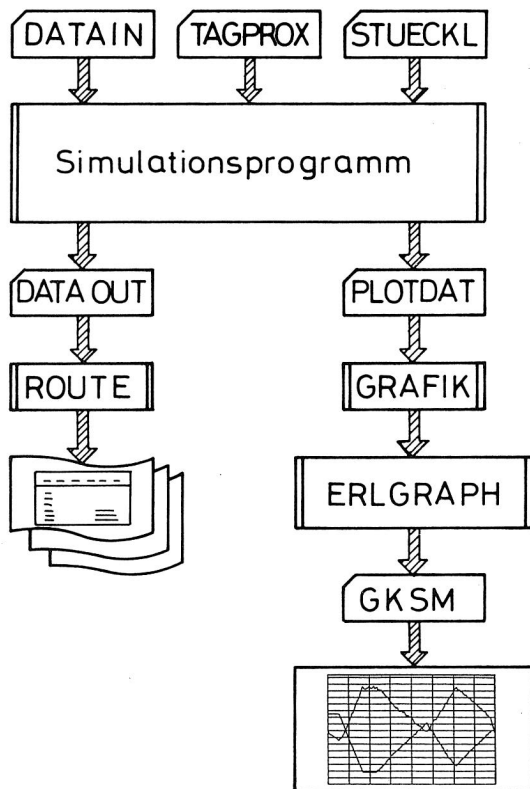


Abbildung 58: Integration einer Grafik-Schnittstelle zum Simulator

In Bild 59 ist der Füllstand des Zwischenspeichers von Nebenlinie 2 und der Hauptlinie für die Baugruppenvarianten A1 und A2 dargestellt. Auf der Nebenlinie werden parallel die Automaten I und II zum Spulenwickeln betrieben, wo jeweils 6 bzw. 10 Spulenkörper simultan bewickelt werden. Von der Hauptlinie wird für jedes zu montierende Gerät nur eine Spule dem Zwischenspeicher entnommen. Trotz der parallel arbeitenden Wickelköpfe können die Nebenlinienautomaten mit der Hauptmontagelinie aufgrund längerer Taktzeiten nicht Schritt halten. Lediglich im Zeitraum IV, indem beide Automaten die Variante A1 fertigen, bleibt die Stückzahl bis auf störungsbedingte Schwankungen im Zwischenspeicher nahezu konstant.

Die Speicherbestandsentwicklung für die Variante A2 in den Intervallen I und II zeigt, daß wesentlich mehr Spulen verbraucht werden, als am Automaten II produziert werden können ($\alpha < \beta$).

Es wird bei dem hier zugrundeliegenden Verbrauch der Hauptlinie deutlich, daß bei einer angepaßten und schnell reagierenden Steuerung der Wickelautomaten mit der gewählten Speicherdimensionierung keine Wartezeiten bei der Montage auftreten. Selbst Störungen an einem Automaten können in Abhängigkeit vom augenblicklichen Füllstand bis zu 2 Stunden dauern, ohne Auswirkungen auf den Produktionsprozeß zu haben.

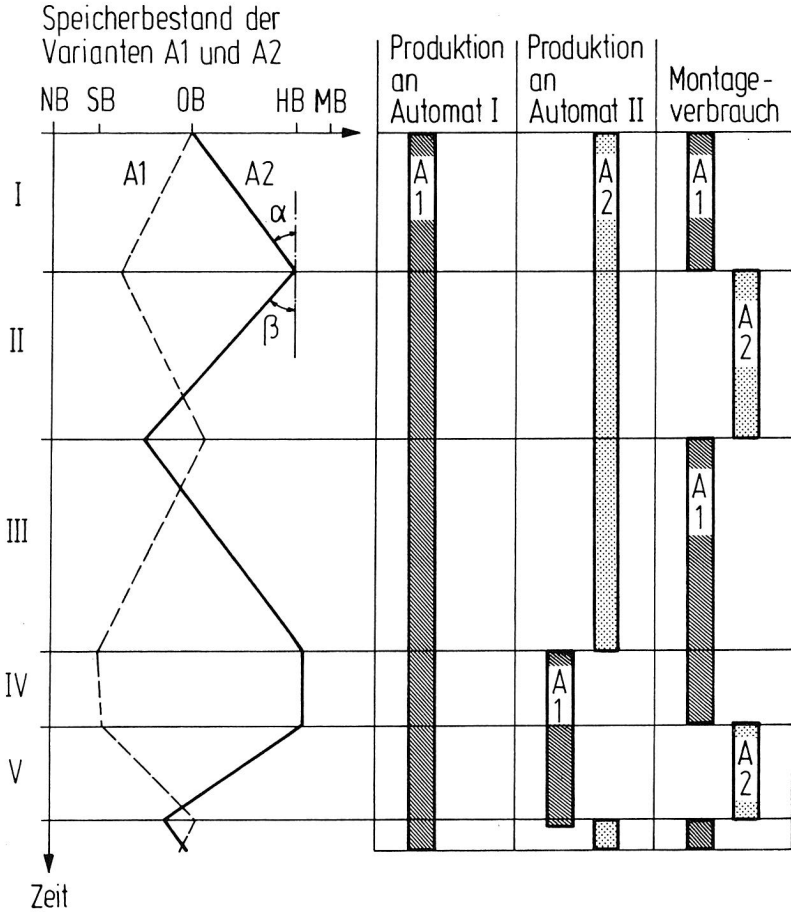


Abbildung 59: Darstellung der Pufferdynamik am Schnittstellenspeicher zwischen Haupt- und Nebenlinie

4.4 Erfahrungen und Konsequenzen aus der Studie

Nach den umfangreichen Test- und Simulationsläufen mit dem Simulator kann seine Leistungsfähigkeit gut beurteilt werden.

Der Aufbau von Simulations-Programmen ist grundsätzlich einfach durchführbar, da letztlich nur Unterprogramm-Aufrufe zusammengefügt werden müssen. Unterprogramme für die Modellierung von Montagesystemen sind zwar vorhanden, erfordern jedoch bei besonderen Systemelementen wie z.B. Zwischenspeichern von Haupt- und Nebenlinien den Entwurf eigener Konzepte.

Der Simulator unterstützt die Simulation von flexiblen Montagelinien damit sowohl beim Modellaufbau als auch bei der statistischen Ergebnisauswertung, so daß der Benutzer keine umfassenden mathematischen Kenntnisse benötigt. Keinerlei Unterstützung erfährt der Benutzer jedoch bei der Modellierung der Fertigungssteuerung und der Generierung und Verwaltung von Tagesprogrammen. Hier macht sich bemerkbar, daß GPSS-FORTRAN Version III als höherer Simulator keine Modellelemente und Modellfunktionen enthält, die typisch für einen systemorientierten Simulator wären. Spezifische Komponenten für die Steuerung bzw. die Generierung und Verwaltung von Tagesprogrammen müssen in Eigenleistung realisiert werden.

Nach diesen Erfahrungen muß festgehalten werden, daß für die Simulation komplexer Montagesysteme mit GPSS-FORTRAN ein erfahrener Simulationstechniker benötigt wird, der gemeinsam mit den Planern und Betreibern der Anlage ein Team bildet.

Die größte Schwachstelle der Standardversion des Simulators bei der Simulation von Montagesystemen ist jedoch der hohe Rechenzeit - und Arbeitsspeicherbedarf. Offensichtlich wurde der Simulator insbesondere für den Einsatz von kleinen Modellen konzipiert.

Die direkten Konsequenzen aus der Simulationsstudie betreffen vor allem die Planungsabteilung sowie die Fertigungsmittelkonstruktion. In Bild 60 sind die Gebiete, für die durch die Simulation entsprechende Ergebnisse gewonnen werden konnten, den Betriebsabteilungen zugeordnet. Fragen, die das Layout und Instandhaltungsprobleme betreffen, sind für beide Fachabteilungen relevant.

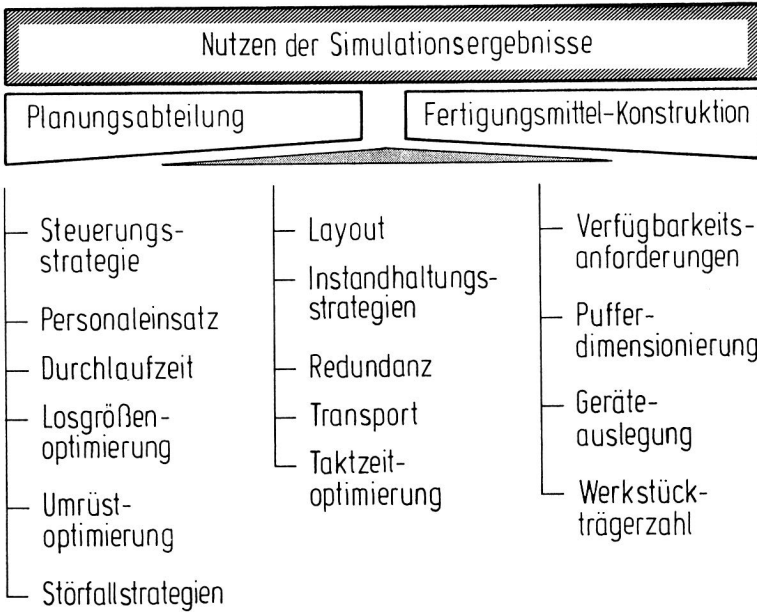


Abbildung 60: Ergebnisse aus der Simulationsstudie

5 Simulationssystem SIMU für die Montageplanung

Zur Unterstützung der Planung von Montagesystemen mit vernetzten Strukturen ist die Simulationstechnik ein geeignetes Hilfsmittel. Als unabdingbare Voraussetzung für ihren Einsatz verlangen die Planer eine nach kommunikationsergonomischen Aspekten ausgelegte Bedieneroberfläche sowie eine durchgängige Transparenz ihrer Vorgehensweise von der Dateneingabe über den Simulationslauf bis zur Ergebnisinterpretation. Diese Forderungen sind die Grundlagen für die Entwicklung des Simulationssystems SIMU.

5.1 Beschreibung des Simulators SIMU

Zur Steigerung der Planungsgüte und zur Reduzierung der erforderlichen Zeiträume wird mit SIMU (Simulation zur Montagesystem-Untersuchung) ein wichtiger Beitrag geleistet. Entsprechend dem in Bild 28 vorgeschlagenen Klassifizierungsschema nach Schmidt [83] läßt sich der Simulator zu den Simulationssprachen rechnen, die systemorientiert aufgebaut sind und diskrete Modelle abbilden.

5.1.1 Intention und Konzept

Der Simulator SIMU dient zur Grobsimulation verketteter Montagesystemstrukturen mittlerer Komplexität. Die Ziele, die durch das Simulationssystem erreicht werden sollen sowie die Anforderungen, die vom Planer gestellt werden und bei der Entwicklung berücksichtigt wurden, veranschaulicht Bild 61.

In der Planung von Montageanlagen besitzt die Frage nach dem zu erwartenden Nutzungsgrad und den damit verbundenen erreichbaren Stückzahlen eine zentrale Bedeutung. Hier muß die Simulation die entsprechenden Kenngrößen, wie Verfügbarkeit und Nutzungsgrad, liefern sowie Engpässe im System aufdecken. Gerade für verkettete Anlagen müssen in einer frühen Projektierungsphase die zur Störungsentkopplung notwendigen Pufferkapazitäten dimensioniert werden, um Platzbedarf und Kosten des Montagesystems abschätzen zu können. Zu diesem Zweck enthält SIMU ein Softwaremodul zur automatischen Pufferdimensionierung [81].

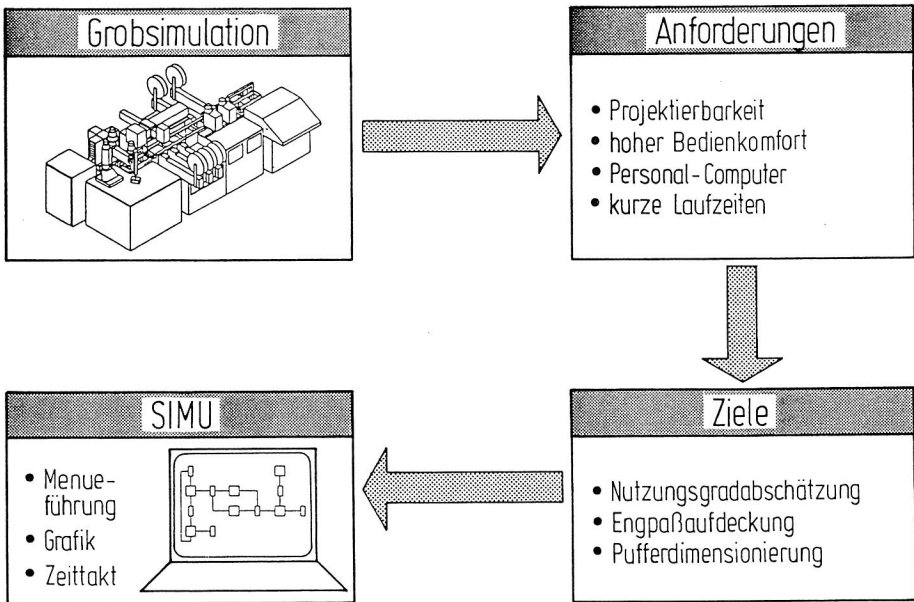


Abbildung 61: Ziele und Anforderungen an den Simulator SIMU

Die Erreichbarkeit der Ziele allein garantiert noch nicht die Akzeptanz im täglichen Planungseinsatz. Mit dem zunehmenden Preisverfall bei gleichzeitiger Leistungssteigerung heute verfügbarer Personal Computer besteht die Möglichkeit, durch die Einbeziehung grafischer Hilfsmittel sehr komfortable Bedieneroberflächen zu realisieren. Da gerade in der Grobplanungsphase sehr häufig Änderungen in der Systemstruktur vorkommen, gilt der Projektierbarkeit der Simulationsmodelle ein besonderes Augenmerk. Vorhandene Modelle müssen sich schnell z.B. durch Hinzunahme weiterer Stationen ändern lassen. Die Geschwindigkeit spielt auch bei der Simulationsdurchführung eine wichtige Rolle, um Planungsvorgaben kurzfristig auf ihre Effizienz überprüfen zu können.

Grundsätzlich lassen sich für die diskrete Simulation von Montageanlagen zwei unterschiedliche Konzepte der Ablaufsteuerung verwirklichen. Bei der Ereignistaktung wird eine Systemuhr bis zum nächsten Ereigniszeitpunkt erhöht. Dann werden die in der Ereignisliste eingetragenen Zustandsänderungen an den Stationen

durchgeführt und die nächsten Ereignisse terminiert.

Bei der Inkrementtaktung hingegen wird die Systemzeit jeweils um ein vorher definiertes Zeitinkrement erhöht. Die Stationen werden zu diesem Zeitpunkt abgefragt, ob eine Zustandsänderung durchzuführen ist. So wird beispielsweise eine funktionsfähige Station mit einem neuen Werkstück belegt, sofern diese frei und der davor liegende Puffer lieferbar ist.

Der Simulator SIMU arbeitet zeitorientiert, um vor allem für die kurzzyklischen Montageabläufe den sehr hohen Verwaltungs- und Suchaufwand einer Ereignistaktung zu umgehen. Als Zeitinkrement wird automatisch die kürzeste im System vorkommende Taktzeit gewählt.

5.1.2 Aufbau des Simulationsprogramms

Bei der Programmierung von SIMU wurde großer Wert auf eine modulare Struktur gelegt. Diese mußte einerseits durch den Compiler und andererseits durch die verwendete Grafiksoftware realisiert werden können. Der eingesetzte Rechner arbeitet mit dem Betriebssystem Concurrent CPM-86. Als Programmiersprache wurde Turbo-PASCAL ausgewählt. Die Grafik basiert auf GSX-86 und besteht aus dem Grafikbetriebssystem GDOS und der Ein-/Ausgabekomponente GIOS. Den modularen Aufbau des Simulators veranschaulicht Bild 62.

SIMU setzt sich aus drei unabhängigen Programmbestandteilen zusammen, die über drei Dateien miteinander kommunizieren. Die Anzahl der Montagestationen, die Zahl der Puffer sowie die Kenngrößen der Stationen und Puffer werden in der Datei STM abgelegt.

Bei der Simulation der Anlage fallen Daten an, die den jeweils aktuellen Stand beschreiben. Werte, wie z.B. die simulierte Zeit, die Zahl gefertigter Geräte, Störkennungen der Stationen und aktuelle Pufferfüllstände werden in der Datei LIN abgespeichert. Für jeden Simulationslauf wird eine neue LIN-Datei angelegt und anschließend gesichert. Dadurch besteht die Möglichkeit, Simulationsläufe zu einem späteren Zeitpunkt beispielsweise um eine weitere Schicht zu verlängern oder verschiedene Läufe miteinander zu vergleichen.

In der Datei PUFFER wird die Pufferbelegung über der Zeit mitprotokolliert. Im Takt der Zeitinkrementierung beim Simulationslauf wird der jeweilige Pufferfüllstand ermittelt, so daß der dynamische Pufferverlauf nach der Simulation

dargestellt werden kann.

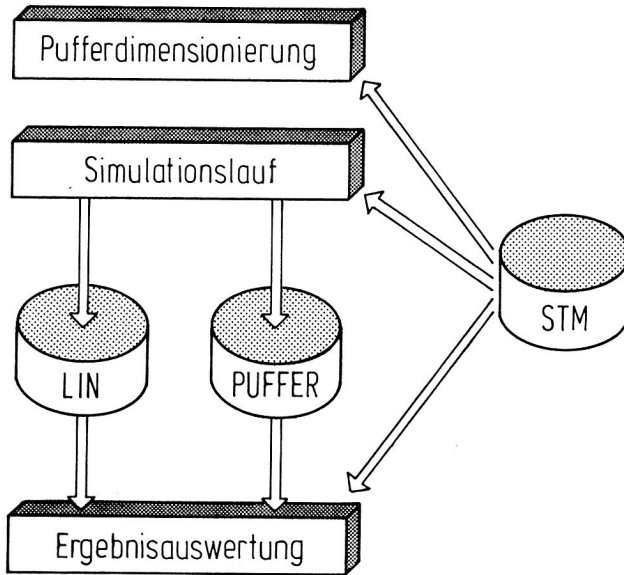


Abbildung 62: Programmodule und Dateien von SIMU

Der modulare Aufbau des Simulators zeigt sich dem Bediener in der Menüführung (s. Bild 63).

Hier wird wiederum die Dreiteilung in Simulation, Pufferdimensionierung und Ergebnisaufbereitung deutlich. Der Ablauf einer erstmaligen Simulation beginnt im Vorbereitungs-Menue mit der System-Eingabe. Im Eingabe-Menue wird zunächst der Linienaufbau vorgenommen. Anschließend erfolgt die Definition der Stations- und Pufferdaten. An dieser Stelle lassen sich die eingegebenen Daten vor Beginn des Simulationslaufs kontrollieren und die Struktur der Gesamtanlage kann auf einem Plotter ausgegeben werden.

Nach Vorgabe der Simulationszeit und der Entscheidung, ob die Animation während der Laufzeit erfolgen soll, wird im Simulations-Menue der Simulationslauf ausgeführt. Hier läßt sich die Simulation beliebig oft unterbrechen und der Grafikmodus ändern. Nach Beendigung der Experimentierphase können die Ergebnisse sowohl numerisch als auch grafisch im Ergebnis-Menue abgerufen werden.

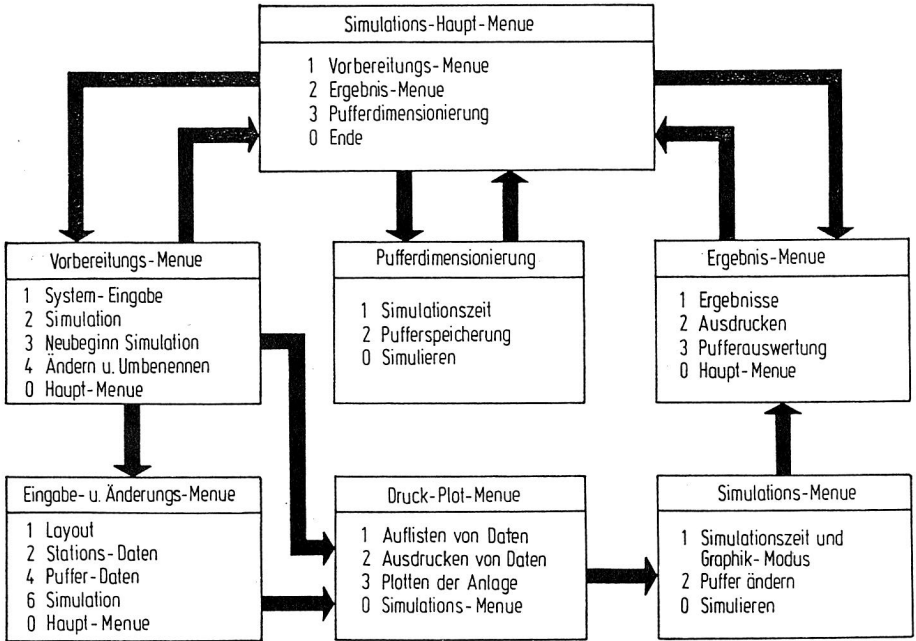


Abbildung 63: Menueführung von SIMU

5.1.3 Eingabedaten für die Simulation

Nach dem menuegeführten Aufbau der Anlagenstruktur auf dem Grafikmonitor erfolgt die Eingabe der Kenndaten für die Stationen und Puffer. Bild 64 zeigt das Vorgehen, nach dem zu verfahren ist.

Die Station wird mit einem Namen versehen, unter dem sie später identifiziert werden kann. Nach der Definition von Taktzeit und Verfügbarkeit wird das Lauf- und Störzeitverhalten eingetragen. Hier werden zunächst die Anzahl der Zeitklassen und in einem späteren Menue die Klassengrenzen und relativen Häufigkeiten definiert. Zur Einordnung der Station in die Abarbeitungsreihenfolge während der Simulation müssen die Ein- und Ausgangspuffer benannt werden. Die Verkettung der Gesamtanlage wird auf Grundlage dieser Informationen bezüglich der Plausibilität getestet. Hier liegt ein erster Schritt der Validierung des Modells.

Durch die Eingabe der Teile, die pro Takt bewegt werden sollen, besteht die Möglichkeit einer Modellierung von Mehrfachbedienstationen. Darüberhinaus las-

sen sich mit diesem Mittel an Verzweigungspunkten unterschiedliche relative Häufigkeiten der Werkstückströme hervorrufen. Hat eine Station beispielsweise zwei Ausgangspuffer, so kann der eine 90% und der andere 10% der Teile bekommen. Diese Eingabe kommt z.B. bei Prüfstationen zum Tragen.

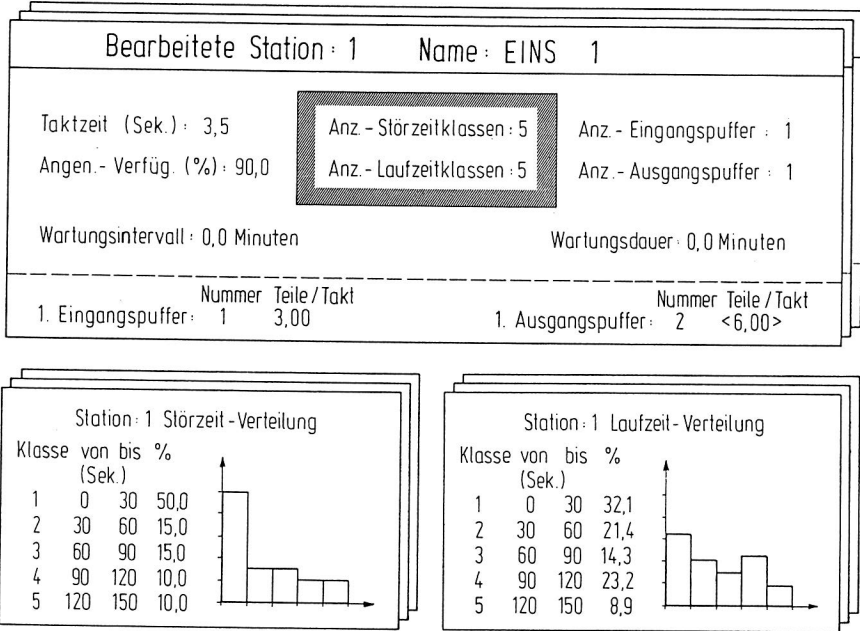


Abbildung 64: Eingabe der Stations-Kenngrößen

Analog der Vorgehensweise bei der Stationsdateneingabe werden auch die Pufferkenngrößen dem Simulationsmodell eingegeben.

5.1.4 Programmmodul zur Selbstdimensionierung der Puffer

Eine zumeist im Grobplanungsstadium sehr undefinierte Kenngröße ist die Kapazität der zur Störungsentkopplung vorzusehenden Puffer. Zur Bestimmung dieses Parameters ist eine iterative Vorgehensweise sehr aufwendig und zeitintensiv. Aus diesem Grunde wurde für SIMU ein Modul entwickelt, mit dem vor der Durchführung der Simulationsläufe die Pufferdimensionen automatisch nach technischen Kriterien optimiert werden können.

Der Algorithmus für die Optimierung basiert auf dem in Bild 65 vorgestellten Vorgehen. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Puffer immer aufnahme- bzw. liefer-

bereit und zu Beginn des Optimierungslaufs leer sind.

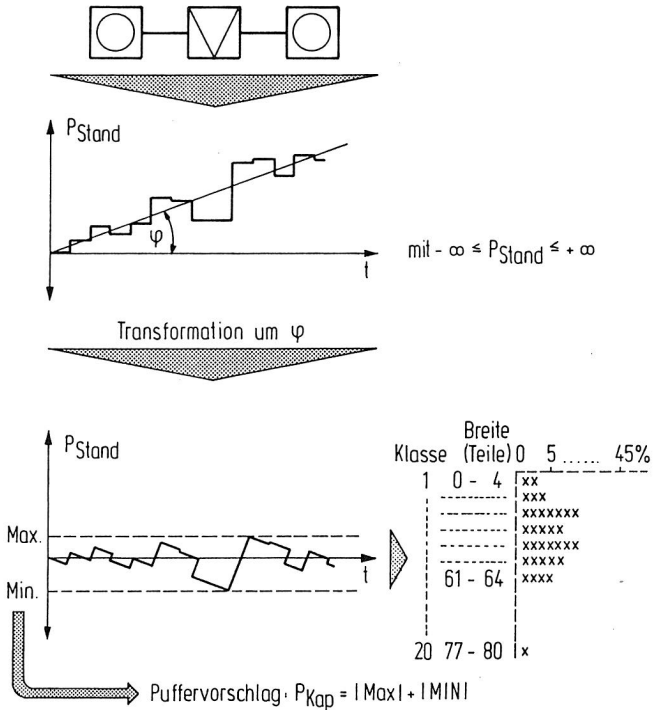


Abbildung 65: Vorgehen der automatischen Pufferdimensionierung

Unter diesen Voraussetzungen wird ein Simulationslauf gestartet, um die Pufferbestandsentwicklung verfolgen zu können. Es zeigt sich, daß abhängig von den mittleren Verweildauern der beliefernden und entnehmenden Stationen die Pufferbelegung P_{Stand} tendenziell fällt oder steigt. Bei einer Linearisierung der Bestandsverläufe gilt die Beziehung:

$$P_{Stand(linear)}(t) = \varphi * t \quad (9)$$

- P_{Stand} aktuelle Pufferbelegung
- φ Drift (Steigung der Geraden)
- t Zeit

Aufgrund der unterschiedlichen Lauf- und Störzeitverteilungen der benachbarten Stationen stellt sich kein absolut stetiger Verlauf der Pufferstände ein. Die hier

auftretenden Schwankungen sind gerade für die Dimensionierung von Puffern zur Störungsentkopplung interessant. Ein Optimum der Kapazität liegt dann vor, wenn die gesamte Amplitude der Schwankung aufgefangen werden kann.

Zur Berechnung dieser Schwankungsbreite wird die Bestandsentwicklung um die Drift auf die Zeitachse transformiert. Die Transformationsgleichung lautet:

$$P_{Stand(trans)}(t) = P_{Stand(real)}(t) - (\varphi * t) \quad (10)$$

Aus der Differenz der Maximal- und Minimalwerte für die transformierten Pufferstände ergibt sich die Kapazität, mit der 100% der Schwankungen abgedeckt werden. Abhängig von der Häufigkeitsverteilung - insbesondere von den Extremwerten bei den Pufferbeständen - kann es sinnvoll sein, nicht die gesamte Amplitude zu berücksichtigen. So wird beispielsweise in dem in Bild 65 gezeigten Beispiel deutlich, daß immer noch in 99% aller Fälle ein Durchschlagen von Störungen auf benachbarte Stationen vermieden wird, wenn die Gesamtkapazität von 80 auf 64 Teile reduziert wird.

Abschließend muß für die Pufferdimensionierung festgehalten werden, daß die Ergebnisse nur gültig sind, wenn

- die Zeit des Optimierungslaufes durch Trendbeobachtung ausreichend lang gewählt wird, um ein repräsentatives Verhalten abzubilden,
- nur Kurzzeitstörungen durch die Puffer kompensiert werden sollen.

5.1.5 Ergebnisse aus Simulationen mit SIMU

Die Aufbereitung und Auswertung der Simulationsdaten orientiert sich vornehmlich an den Zielen, die durch den Einsatz der Simulation erreicht werden sollen. Hier stehen vor allem die ausgebrachte Stückzahl bzw. der Nutzungsgrad der Anlage im Vordergrund. Wie Bild 66 zeigt, erfolgt das Auswählen der zur Beurteilung des Systemverhaltens notwendigen Ergebnisdaten menuegeführt. Dabei stehen unterschiedliche Ausgabemedien, wie z.B. Monitor, Grafikbildschirm, Drucker usw. zur Verfügung. Neben den globalen Daten für das Gesamtsystem lassen sich sowohl puffer- als auch stationsbezogene Informationen darstellen.

Der Vergleich von vorgegebener und während des Simulationslaufs erreichter Verfügbarkeit mit dem Nutzungsgrad für jede Station ist in zweifacher Hinsicht von

besonderer Relevanz. Einerseits läßt sich hiermit ermitteln, inwieweit die abgeschlossene Simulation repräsentative Daten liefert. Weichen vorgegebene und erreichte Verfügbarkeit voneinander ab, so war die Anzahl der Aufrufe des Zufallszahlengenerators noch nicht ausreichend, um das tatsächliche Verhalten der Station richtig abzubilden. Andererseits zeigt die Grafik, daß bei einer starken Differenz von Nutzungsgrad und Verfügbarkeit bedeutende organisationsbedingte Einflüsse auf die betroffene Station zu verzeichnen sind. Diese können beispielsweise auf Mängel in der Abtaktung zurückzuführen sein, aber auch aufgrund falsch dimensionierter Pufferkapazitäten entstehen.

Anhand der auf einen spezifischen Simulationslauf bezogenen Ergebnisdaten können Vergleiche unterschiedlicher Läufe angestellt werden, um die Effizienz der Veränderung von Eingangsparametern abschätzen zu können. So läßt sich hier u.a. sehr anschaulich zeigen, ab wann beispielsweise die weitere Vergrößerung eines Puffers keinen erkennbaren Nutzungsgradzuwachs bringt (s. auch Bild 76).

5.2 Validierung des Programmsystems

Bevor ein Modell genutzt werden kann, um Simulationen durchzuführen, muß es sorgfältig validiert werden. Dies gilt für jede neue Abbildung einer Montageanlage genauso wie für die einmalige Validierung des Simulationssystems und seiner integrierten Algorithmen. Der sicherste Weg, den Beweis zu erbringen, daß die Simulation tatsächlich hinreichend genau die Wirklichkeit abbildet, ist ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den realen Gegebenheiten. Da sich diese Methode jedoch in praxi nicht anwenden läßt, besteht nur die Möglichkeit, die Übereinstimmung mit analytisch ermittelten Resultaten zu überprüfen bzw. Plausibilitätstests anzustellen.

Im folgenden wird an einfachen exemplarischen Montagesystemstrukturen die Validierung durch den Vergleich von analytischen mit Simulationsergebnissen dargestellt.

5.2.1 Reihenanordnung von Montagestationen

Das untersuchte Montagesystem besteht aus zwei Stationen mit je 90% Verfügbarkeit. Die Kapazität eines dazwischen liegenden Puffers beträgt $K=1$, so daß von einer starren Verkettung ausgegangen werden kann (s. Bild 67). Beide Monta-

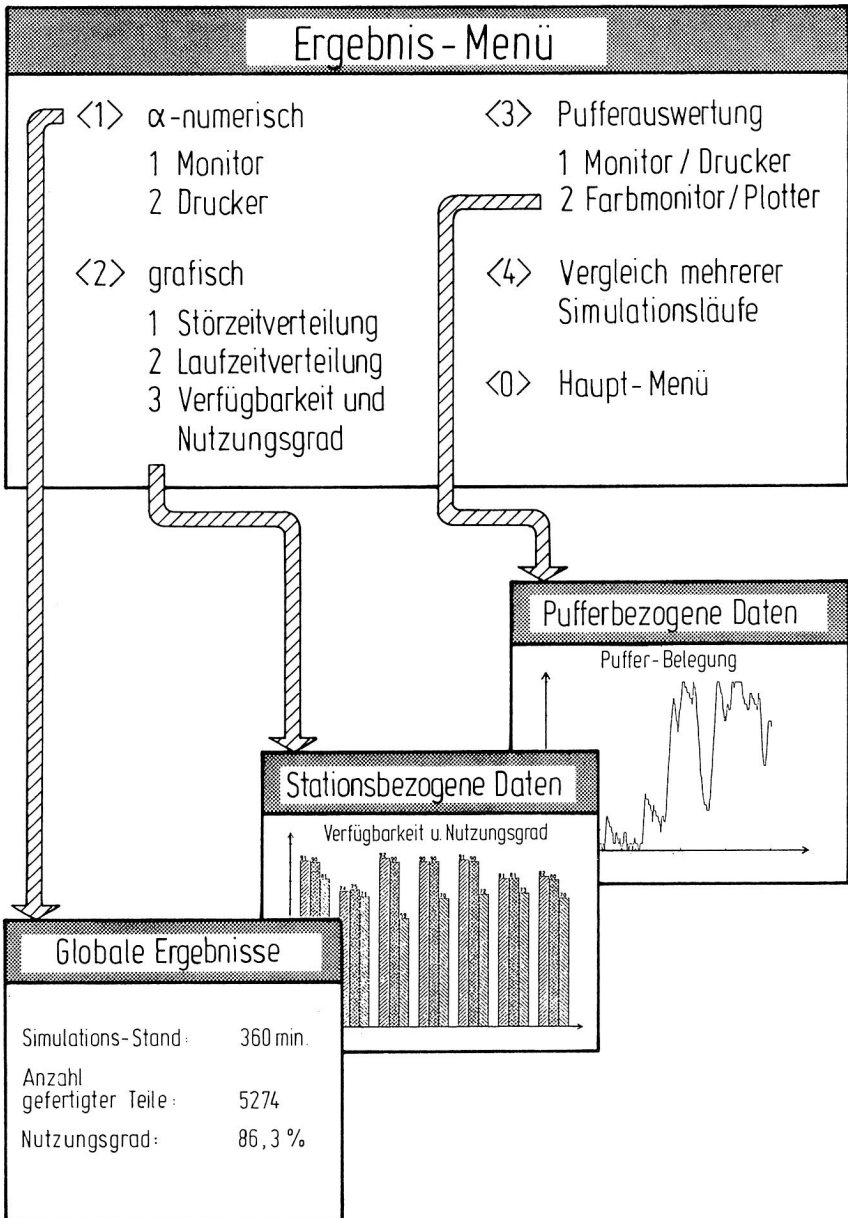


Abbildung 66: Ergebnismenue bei SIMU

geautomaten müssen störungsfrei arbeiten, um einen kontinuierlichen Output des Gesamtsystems zu gewährleisten. Das Auftreten von Störungen sind unabhängige Ereignisse, so daß gilt:

$$P(L) = V_1 * V_2 = N \tag{11}$$

P(L) P(L) Wahrscheinlichkeit für einen störungs-
freien Lauf des Montagesystems

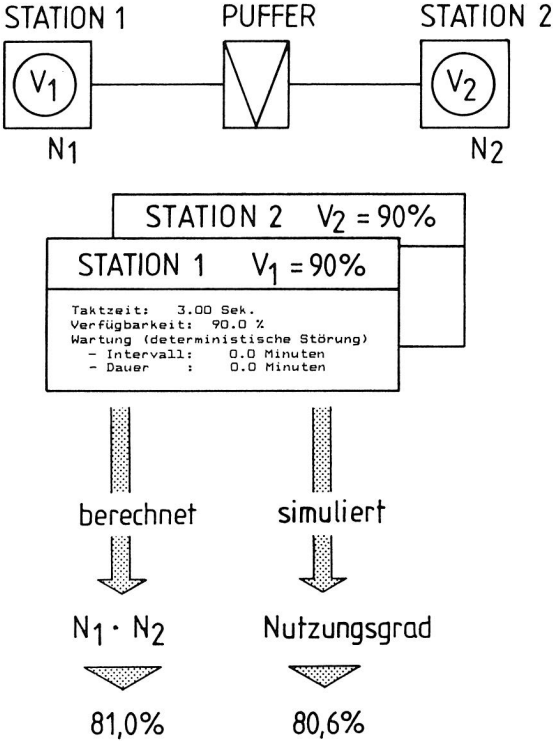


Abbildung 67: Validierung einer Reihenmodellstruktur

Nach den in Bild 67 vorgegebenen Verfügbarkeitswerten ist eine Wahrscheinlichkeit von $P(L) = 81\%$ für einen störungsfreien Lauf der Montagelinie zu erwarten. Die Simulation liegt mit einem Nutzungsgrad, der aufgrund der starren Verkettung in diesem Fall der Wahrscheinlichkeit entspricht, von 80,6% fast exakt an dem errechneten Wert.

5.2.2 Kombinierte Reihen- und Parallelstruktur

Die Anlage besteht aus drei Stationen, von denen entsprechend Bild 68 zwei parallel und die dritte mit diesen in Reihe angeordnet sind. Der Gesamtnutzungsgrad

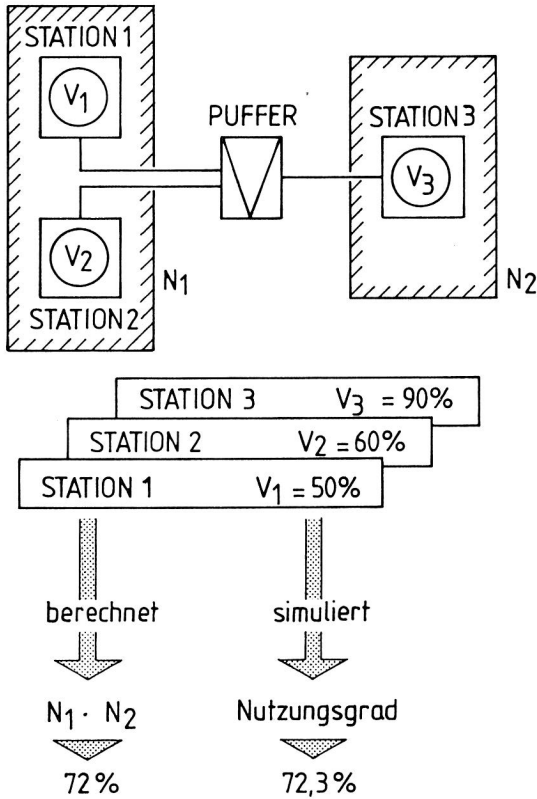


Abbildung 68: Validierung eines Modells für kombinierte Systeme

errechnet sich aus dem Produkt von N_1 und N_2 . Zur Bestimmung von N_1 wird das Komplementärereignis $P(S)$ für die Wahrscheinlichkeit $P(L)$ zugrundegelegt, daß wenigstens eine Station lauffähig ist. Somit gilt:

$$P(S) = (1 - V_1) * (1 - V_2) \quad (12)$$

$P(S)$ Wahrscheinlichkeit dafür, daß beide Stationen gleichzeitig gestört sind und somit die Anlage steht

Daraus folgt:

$$N_1 = 1 - P(S) = (V_1 + V_2) - V_1 * V_2 \quad (13)$$

Eine Betrachtung der Zahlenwerte von Simulation und Berechnung zeigt auch für dieses Modell bei einer Abweichung von lediglich 0,3% eine sehr gute Übereinstimmung.

5.2.3 Animation zur Validierung von Modellen

Nachdem anhand der vorgestellten Beispiele eine Validierung der Simulationssoftware durchgeführt worden ist, muß für jedes neuerstellte Modell nachgewiesen werden, daß das reale Systemverhalten wirklich hinreichend genau abgebildet wird. Hier existieren unterschiedliche Möglichkeiten (s. Bild 69), von denen insbesondere die Animation besonders zur Akzeptanz beim Planer beiträgt.

Vergleichende Berechnungen lassen sich nur für Extremsituationen anstellen, für die analytische Berechnungsverfahren existieren. Extremsituationen liegen z.B. dann vor, wenn Pufferkapazitäten so weit reduziert werden, daß eine starre Verkettung auftritt. Eine weitere Möglichkeit liegt darin, redundante Stationen während der Simulation als gestört zu betrachten und damit berechenbare Reihenanordnungen zu erzeugen.

Mit Hilfe von Plausibilitätsuntersuchungen lassen sich Tendenzen, die durch Schätzverfahren zu erwarten sind, überprüfen. So muß der Nutzungsgrad einer Anlage beispielsweise steigen, wenn eine Engpaßstation durch einen redundanten Automaten entlastet wird. Das gleiche gilt für die Erhöhung von Pufferkapazitäten. Da Plausibilitätstests rein qualitative Aussagen bringen, sind sie für eine vollständige Validierung allein im Regelfall nicht ausreichend.

Die Animation bringt sehr anschauliche Informationen zum Ablauf der Simulation. Besonders das Sichtbarmachen der Zustandsübergänge an den Montagestationen und die Veränderung der Pufferfüllstände sowie deren gegenseitige Abhängigkeiten versetzen den Planer in die Lage, zu beurteilen, ob das System hinreichend genau und korrekt im Modell abstrahiert wurde. In Bild 69 wird deutlich, daß durch die Störung der Station II ein Leerlaufen des Puffers II stattgefunden hat. Dadurch kann Station III nicht mehr mit Werkstücken versorgt werden und geht über in den Status "wartend". Aufgrund der noch vorhandenen Aufnahmekapazität im ersten Puffer kann Station I weiterarbeiten.

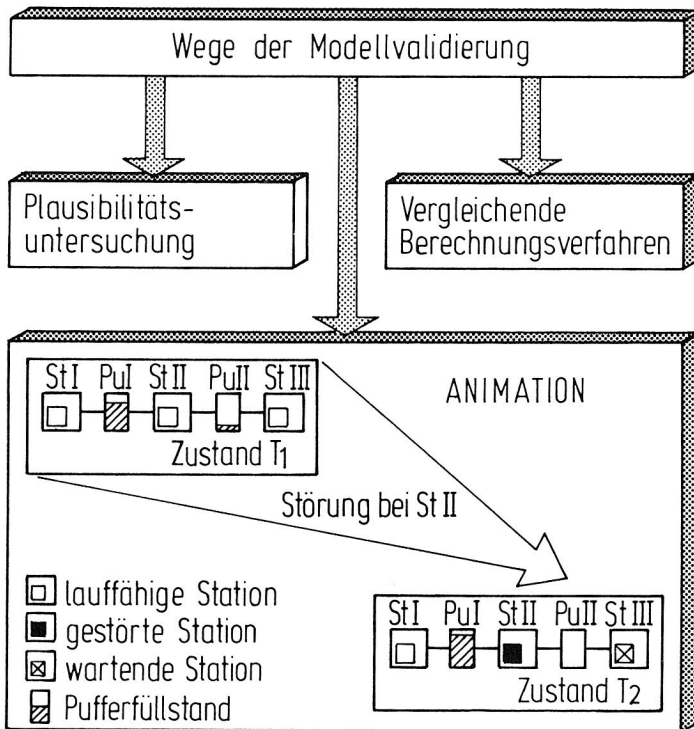


Abbildung 69: Möglichkeiten der Modellvalidierung

An diesem einfachen Beispiel wird bereits deutlich, daß insbesondere durch die Transparenz der Wechselwirkungen der Stationen in einem Montagesystem das Funktionieren des Modells sehr schnell nachgewiesen werden kann. Darüberhinaus wird der Montageplaner die durch die Simulation gewonnenen Ergebnisse viel eher akzeptieren und sie als Grundlage für Verbesserungsentscheidungen nutzen.

5.3 Demonstration von SIMU an einem Montagesystem

Der Einsatz des Simulators SIMU soll im folgenden an einem konkreten Montagesystem vorgestellt werden. Dabei handelt es sich nicht um eine reale Anlage, sondern um ein fiktives System, bei dem typische Anforderungen aus der Montage-technik berücksichtigt werden.

5.3.1 Vorstellung der Montageanlage

Die Montageanlage besteht aus acht miteinander verketteten Stationen, die durch Puffer unterschiedlicher Kapazität entkoppelt werden. Die Verfügbarkeiten und Taktzeiten wurden so gewählt, daß repräsentative Voraussetzungen für eine Anlage zur Montage elektromechanischer Geräte, wie z.B. Schütze, gegeben sind. Die Struktur des Montagesystems zeigt Bild 70.

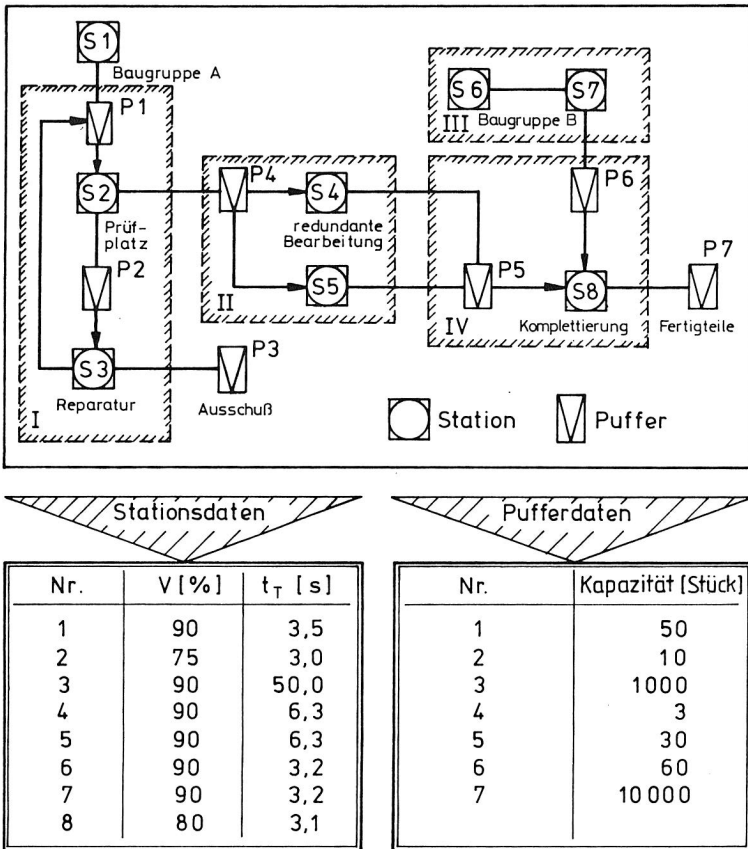


Abbildung 70: Struktur und Daten der Montageanlage

Der Ablauf der Gerätemontage beginnt mit der Fertigung einer Baugruppe A in Station 1. Auf dem Prüfplatz S2 wird nach einer zuvor definierten Verteilung entschieden, ob die Baugruppe fehlerhaft ist oder weiterbearbeitet werden soll. Im Fehlerfall gelangen die Teile über den Puffer P2 in eine Reparaturstation. Dort

werden nicht reparable Geräteteile in den Ausschuß gegeben. Die anderen Baugruppen gelangen nach der Fehlerbeseitigung erneut in den Puffer P1, um nochmals geprüft zu werden. Dieser Bereich I stellt den für die Montage typischen Fall der Rückführung dar.

Die redundante Bearbeitung in den Stationen S4 und S5 repräsentiert den Fall der Parallelanordnung mit Verzweigung und Zusammenführung des Werkstückflusses (s. Bereich II in Bild 70). Die Stationen haben in diesem Fall die gleiche Funktion, d.h. sie sind voll ersetzend. Bei Stillstand eines Automaten kann die Fertigung fortgesetzt werden, wenn auch mit vermindertem Ausstoß.

Im Bereich III wird in einer starren Reihenanordnung die Vormontage der Baugruppe B vorgenommen. Die Komplettierung des Gerätes erfolgt durch die Zusammenführung der beiden vormontierten Gerätebestandteile in Station S8. In diesem Bereich IV wird die für die Montage wesentliche Voraussetzung der zeit- und mengenrichtigen Lieferbereitschaft der Fügeteile miteinbezogen. Die fertigen Geräte gelangen schließlich in den Puffer P7.

Im unteren Teil des Bildes 70 sind die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung der Stationen und Puffer enthalten. Hier wird deutlich, daß sowohl die Verfügbarkeiten als auch Taktzeiten sehr stark streuen.

In der anschließenden Pufferdimensionierung und Simulation werden die starr verketteten Stationen 6 und 7 zusammengefaßt und im weiteren mit Station 6 bezeichnet. Daraus folgt auch, daß die Komplettierstation 8 im folgenden unter Nr.7 geführt wird.

5.3.2 Automatische Dimensionierung der Puffer im System

Vor der Durchführung der Simulationsläufe werden zunächst die Puffer im System nach technischen Kriterien dimensioniert. Von besonderem Interesse sind in dem betrachteten Montagesystem die Puffer 4,5 und 6, da sie einerseits in der Hauptflußrichtung und andererseits an den besonders kritischen Verzweigungspunkten der Anlage liegen. Das Vorgehen der automatischen Pufferdimensionierung erfolgt wie unter Punkt 5.1.4 beschrieben. Dabei ergibt sich der exemplarisch für Puffer 6 in Bild 71 dargestellte Kapazitätsvorschlag.

Insbesondere aus der Belegungsverteilung wird deutlich, daß bei einer Reduzierung der vorgeschlagenen Kapazität auf 55 Teile immer noch in 94% aller Fälle ein

ausreichendes Fassungsvermögen des Puffers vorhanden ist. Diese Dimensionierung erscheint vor allem auch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien gerechtfertigt.

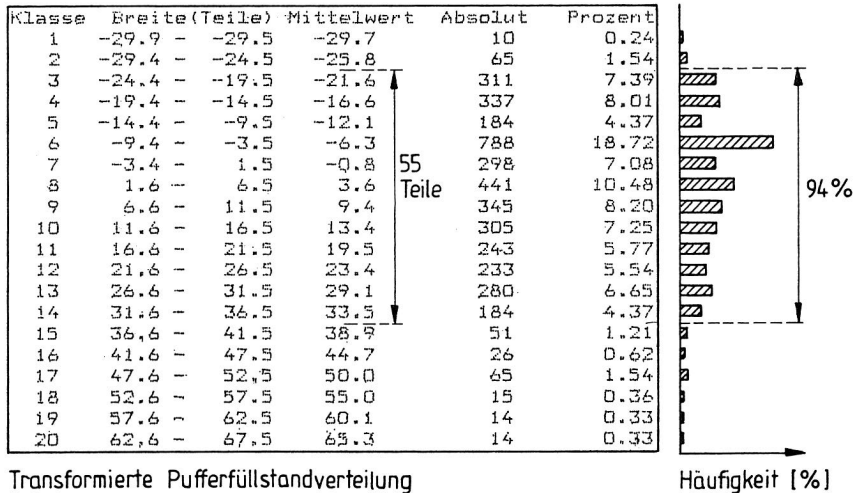


Abbildung 71: Dimensionierungsvorschlag für Puffer 6 mit Belegungsverteilung

5.3.3 Simulation und Animation des Montagebeispiels

Die primären Ziele der Simulationsstudie liegen in der

- Bestimmung des zu erwartenden Nutzungsgrades bzw. der Ausbringung des Montagesystems,
- Erkennung der Schwachstellen und Engpässe im System,
- Darstellung der Wechselwirkungen der Stationen und Puffer untereinander.

Nach der Modellierung des Gesamtsystems und der Eingabe der stations- und pufferrelevanten Kenngrößen wird anhand der Animation in einem ersten Simulationslauf die Validierung unterstützt und dem Planer das dynamische Verhalten seiner Anlage gezeigt. In Bild 72 wird ein konkreter Zustand dargestellt.

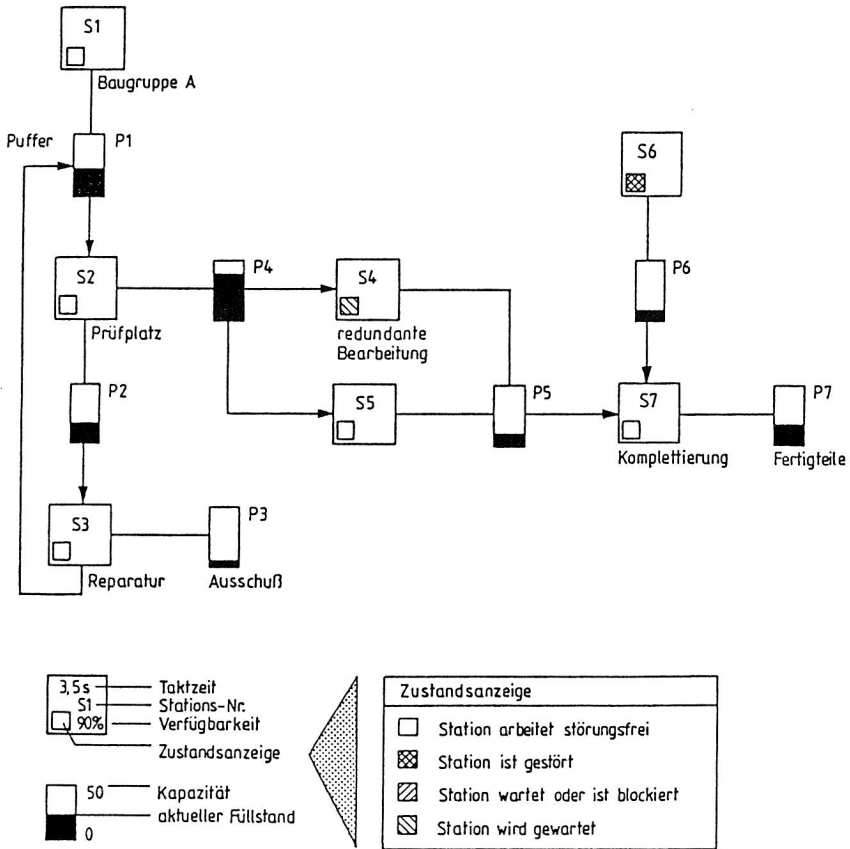


Abbildung 72: Animationsbild des Montagesystembeispiels

Am Grafikmonitor werden in den Zustandsfeldern jeder Station der augenblickliche Status sowie der aktuelle Pufferfüllstand abgebildet. Neben diesen sich zeitlich ändernden Informationen werden permanent die Taktzeit, Verfügbarkeit und Pufferkapazität angezeigt. Im vorliegenden Zustand wird Station 4 gewartet. Die Wartung bleibt noch ohne Auswirkung, da in der redundant angeordneten 5. Montagestation weitergearbeitet wird. Sollte jedoch an Station 4 die Unterbrechung länger dauern, muß auch an Station 7 mit Wartezeiten und an 2 mit Blockierungen gerechnet werden. Das zu vermeiden, ist u.a. die Aufgabe der zwischengeschalteten Puffer. Es wird weiterhin deutlich, daß die in Station 6 aufgetretene Störung aufgrund der noch in Puffer 6 vorhandenen Teile nicht die Station 7 beeinflusst.

Die Animation kann zur Beschleunigung des Simulationslaufs jederzeit abgebrochen werden. Für besonders interessierende Zeiträume läßt sich die visuelle Darstellung der Anlagendynamik wieder zuschalten. Nachdem der Planer ausreichend das Systemverhalten analysieren konnte, wird die Simulation - wie in Bild 73 dargestellt - fortgesetzt.

Zur Erreichung des Hauptzieles, einen wirtschaftlich vertretbaren Nutzungsgrad des Systems zu bekommen, werden zunächst die Puffer optimiert. Mit den ermittelten Kapazitätswerten wird dann für den vorhandenen Planungsstand mit der Simulation der Nutzungsgrad bestimmt. Werden die vorgegebenen Stückzahlen noch nicht erreicht, so müssen entsprechende Verbesserungsmaßnahmen ausgewählt und in einem erneuten Simulationslauf auf ihre Effizienz untersucht werden. Dieses Wechselspiel wird so lange wiederholt, bis das vorgegebene Ziel erreicht wird oder festgestellt werden muß, daß die Produktstückzahlen mit dem vorliegenden Konzept nicht realisiert werden können.

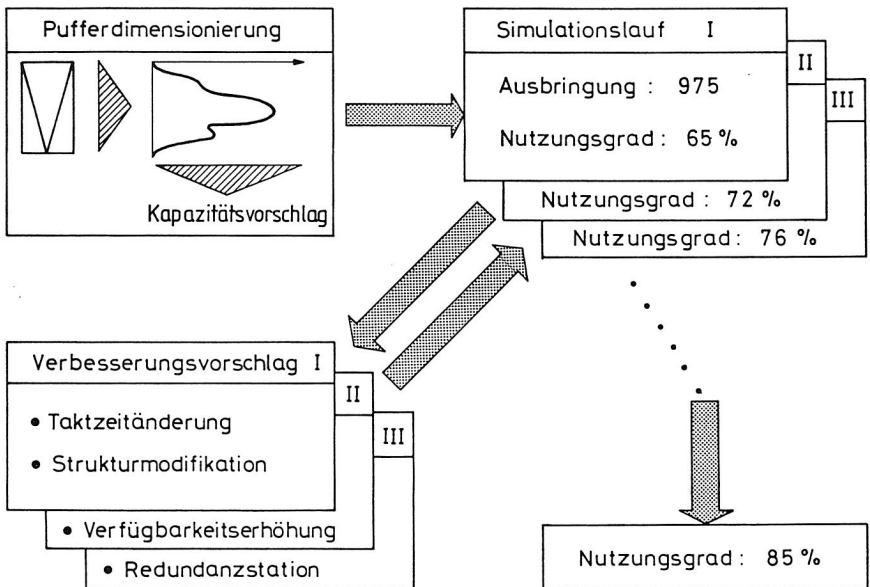


Abbildung 73: Ablauf der Simulationsstudie

Grundsätzlich muß im Interesse einer systematischen Vorgehensweise und einer möglichst geringen Anzahl notwendiger Simulationsläufe die Variation der Eingabeparameter sehr sorgfältig geplant werden. Dazu gehört auch, daß immer nur ein Parameter verändert werden darf, um eindeutige Zuordnungen bei erkennbaren

Veränderungstrends treffen zu können.

5.3.4 Präsentation und Interpretation der Ergebnisse

Nach der Simulation mit den in Bild 70 beschriebenen Eingabedaten ergibt sich eine Ausbringung der Anlage von durchschnittlich 813 Teilen pro Stunde. Dieser Wert entspricht einem Nutzungsgrad von 70% an der letzten Station (s. Bild 74).

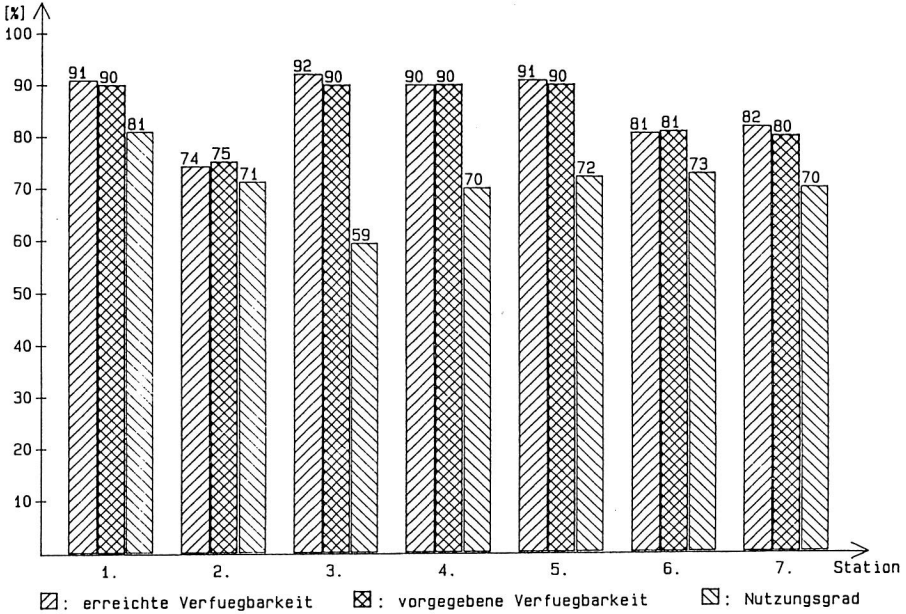


Abbildung 74: Verfügbarkeit und Nutzungsgrad der simulierten Anlage

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf einem Simulationszeitraum von 8 Std., in denen 6504 Teile produziert wurden. Der Vergleich zwischen den vorgegebenen und durch den Zufallszahlengenerator erzeugten Verfügbarkeiten zeigt, daß dieser Lauf repräsentativ das Anlagenverhalten abbildet. Die erreichten Verfügbarkeiten an den Stationen stimmen sehr gut mit den Eingabedaten überein.

Bei einer Betrachtung der Nutzungsgrade der Stationen fällt auf, daß insbesondere die Stationen 3, 4 und 5 sehr große Differenzen zur Verfügbarkeit aufweisen. Daraus läßt sich schließen, daß neben den technischen Nutzungsgradeinbußen vor

allem Warte- und Blockierzeiten auftreten. Diese Zeiten sind am Reparaturplatz 3 nur von zweitrangiger Bedeutung, da hierdurch die Gesamtausbringung des Montagesystems nicht beeinflusst wird. Lediglich die Auslastung dieser Station ist sehr gering, so daß evtl. weitere Aufgaben von diesem Arbeitsplatz übernommen werden könnten.

Wie eine detaillierte Auswertung der pufferbedingten Wartezeiten an den Montagestationen 4 und 5 zeigt, befinden sich diese 96 bzw. 90 Minuten im Status "Warten", was sich direkt auf die Ausbringung der Anlage auswirkt. Dieser Zustand kann nur dann verbessert werden, wenn die Lieferbereitschaft von Station 2 gesteigert wird. Da der Arbeitsinhalt in der Prüfwelle in diesem Fall eine Taktzeit von 3 Sekunden erfordert, läßt sich ein gesteigerter Teiledurchsatz nur durch eine Erhöhung der Verfügbarkeit auf 80% erreichen, die durch entsprechende konstruktive Maßnahmen erreicht werden kann.

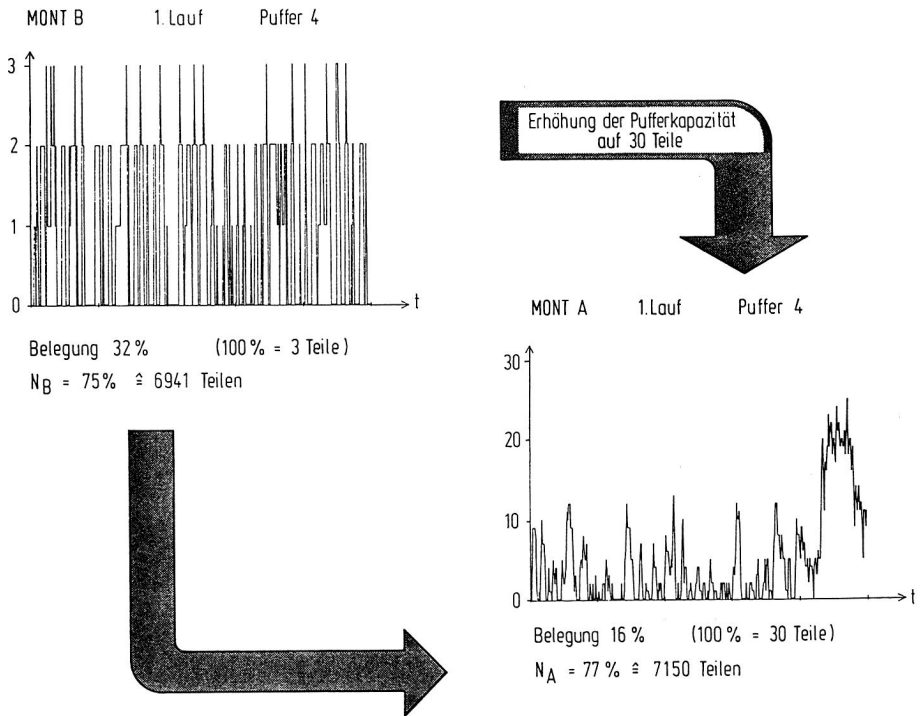


Abbildung 75: Vergleich der dynamischen Füllstände von Puffer 4 mit 3 und 30 Teilen

Eine erneute Simulation mit dieser geänderten Eingangsgröße führt zur Produktion von 6941 Teilen in 8 Stunden - entsprechend einem Nutzungsgrad von 75%. Auch hier sind jedoch noch Verbesserungspotentiale bei einer Betrachtung der Nutzungsgrade von Station 4 und 5 zu erwarten. Wie Bild 75 zeigt, befindet sich der Puffer 4 sehr oft im Zustand "leer" und führt damit zu Wartezeiten an den folgenden Stationen. Es ist daher naheliegend, die Kapazität des Puffers zu erhöhen. Eine Kapazität von 30 Teilen führt zu einer Steigerung der montierten Teilezahl auf 7150 Einheiten, was der geforderten stündlichen Ausbringung von 900 bereits sehr nahekommt. Analysiert man den Pufferverlauf im rechten Teil des Bildes 75, so wird deutlich, daß zwar die durchschnittliche Belegung nur bei 16% liegt, die Gesamtkapazität jedoch gut ausgenutzt wird. Wartezeiten aufgrund von Pufferengpässen treten an den folgenden Stationen 4 und 5 praktisch nicht mehr auf. Eine weitere Steigerung des Nutzungsgrades des gesamten Montagesystems ist kaum noch zu erwarten, da an der letzten Station Nutzungsgrad und Verfügbarkeit nur noch um 3% auseinander liegen.

Bild 76 veranschaulicht die Sättigung beim Verlauf des Nutzungsgrades bei einer kontinuierlichen Verfügbarkeitserhöhung an Station 2.

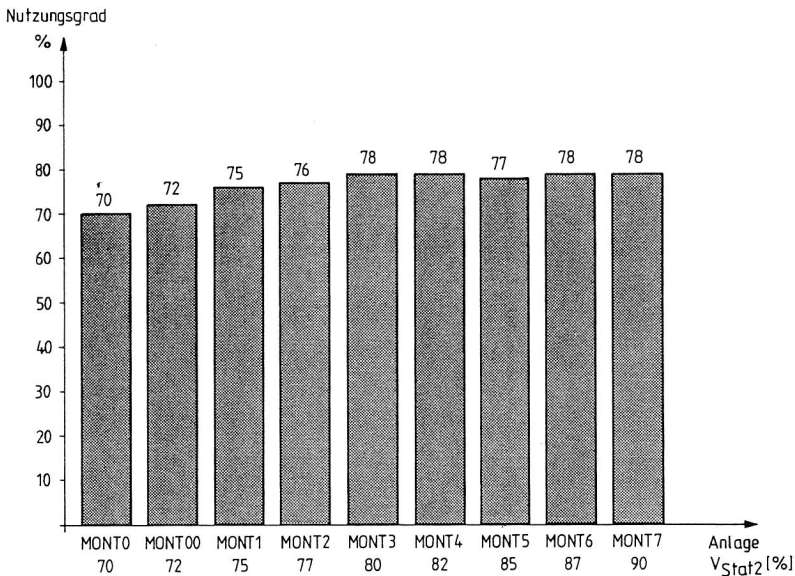


Abbildung 76: Verlauf des Nutzungsgrades in Abhängigkeit der Steigerung der Verfügbarkeit an Station 2

Eine weitere Steigerung der Verfügbarkeit an Station 2 ab 80% bringt keinen spürbaren Nutzungsgradgewinn für das Gesamtsystem.

Abschließend soll eine Darstellung und Analyse des Störzeitverhaltens am Ende der Montagelinie erfolgen. Aus diesem funktionalen Verlauf läßt sich die Personalbindung an der letzten Station ableiten. Bild 77 zeigt ein typisches Histogramm, wie es bei Montagesystemen immer wieder anzutreffen ist.

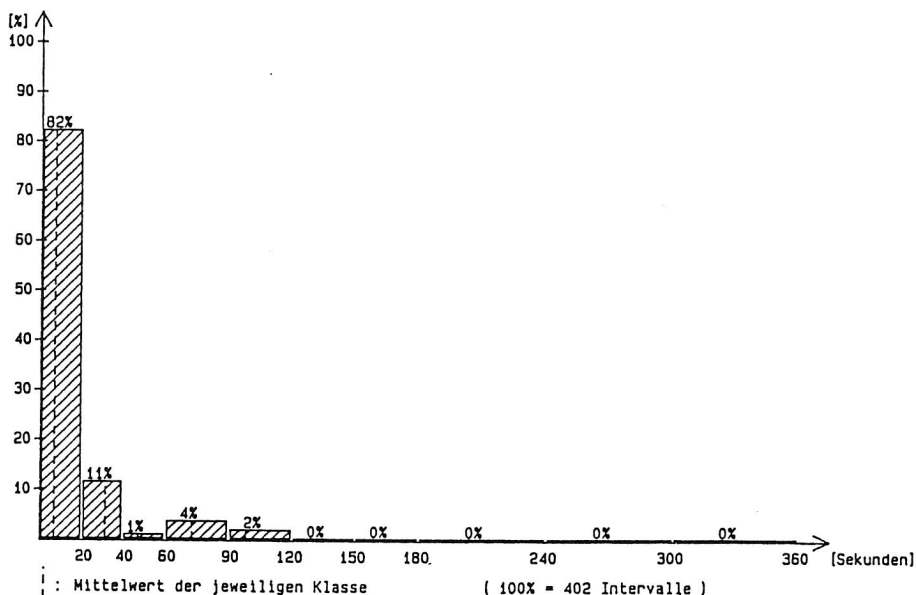


Abbildung 77: Störzeitverteilung der untersuchten Montageanlage

Das Störverhalten wird durch zahlreiche und kurz andauernde Unterbrechungen geprägt. Hieraus folgt, daß eine personalarme Schicht oder das bedienerlose Durchfahren einer Pause an diesem System nicht sinnvoll ist, da das Bedienungspersonal immer wieder in den Prozeß zur Störungsbeseitigung eingreifen muß.

5.4 Vergleich der Montagesimulation von SIMU und GPSS-FORTRAN-Modellen

Nach der Durchführung zahlreicher Simulationen mit GPSS-FORTRAN und dem Experimentieren mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Modelle, die mit SIMU erstellt wurden, lassen sich die Simulatoren miteinander vergleichen. Es soll hier jedoch nicht eine Wertung der Güte dieser Simulationssysteme vorgenommen werden, da je nach Anforderungsprofil des Benutzers die Vor- und Nachteile sehr unterschiedliche Gewichtungen bekommen können. Ziel dieser Gegenüberstellung soll sein, die besonderen Einsatzfelder der Simulatoren aufzuzeigen und auf die jeweiligen Möglichkeiten und Grenzen hinzuweisen.

5.4.1 Datenbereitstellung und Modellbildung

Der Grundsatz, daß Simulationsergebnisse nur so gut sein können, wie es die Richtigkeit und Vollständigkeit der eingegebenen Daten zuläßt, gilt für beide Systeme in gleicher Weise. Wie an den beschriebenen Beispielen deutlich wurde, ist die Art der Daten, die zur Simulation benötigt werden, in beiden Fällen annähernd identisch. Hier sind vor allem Verfügbarkeiten, Taktzeiten und das Störverhalten der Stationen sowie Kapazitätsdaten der Puffer zu nennen. Sowohl bei SIMU als auch bei Modellen in GPSS-FORTRAN werden diese Parameter in Eingabedateien den zuvor im Modell beschriebenen Stationen und Puffern zugeordnet.

Deutliche Unterschiede in der Handhabung ergeben sich bei der Modellierung der zu simulierenden Systeme. Bei SIMU wird der Nutzer menügeführt und durch die grafische Darstellung des Modellierungsfortschritts unterstützt, sehr schnell in die Lage versetzt, ein Modell zu generieren. Eine interne Analyse der Vernetzung des eingegebenen Modells führt zur Ausgabe der Abarbeitungsreihenfolge und somit zum Durchlauf der Werkstücke im Montagesystem. Damit ist bereits eine erste Möglichkeit der Überprüfung zwischen System- und Modellverhalten gegeben. Darüberhinaus werden die parallel eingegebenen Daten zur Abbildung des Stationsverhaltens sofort auf Plausibilität überprüft.

Wie in Kapitel 4 dargestellt, besteht die Modellerstellung in GPSS-FORTRAN im wesentlichen in einer Aneinanderreihung von Unterprogrammen, die das Paket standardmäßig anbietet. Außerdem lassen sich benutzerspezifische Routinen in FORTRAN zusätzlich programmieren und einbinden. Jedes Unterprogramm muß parametrisiert werden und Strategiealgorithmen sind zu entwickeln. Hierin liegt

besonders bei Systemen größerer Komplexität ein erheblicher Modellierungsaufwand. Der Vorteil liegt jedoch eindeutig in der vorhandenen Flexibilität dieses Simulators, der es erlaubt, jeden beliebigen Bausteintyp zu realisieren. Die relativ aufwendige Vorgehensweise bei der Modellerstellung birgt auch das Risiko von Fehlern in sich. Um so mehr wird bei GPSS-FORTRAN-Modellen eine sorgfältige Validierung notwendig.

5.4.2 Durchführung der Simulation und Ergebnisdarstellung

Ogleich es für GPSS-FORTRAN auch Implementierungen auf Personal Computern und kleineren Workstations gibt [63], empfiehlt sich aufgrund der zumeist großen Komplexität von Montagesystemen ein Einsatz dieses Simulationspaketes auf größeren Rechenanlagen. Selbst hier können - wie in Punkt 4.3 gezeigt - Engpässe in der Kapazität auftreten. Das zieht die bekannten Probleme (lange Wartezeiten, hohe Rechenzeitkosten) nach sich. Eine weitere Komforteinbuße liegt darin begründet, daß keine für die Belange der Fertigungstechnik zugeschnittene Bedieneroberfläche des allgemein einsetzbaren Simulators vorhanden ist. Das führt gegenüber dem speziell für den Einsatz auf Workstations konzipierten Simulator SIMU, der noch dazu durch die zuschaltbare Animation den Simulationslauf verdeutlicht, zu klaren Nachteilen. Selbst bei kleinen Modellen muß der GPSS-FORTRAN Nutzer bedingt durch die Belastung des Rechners mit weiteren Aufgaben, z.T. längere Wartezeiten in Kauf nehmen. Ähnliche Vorteile bieten sich bei der Benutzung von SIMU bei der Ergebnispräsentation. Durch die Einbeziehung grafischer Hilfsmittel können die Simulationsergebnisse sehr anschaulich und leicht interpretierbar angeboten werden. Jedoch muß erwähnt werden, daß aufgrund der Schematisierung der Ergebnismenüs keine Möglichkeit existiert, eine modifizierte Darstellung der Daten zu wählen. Das läßt sich, wenn auch mit zusätzlichem Aufwand, mit GPSS-FORTRAN realisieren.

5.4.3 Abschätzung von Aufwand und Nutzen

Der Vergleich von Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Simulation beider Simulationssysteme führt zu der Aussage, daß bei eingeschränkter Flexibilität der Anwenderkomfort von SIMU deutliche Vorteile gegenüber GPSS-FORTRAN aufweist. Daraus folgt, daß bei einfachen Modellen bzw. bei Fragestellungen, die keine Detailmodellierung erfordern, SIMU zu favorisieren ist. Mit einem relativ geringen Aufwand läßt sich ein Modell aufbauen, die Simulation

durchführen und die Ergebnisse auswerten und interpretieren(s. Bild 78).

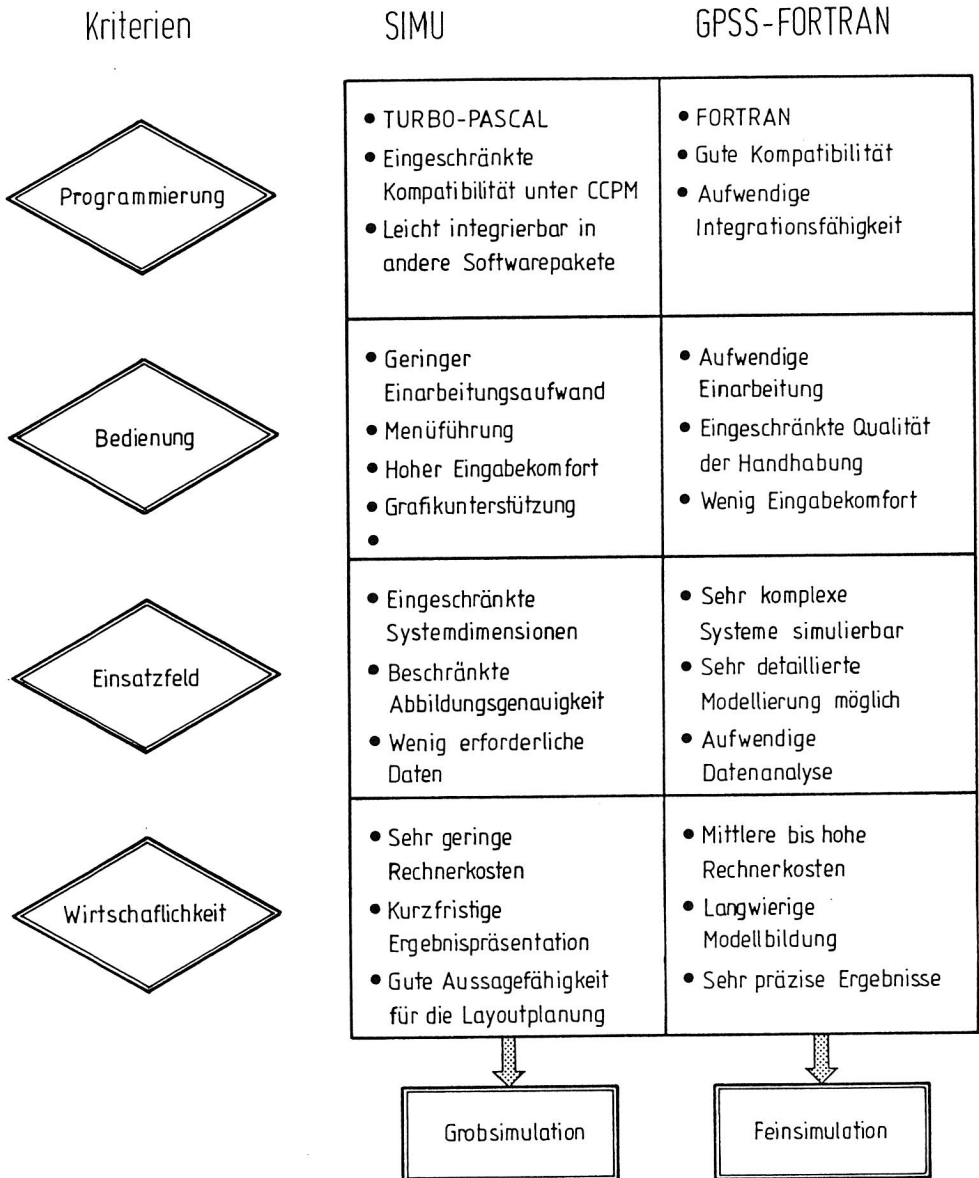


Abbildung 78: Vergleichende Gegenüberstellung der Simulatorarten

Hingegen wird bei großen und komplexen Montagesystemen der Einsatz von GPSS-FORTRAN sinnvoll. Die Mehrkosten relativieren sich durch die möglichen Einsparungen, die durch eine abgesicherte und schnellere Planung erzielt werden können. Erfahrungen zeigen, daß Simulationsstudien je nach Detaillierungsgrad und Umfang ca. 2-3% der Systemkosten betragen. Diese Werte gelten insbesondere für Investitionsobjekte im Rahmen von 5 bis 20 Millionen DM [49]. Dieser Kostenanteil fällt um so niedriger aus, je geringer der Modellierungsaufwand und der Rechenzeitbedarf sind.

In Bild 78 sind die Simulatoren SIMU und GPSS-FORTRAN anhand der Kriterien Programmierung, Bedienung, Einsatzfeld und Wirtschaftlichkeit gegenübergestellt.

Hierbei wird deutlich, daß insbesondere SIMU für die Grobsimulation von Montageanlagen geeignet ist, während GPSS-FORTRAN vornehmlich der Feinsimulation von komplexen Anlagen vorbehalten bleiben sollte, d.h. immer dort, wo SIMU an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit stößt.

Für die simulationsspezifischen Belange der Bestückungstechnik, die als Teilgebiet der Montage zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind die vorgestellten Simulationssysteme bezüglich ihrer Abbildungsgenauigkeit und des Zeitverhaltens nur bedingt einsetzbar. Aus diesem Grunde soll im folgenden Kapitel für die Flachbaugruppenbestückung eine eigene Betrachtung angestellt werden.

6 Nutzungsgradoptimierung an verketteten Bestückungsautomaten

Die Bestückung von Flachbaugruppen mit elektronischen Bauelementen ist ein Teilbereich der Montagetechnik. Der Arbeitsablauf ist durch das Fügen der Bauelemente in oder auf eine Leiterplatte und das anschließende Verbinden durch unterschiedliche Lötverfahren geprägt. Daneben wird die Bestücktechnik durch die Bereitstellung und das Handhaben der Platine sowie der verschiedenen Bauelementvarianten gekennzeichnet. Mit der Einführung der Surface Mounted Technology (SMT) haben sich neue Möglichkeiten der Rationalisierung, Miniaturisierung und Zuverlässigkeit bei der Bestückung eröffnet. Die damit verbundene Steigerung des Automatisierungsgrades bringt jedoch auch einige Probleme mit sich, die den Nutzungsgrad von Bestückungsanlagen beeinflussen können.

6.1 Problemfelder in der SMD-Bestückung

Im folgenden werden die Problembereiche, die bei der Bestückung der drahtlosen elektronischen Bauelemente auftreten, dargestellt. Das hier betrachtete Feld wird in Bild 79 gegenüber den vor- und nachgeschalteten Arbeitsgängen abgegrenzt.

Es wird deutlich, daß der eigentliche Bestückprozeß, d.h. der Vorgang des Aufnehmens, Positionierens und Absetzens des SMD (Surface Mounted Devices) im Vordergrund steht. Darüberhinaus werden alle weiteren Tätigkeiten, die innerhalb des Bestückungsautomaten durchgeführt werden, berücksichtigt. Hierzu sind das Setzen der Klebepunkte und die Bereitstellung der Bauelemente ebenso zu rechnen, wie der Transport und das Handling der Flachbaugruppe. Außerdem werden die technisch begründeten Stillstände des Automaten und organisatorische Einflüsse, wie z.B. Bedienungsfehler, Umrüstung und Bauelementeversorgung in die Betrachtung einbezogen.

6.1.1 Technische Randbedingungen in der SMT

Im Gegensatz zur konventionellen Elektronikfertigung, bei der bedrahtete Bauelemente in die Bohrungen der Leiterplatte gefügt werden, werden SMD auf die Oberfläche der ungebohrten Platine gesetzt. Um ein Herunterfallen beim Transport der Flachbaugruppe zu verhindern, werden die Bauelemente geklebt oder haf-

ten in einer zuvor aufgedruckten Reflowpaste. Bedingt durch die geringen Abmessungen der SMD (ab 1,6 x 0,8 mm) und die hohe Packungsdichte auf der Platine werden besondere Anforderungen an die Genauigkeit der Bestückungsautomaten gestellt. Insbesondere bei vielpoligen Bauelementen mit z.T. über hundert Anschlüssen erfolgt vor dem Absetzen eine Zentrierung, die je nach Automatentyp mechanisch oder optoelektronisch durchgeführt wird.

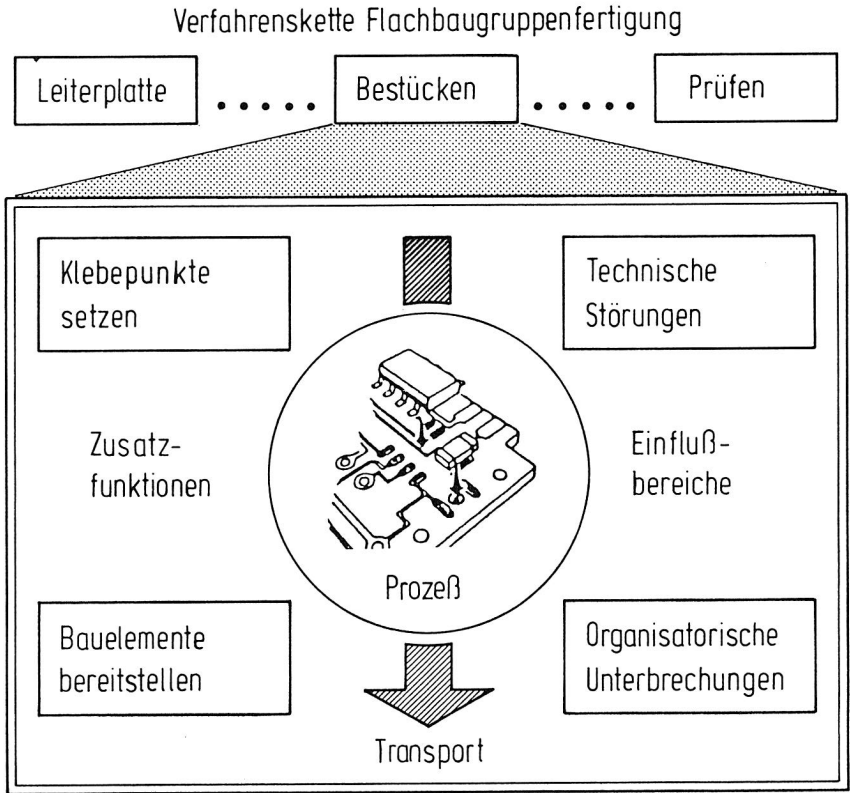


Abbildung 79: Abgrenzung des betrachteten Feldes

Die oberflächenmontierbaren Bauteile werden größtenteils in Gurten mit unterschiedlichen Breiten angeboten. Daneben sind aber auch Anlieferformen wie Schüttgut oder Linear- und Flächenmagazine üblich. Diese variierenden Bereitstellungsformen beeinflussen das Zeit- und Verfügbarkeitsverhalten der Automaten beträchtlich.

6.1.2 Aufbau und Arbeitsprinzipien von Bestückungsautomaten

Entsprechend den vielfältigen marktseitigen Anforderungen wurden eine Reihe unterschiedlicher Maschinentypen zur SMD-Bestückung entwickelt. Aufgrund der Vielzahl der Varianten ist eine Gliederung nach einem einheitlichen Schema nicht möglich. Die wesentlichen Einflußbereiche auf den Aufbau von Bestückungsautomaten in der SMT zeigt Bild 80.

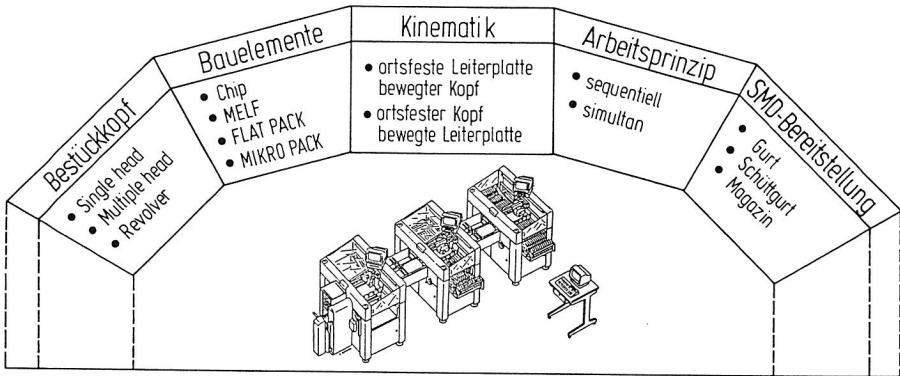


Abbildung 80: Einflüsse auf die Aufbauvarianten

Es wird deutlich, daß insbesondere die Kinematik und das Arbeitsprinzip den Aufbau der Maschinen charakterisieren. Diese Bereiche beeinflussen in erheblichem Maße auch die Bestückungsleistung. Der Nutzungsgrad wird einerseits durch die technische Verfügbarkeit der Maschine und andererseits durch organisatorische äußere Einflüsse geprägt. Hierzu ist auch die Einsatzart zu zählen. So sollten beispielsweise Automaten, die simultan mehrere Bauelemente gleichzeitig auf die Leiterplatte setzen, primär für die Massenproduktion von Konsumgütern eingesetzt werden. Für Kleinserien mit einem stark variierenden Bauelementebedarf müssen umrüstfreundliche Bestückungsmaschinen verwendet werden.

6.1.3 Störungsschwerpunkte bei der Bestückung

Wie bereits in Bild 11 dargestellt, liegen die Nutzungsgradeinbußen von SMD-Bestückungsautomaten sowohl im technischen als auch organisatorischen Bereich.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben Verfügbarkeiten von ca. 90% sowohl an sequentiell als auch simultan arbeitenden Maschinen. Hier zeigte sich, daß vor allem die Bauelementebereitstellung eine häufige Schwachstelle im Bestückprozeß ist. Die Aufnahmezuverlässigkeit R_A wird durch die Bauteilgeometrie und die Art des Zuführsystems beeinflusst. Sie läßt sich nach der folgenden Beziehung ermitteln:

$$R_A = 1 - \frac{n_W}{n_Z} \quad (14)$$

n_W Anzahl der Aufnahmewiederholungen des Bauteils

n_Z Anzahl der bestückten Bauelemente dieses Typs

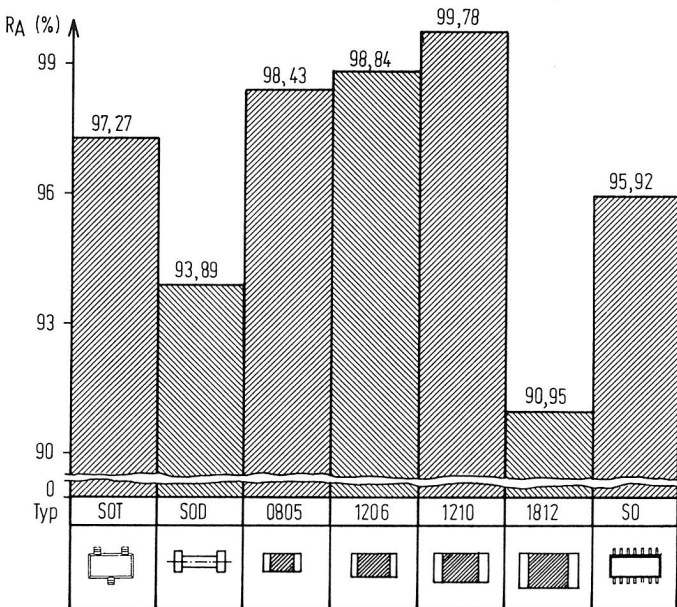


Abbildung 81: Aufnahmezuverlässigkeiten R_A von ausgewählten SMD

Die Aufnahmewiederholungen werden immer dann durchgeführt, wenn ein Vakuumsensor meldet, daß entweder kein Bauelement aufgenommen wurde oder aufgrund einer Fehlpositionierung Nebenluft angesaugt wird. Darüberhinaus be-

steht die Möglichkeit, zweipolige SMD im Bestückkopf bezüglich ihrer elektrischen Kennwerte zu messen und außerhalb der Toleranz liegende abzuwerfen. Bild 81 zeigt, daß die verschiedenen Bauformen große Differenzen ihrer Aufnahmezuverlässigkeit aufweisen.

Besonders die Bauteile der Bauformen 1812 und SO sowie die zylindrischen MELF-Bauelemente SOD haben relativ geringe Aufnahmezuverlässigkeiten. Es liegt der Schluß nahe, daß diese Werte auf deren besondere geometrische Eigenschaften zurückzuführen sind.

Neben der Bauform beeinflußt die Art der Zuführung das Verhalten der Bauelementaufnahme. Bei einem Vergleich am Beispiel der Bauform SOT 23 wurde für die Bereitstellung in Stangenmagazinen eine Zuverlässigkeit von weniger als 95% registriert, während das gleiche Bauelement aus dem Gurt in 98,5% aller Fälle korrekt aufgenommen werden konnte.

Durch die Aufnahmewiederholungen ist eine Nutzungsgradeinbuße von 2,4% zu verzeichnen. Es muß jedoch beachtet werden, daß die Fehlbestückungsrate erheblich reduziert wird und durch den automatischen Anstoß der Wiederholungen eine deutliche Entlastung des Bedienungspersonals erfolgt. Verlaufen auch die wiederholten Aufnahmen fehlerhaft, wird die Bestückungsmaschine nach dem dritten vergeblichen Versuch automatisch stillgesetzt und der Anlagenbediener alarmiert. Durchschnittlich dauern diese Unterbrechungen 75 Sekunden, wobei die Werte bedingt durch die Störungsart und die Mitarbeiterqualifikationen sehr stark streuen (s. Bild 82).

Es wird deutlich, daß etwa drei Viertel aller Unterbrechungen bereits nach einer Minute behoben wurden. Das beweist, daß die Mehrzahl der Störungen schnell erkannt werden und ohne großen Aufwand zu beseitigen sind. Eine relative Häufung ist um die 2-Minuten-Marke zu beobachten. Typisch für diese Zeitklasse ist, daß die Bedienungsperson durch die Nebentätigkeit abgelenkt wird und somit unnötig Zeit vor der eigentlichen Störungsbeseitigung verstreicht.

Neben der Bauelementebereitstellung fallen im technischen Bereich insbesondere Störungen am Bestückungskopf auf. Sehr oft werden verunreinigte Vakuumpipetten nur notdürftig und oberflächlich gewartet mit der Folge, daß sie nach kurzen Laufzeiten wieder zum Ausfall des Automaten führen.

Die Nutzungsgradeinbußen, die aus dem organisatorischen Umfeld des Bestückprozesses stammen, sind vor allem durch Verzögerungen im Bauelementenachschub

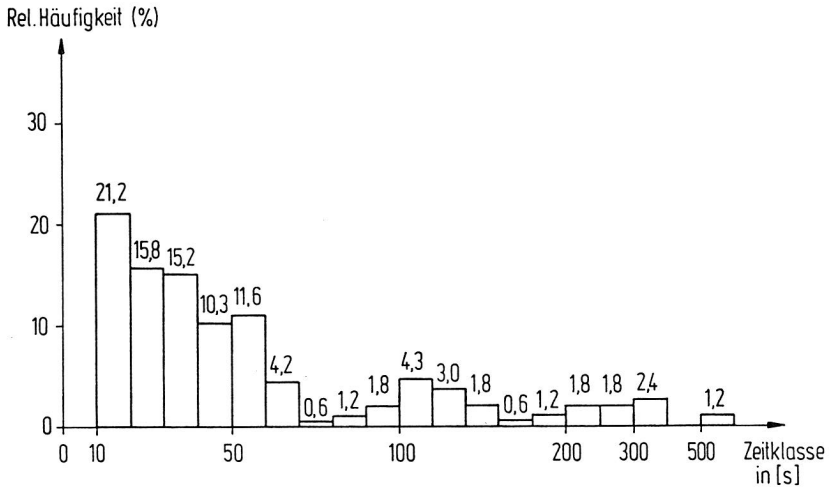


Abbildung 82: Unterbrechungsdauerverteilung nach dreimaligem erfolglosen Aufnahmeversuch

zu erklären. Hier sind unternehmensspezifisch sehr unterschiedliche logistische Probleme zu finden, die zum Stillstand infolge fehlender Bauelemente führen. Darüberhinaus gehen wertvolle Nutzungsgradanteile beim Umrüsten und Wiederanlauf der Bestückungsautomaten verloren. Durch fehlende Zuführmodule, die für einen neuen Auftrag mit einem veränderten Bauteilespektrum vorbereitet werden könnten, verlängert sich die Umrüstdauer erheblich. Die Folge ist, daß beim Programmieren der Abhol- und Bestückpositionen versucht wird, die verlorene Zeit aufzufangen. Dabei entstehen Ungenauigkeiten, die zu vermehrten Aufnahmewiederholungen der Bauelemente führen und im Hochlauf des Automaten korrigiert werden müssen.

6.1.4 Ansätze zur Nutzungsgradsteigerung

Durch die Untersuchungen an den Bestückungsautomaten wurden deren technische Schwachstellen und die Einflüsse aus dem organisatorischen Umfeld sichtbar. Eine Steigerung der Verfügbarkeit der Maschinen sollte im Bereitstellungsbereich der SMD ansetzen. Dort kann durch eine sorgfältige Einstellung der Orientierungsschikanen an den Förderern erreicht werden, daß die Bauelemente lagegerecht in ihrer Abholposition angeboten werden und damit die Aufnahmezuverlässigkeiten gesteigert werden. Die Bereitstellung aus Gurten kann durch eine Qualitätserhöhung des Gurtmaterials und hier besonders durch einen ruckfreien Abzug der Deck-

folien verbessert werden. Durch diese Maßnahmen lassen sich die zahlreichen Vakuumfehler reduzieren. Daneben muß zur Verkürzung der technisch bedingten Störungszeiten eine bessere Qualifikation der Anlagenbediener erfolgen, um Ausfallursachen sorgfältig und damit lang anhaltend beseitigen zu können.

Mit der zunehmenden Verkettung von SMD-Bestückungsautomaten zu kompletten Linien, die aus bis zu zehn Stationen bestehen können, kommen neue struktur- und fertigungssteuerungsbedingte Probleme auf, die sowohl in der Planung als auch im Betrieb gelöst werden müssen. Nicht nur Stillstandszeiten, die durch Umrüstung und Nachfüllaufgaben auftreten, verringern die Nutzung, sondern auch Warte- und Blockierzeiten. Diese ergeben sich immer dann, wenn die zeitlichen Arbeitsinhalte benachbarter Automaten voneinander abweichen oder das Störverhalten stark differiert und nicht durch Puffer ausgeglichen wird. Eine Taktzeitabstimmung verketteter Automaten lediglich auf der Basis der Anzahl zu bestückender Bauelemente vorzunehmen, führt nicht zu akzeptablen Ergebnissen, da Nebenzeiten zum Zentrieren und Adapterwechsel ebenso wenig berücksichtigt werden wie das individuelle Störungsverhalten der unterschiedlichen SMD-Bauformen und Förderer.

Darüberhinaus muß bei der Auslegung von verketteten Bestückungsanlagen das Umrüsten bei Auftragswechsel einbezogen werden. Aufgrund der produktspezifischen Anforderungen und der innerbetrieblichen Fertigungssteuerung, die sich an den Kundenbestellungen orientieren muß, läßt sich eine Optimierung der Rüstzeiten nur sehr aufwendig und rechenzeitintensiv durchführen. Für den Arbeitsvorbereiter wäre jedoch bereits eine Abschätzung der Durchlaufzeiten für seine Aufträge und der Vergleich unterschiedlicher Alternativen der Auftragszusammensetzungen von Vorteil. Ein Hilfsmittel, das ihn bei dieser Aufgabenstellung unterstützen kann, ist das Simulationssystem SASB (Simulation Automatischer SMD-Bestückungsanlagen)

6.2 Konzeption des Simulators

6.2.1 Anforderungen an die Simulation

Die Anforderungen, die an die Simulation von SMD-Bestückungslinien gestellt werden, ergeben sich aus den drei Einflußbereichen Anlage, Prozeß und Auftrag. Durch die Vielfalt der zu diesen Bereichen zu zählenden Merkmale und deren Kombinationen ergibt sich eine Komplexität der Fragestellungen an die Planung

und den wirtschaftlichen Betrieb dieser Systeme, die durch eine analytische Vorgehensweise nicht mehr zu beherrschen ist. In Bild 83 ist eine Auswahl der Einflüsse zusammengefaßt.

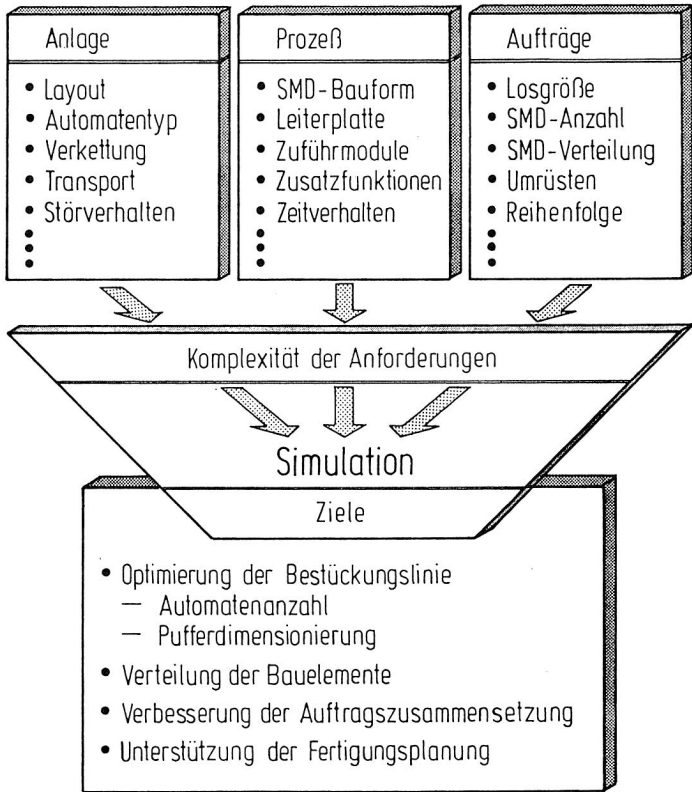


Abbildung 83: Anforderungen und Ziele bei der Simulation von SMD-Bestückungssystemen

Die Anlagen zur Bestückung von Flachbaugruppen in der SMT sind geprägt durch ihr Layout. Dabei stehen die eingesetzten Automaten und ihre Verkettung im Mittelpunkt der Betrachtungen. Für eine sichere Auslegung der Kapazitäten ist die Berücksichtigung des Störverhaltens aller Komponenten unumgänglich. Hier ist die Definition der Verfügbarkeit allein nicht ausreichend. Vielmehr ist es erforderlich, bei der Planung die Verteilungen von Störungsdauern und -abständen einzubeziehen, um Puffer dimensionieren und den Ausstoß der Linie vorab bestimmen zu können.

Der Bestückungsprozeß wird durch die große Anzahl unterschiedlicher SMD-Bauformen und deren individuelles Verhalten beim Abholen und Positionieren geprägt. Ebenso muß die Leiterplattengröße und -art bei der Prozeßbeschreibung bekannt sein, da Platinen mit großen Abmessungen längere Bestückzeiten erfordern. Wird im Nutzen gefertigt, müssen die entsprechenden Strategien bei der Reihenfolge der Bestückung abgebildet werden. Ebenso muß die Art der Zuführmodule bei der Planung berücksichtigt werden. Insbesondere spielt hier die Entscheidung, ob Ersatzzuführspuren eingebaut werden sollen, eine wichtige Rolle.

Der dritte große Einflußbereich resultiert aus der Art und dem Umfang der zu verarbeitenden Aufträge. Dabei ist neben der Anzahl unterschiedlicher SMD, die pro Auftrag zu bestücken ist, vor allem deren Verteilung auf die einzelnen Bestückungsautomaten von großer Wichtigkeit. Nur durch eine ausgewogene Arbeitsverteilung können Warte- und Blockierzeiten, die den Nutzungsgrad negativ beeinflussen, vermieden werden. Neben der Optimierung der Abarbeitung einzelner Aufträge ist die Reihenfolgebestimmung mehrerer Lose und damit eine Reduzierung der Rüstzeiten eine entscheidende Fragestellung beim Betrieb von Bestückungssystemen.

6.2.2 Struktur des Simulationssystems

Bedingt durch die vorgestellten Anforderungen und die zu erreichenden Ziele, wurde bei der Entwicklung des Simulators SASB ein modularer Aufbau der Software zugrunde gelegt. Dabei wird die Möglichkeit offengehalten, neue weitere sich durch die Veränderung der Struktur von Bestückungssystemen ergebende Randbedingungen nachträglich einzubeziehen. Die gegenwärtig vorhandenen Bestandteile der Software zeigt Bild 84. Durch die Parameterisierbarkeit der Daten, die das Bauelement- und Zuführverhalten, das Umrüsten und das Nachfüllen abbilden, lassen sich auch zukünftige SMD-Bauformen und modifizierte Bereitstellungsmodulare simulieren. Ein Bestandteil des Simulationssystems liegt in der Generierbarkeit von unterschiedlichen Störungs- und Laufzeitverteilungen der Bestückungsautomaten, um eine realitätsnahe Modellierung zu gewährleisten.

Die Struktur des Simulators gliedert sich im wesentlichen in zwei Schwerpunkte. Sowohl auftragsabhängige als auch auftragsunabhängige Daten werden im Programmteil LOSDATA eingegeben, verwaltet und bereitgestellt. Hier erfolgt auch die Modellierung der zu simulierenden Anlagenkonfiguration. Die Simulations-

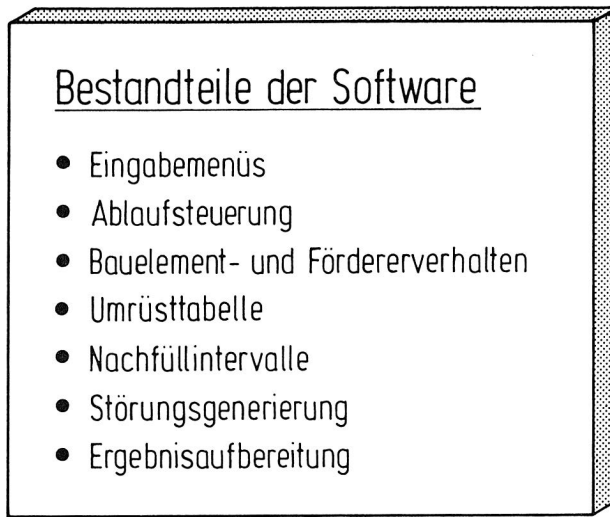


Abbildung 84: Module des Simulators

steuerung basiert auf dem Programmmodul SIMLOS. Bild 85 veranschaulicht das Zusammenwirken der beiden Bereiche.

Der Simulator läuft unter dem Betriebssystem MS-DOS und wurde in TURBO-PASCAL programmiert.

6.2.3 Modellierung und Dateneingabe

Der hier vorgestellte Simulator dient zur Abbildung des zeitlichen Verhaltens einer SMD-Bestückungslinie mit sequentiell arbeitenden Automaten. Der Bestückprozeß innerhalb einer Maschine verläuft unabhängig von der Gesamtzahl der Anlagenkomponenten immer nach dem gleichen Schema. Eine Platine gelangt in den Bestückungsautomaten und wird entsprechend des vorgegebenen Arbeitsplanes mit SMD bestückt. Dieser Bestückungsvorgang kann durch Störungen oder beabsichtigte Unterbrechungen verzögert werden. Nach erfolgter Plazierung der Bauelemente wird die Leiterplatte aus dem Automaten heraustransportiert. Dieser Ablauf ist fest in der Simulationssteuerung abgebildet und muß nicht für jede Anlagenkonfiguration erneut modelliert werden.

Zur Durchführung einer Simulationsstudie muß jedoch die Konfiguration der ge-

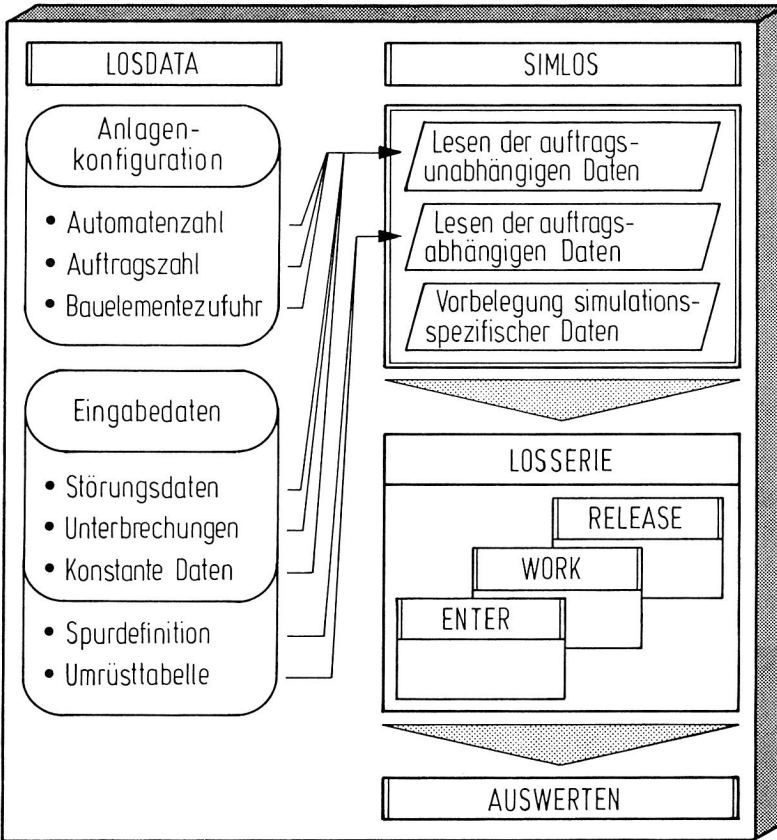


Abbildung 85: Struktur des Simulators

samten Bestückungslinie durch Parameterisierung der Automatenanzahl, der unterschiedlichen Aufträge und der Zuführmodulezahl pro Automat modelliert werden. Dabei wird deutlich, daß es sich hier um eine sehr einfache und schnelle Art der Modellbildung handelt. Der Nachteil einer geringen Flexibilität hat nur eine geringe Bedeutung, da der Aufbau dieser Bestückungsautomaten standardisiert ist und keine Modelländerungen erforderlich sind.

Neben der Definition der Anlagenkonfigurationen müssen vor der Simulation durchführung folgende Eingabedaten bekannt sein:

Störungsdaten

In der Datei für die Störungsdaten werden die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Wiederholungen bei der Bauteilaufnahme abgelegt. Hierbei muß nach der Bauteilform, Zuführart und der Kombination aus beiden differenziert werden. Darüberhinaus wird unterschieden, ob ein Vakuumfehler oder ungenaue elektrische Werte des SMD zur Wiederholung führen.

Unterbrechungen

Die Unterbrechungsdatei enthält die Verteilungen der Stillstandsdauern, die entweder durch vergebliche dreimalige Aufnahmeversuche oder sonstige Ursachen entstehen. Damit besteht die Möglichkeit, die aus Verfügbarkeitsuntersuchungen ermittelten Werte bei der Simulation zu berücksichtigen .

Konstante Daten

Für die Funktionen der Klebestation, Bestückungsautomaten und des Transportsystems werden während der Simulation konstante Werte, die jedoch menügeführt vor jedem Simulationslauf verändert werden können, zugrunde gelegt. Zu diesen Daten gehören beispielsweise die Dauer des Klebepunktsetzens, Adapterwechsel- und Zentrierzeiten sowie das Einziehen der Platinen in den Bestückungsautomaten.

Spurdefinitionen

Für jeden Automaten und Auftrag werden die SMD-Zuführmodule spezifiziert. Dazu gehört neben der Definition von Bauelementform und Fördererart die Anzahl am Anfang im Zuführmodul vorhandener Bauteile. Außerdem wird hier festgelegt, ob ein Adapter oder das Anfahren einer Zentrierstation notwendig ist. In der Spurdefinition wird auch angegeben, wieviele Bauelemente aus der betreffenden Spur für die im vorliegenden Auftrag zu fertigende Leiterplatte entnommen werden müssen.

Umrüsttabelle

Beim Auftragwechsel muß im Regelfall ein Umrüsten der Bauelementbereitstellung erfolgen. Dabei sind für jeden Förderertyp spezifische Umrüstzeiten anzusetzen. So erfordert beispielsweise das Wechseln eines Gurtes einen längeren Zeitraum als das einfache Austauschen eines Linearmagazins.

Im Programmteil LOSDATA lassen sich die vorgestellten Dateien und ihre Parameter menügeführt aufrufen und verändern. Bild 86 verdeutlicht die modulare Struktur dieser Eingabe.

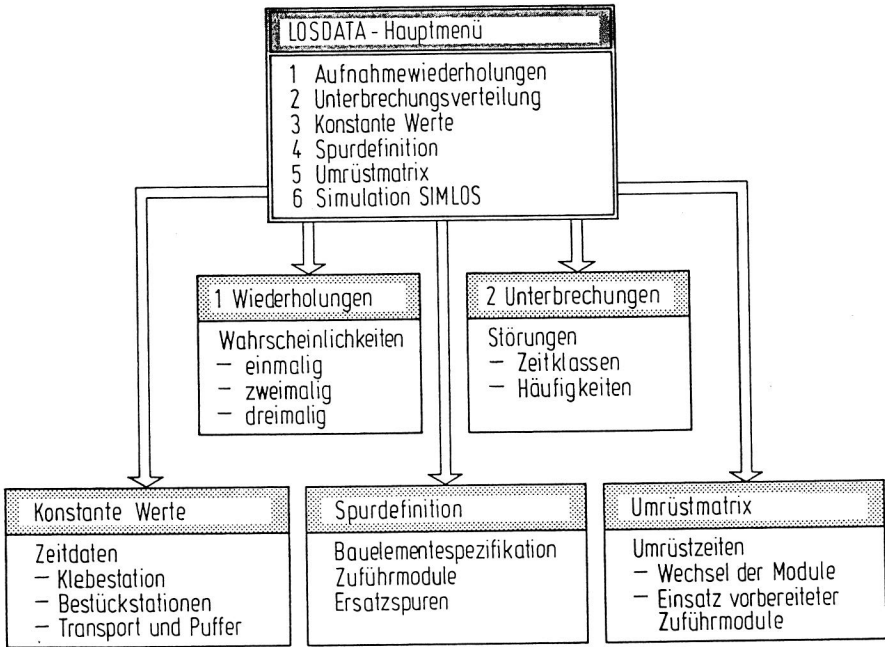


Abbildung 86: Menüführung im Programmteil LOSDATA

6.2.4 Ablauf der Simulation

Wie in Bild 85 dargestellt, erfolgt die Simulation der SMD-Bestückungslinie im Programmteil SIMLOS. Hier werden zunächst die auftragsabhängigen und -unabhängigen Eingabedaten aus LOSDATA übernommen und um simulationslaufspezifische Daten ergänzt. Hierzu gehört die Vorbelegung der im System vorhandenen Pufferdimensionen sowie die Parameterdefinition für die während der Simulation aufzurufenden Zufallszahlengeneratoren. Darüberhinaus müssen die zu produzierenden Aufträge und deren Abarbeitungsreihenfolge benannt werden.

Der eigentliche Simulationslauf wird dann in der Prozedur "LOSSERIE" durchgeführt. Die Abarbeitung der in mehreren Bestückungsautomaten parallel erfolgenden Operationen wird mit Hilfe einer Zeitsteuerung sequenzialisiert. Dabei wird durch zusätzlich implementierte Mechanismen sichergestellt, daß zeitgleiche Ereignisse berücksichtigt werden und nicht zu einer Blockierung in der Simulation führen können. Die Zeitsteuerung beinhaltet für jeden Automaten eine Statusmeldung und den Zeitpunkt seiner nächsten Aktivität. Aus den Statusmeldungen geht hervor, ob der betreffende Automat aufgrund von Platinenmangel im davor-

liegenden Puffer warten muß oder die Abgabe einer bestückten Flachbaugruppe blockiert wird. Innerhalb der Zeitsteuerung wird der nächste Ereigniszeitpunkt ermittelt und die zugehörige Aktivität ausgeführt.

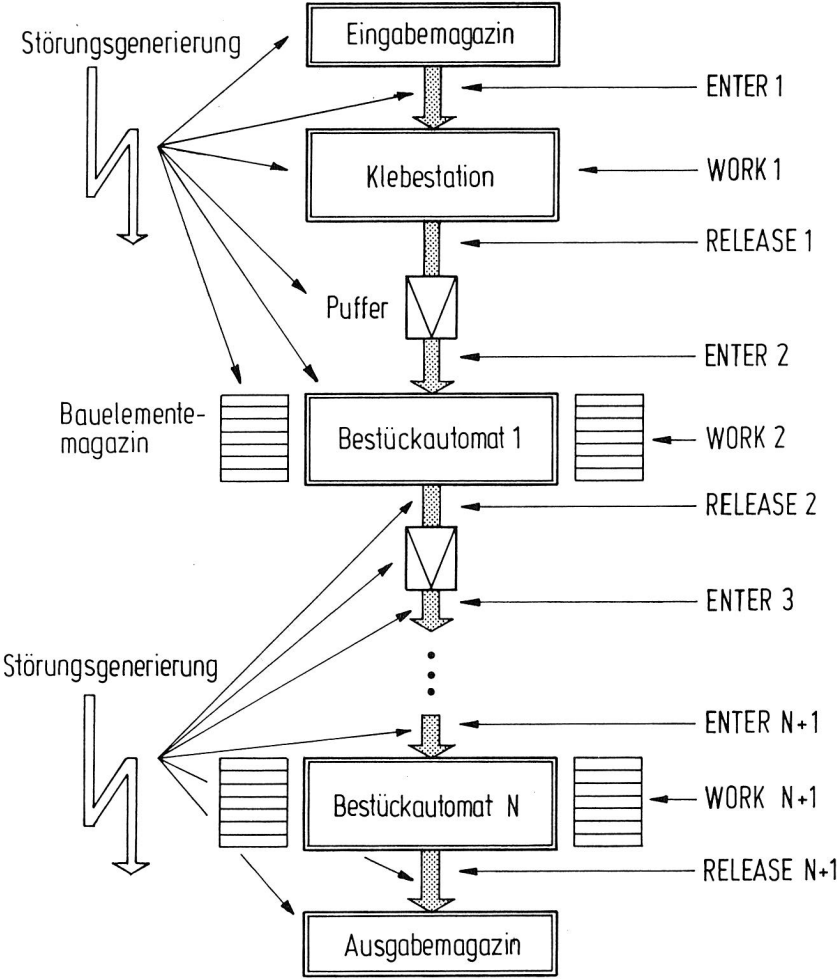


Abbildung 87: Ablauf der Simulationsprozedur LOSSERIE

Bild 87 veranschaulicht den Ablauf der Simulation einer Bestückungslinie mit einer Klebestation und n Bestückungsautomaten. Dabei sind die wichtigsten Arbeitsabschnitte der Prozedur LOSSERIE hervorgehoben.

ENTER

Im Unterprogramm ENTER wird der Platineneinzug in den Automaten simuliert. Es ist zuvor abzu prüfen, ob der Puffer lieferbereit oder leer ist. Kann keine Platine entnommen werden, muß der Bestückungsautomat in den Zustand "Warten" überführt werden.

WORK

Dieses Unterprogramm bildet sowohl den Arbeitsablauf der Klebestation als auch der Bestückungsmaschinen ab. Ein wesentlicher Bestandteil von "WORK" ist die Generierung von Störungen und Unterbrechungen sowie deren zeitlicher Dauer.

RELEASE

Durch Aufruf des Programms RELEASE wird die Ausgabe einer fertigen Platine abgebildet. Ähnlich dem Funktionsumfang von ENTER werden auch hier Warte- bzw. Blockierbedingungen abgefragt und die Pufferbelegungen aktualisiert.

6.3 Vorstellung des Simulators SASB an Beispielen

Nach der Beschreibung des konzeptionellen Aufbaus des Simulationssystems SASB soll dessen Einsatzbereich und Arbeitsweise an zwei Beispielen konkretisiert werden. Dabei handelt es sich zum einen um eine Anwendung bei der Planung und Investitionsentscheidung eines SMD-Bestückungssystems. Zum anderen wird der Simulator zur Beantwortung einer häufig vorkommenden Fragestellung des betrieblichen Einsatzes einer bestehenden Bestückungslinie verwendet.

6.3.1 Planung einer SMD-Bestückungslinie

Die Planung von Anlagen zur Bestückung elektronischer Bauelemente orientiert sich an dem zu produzierenden Auftragspektrum sowie an den prognostizierten Stückzahlen. Für die Verarbeitung von SMD stehen am Markt eine Reihe von unterschiedlichen Bestückungssystemen zur Verfügung, die wiederum verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten bieten. Am Beispiel einer aus mehreren Sta-

Hingegen wird bei großen und komplexen Montagesystemen der Einsatz von GPSS-FORTRAN sinnvoll. Die Mehrkosten relativieren sich durch die möglichen Einsparungen, die durch eine abgesicherte und schnellere Planung erzielt werden können. Erfahrungen zeigen, daß Simulationsstudien je nach Detaillierungsgrad und Umfang ca. 2-3% der Systemkosten betragen. Diese Werte gelten insbesondere für Investitionsobjekte im Rahmen von 5 bis 20 Millionen DM [49]. Dieser Kostenanteil fällt um so niedriger aus, je geringer der Modellierungsaufwand und der Rechenzeitbedarf sind.

In Bild 78 sind die Simulatoren SIMU und GPSS-FORTRAN anhand der Kriterien Programmierung, Bedienung, Einsatzfeld und Wirtschaftlichkeit gegenübergestellt.

Hierbei wird deutlich, daß insbesondere SIMU für die Grobsimulation von Montageanlagen geeignet ist, während GPSS-FORTRAN vornehmlich der Feinsimulation von komplexen Anlagen vorbehalten bleiben sollte, d.h. immer dort, wo SIMU an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit stößt.

Für die simulationsspezifischen Belange der Bestückungstechnik, die als Teilgebiet der Montage zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind die vorgestellten Simulationssysteme bezüglich ihrer Abbildungsgenauigkeit und des Zeitverhaltens nur bedingt einsetzbar. Aus diesem Grunde soll im folgenden Kapitel für die Flachbaugruppenbestückung eine eigene Betrachtung angestellt werden.

6 Nutzungsgradoptimierung an verketteten Bestückungsautomaten

Die Bestückung von Flachbaugruppen mit elektronischen Bauelementen ist ein Teilbereich der Montagetechnik. Der Arbeitsablauf ist durch das Fügen der Bauelemente in oder auf eine Leiterplatte und das anschließende Verbinden durch unterschiedliche Lötverfahren geprägt. Daneben wird die Bestücktechnik durch die Bereitstellung und das Handhaben der Platine sowie der verschiedenen Bauelementvarianten gekennzeichnet. Mit der Einführung der Surface Mounted Technology (SMT) haben sich neue Möglichkeiten der Rationalisierung, Miniaturisierung und Zuverlässigkeit bei der Bestückung eröffnet. Die damit verbundene Steigerung des Automatisierungsgrades bringt jedoch auch einige Probleme mit sich, die den Nutzungsgrad von Bestückungsanlagen beeinflussen können.

6.1 Problemfelder in der SMD-Bestückung

Im folgenden werden die Problembereiche, die bei der Bestückung der drahtlosen elektronischen Bauelemente auftreten, dargestellt. Das hier betrachtete Feld wird in Bild 79 gegenüber den vor- und nachgeschalteten Arbeitsgängen abgegrenzt.

Es wird deutlich, daß der eigentliche Bestückprozeß, d.h. der Vorgang des Aufnehmens, Positionierens und Absetzens des SMD (Surface Mounted Devices) im Vordergrund steht. Darüberhinaus werden alle weiteren Tätigkeiten, die innerhalb des Bestückungsautomaten durchgeführt werden, berücksichtigt. Hierzu sind das Setzen der Klebepunkte und die Bereitstellung der Bauelemente ebenso zu rechnen, wie der Transport und das Handling der Flachbaugruppe. Außerdem werden die technisch begründeten Stillstände des Automaten und organisatorische Einflüsse, wie z.B. Bedienungsfehler, Umrüstung und Bauelementeversorgung in die Betrachtung einbezogen.

6.1.1 Technische Randbedingungen in der SMT

Im Gegensatz zur konventionellen Elektronikfertigung, bei der bedrahtete Bauelemente in die Bohrungen der Leiterplatte gefügt werden, werden SMD auf die Oberfläche der ungebohrten Platine gesetzt. Um ein Herunterfallen beim Transport der Flachbaugruppe zu verhindern, werden die Bauelemente geklebt oder haf-

ten in einer zuvor aufgedruckten Reflowpaste. Bedingt durch die geringen Abmessungen der SMD (ab 1,6 x 0,8 mm) und die hohe Packungsdichte auf der Platine werden besondere Anforderungen an die Genauigkeit der Bestückungsautomaten gestellt. Insbesondere bei vielpoligen Bauelementen mit z.T. über hundert Anschlüssen erfolgt vor dem Absetzen eine Zentrierung, die je nach Automatentyp mechanisch oder optoelektronisch durchgeführt wird.

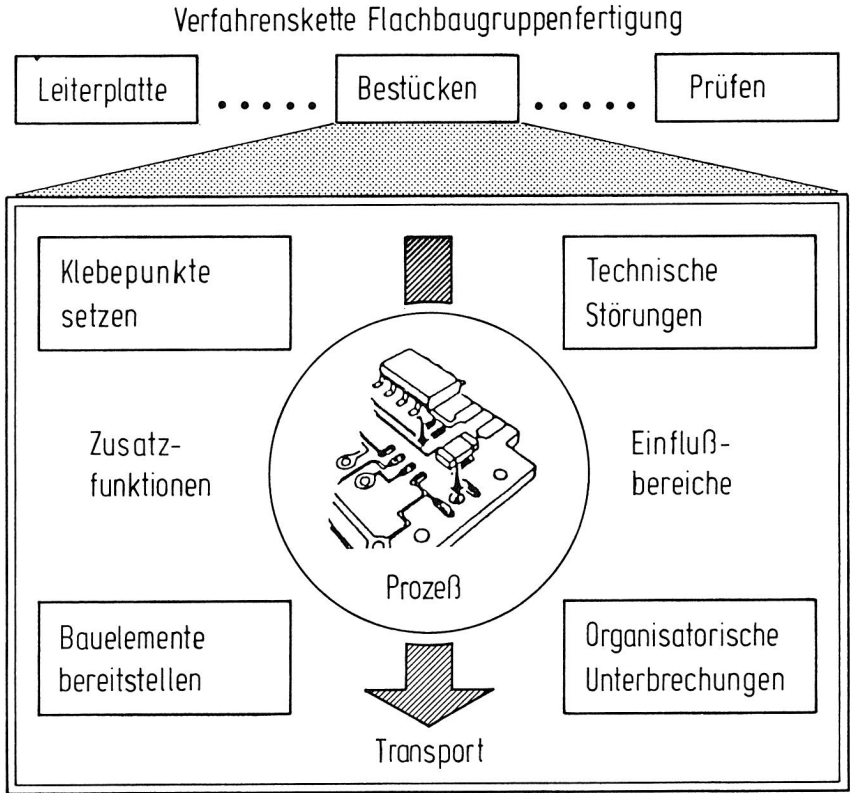


Abbildung 79: Abgrenzung des betrachteten Feldes

Die oberflächenmontierbaren Bauteile werden größtenteils in Gurten mit unterschiedlichen Breiten angeboten. Daneben sind aber auch Anlieferformen wie Schüttgut oder Linear- und Flächenmagazine üblich. Diese variierenden Bereitstellungsformen beeinflussen das Zeit- und Verfügbarkeitsverhalten der Automaten beträchtlich.

6.1.2 Aufbau und Arbeitsprinzipien von Bestückungsautomaten

Entsprechend den vielfältigen marktseitigen Anforderungen wurden eine Reihe unterschiedlicher Maschinentypen zur SMD-Bestückung entwickelt. Aufgrund der Vielzahl der Varianten ist eine Gliederung nach einem einheitlichen Schema nicht möglich. Die wesentlichen Einflußbereiche auf den Aufbau von Bestückungsautomaten in der SMT zeigt Bild 80.

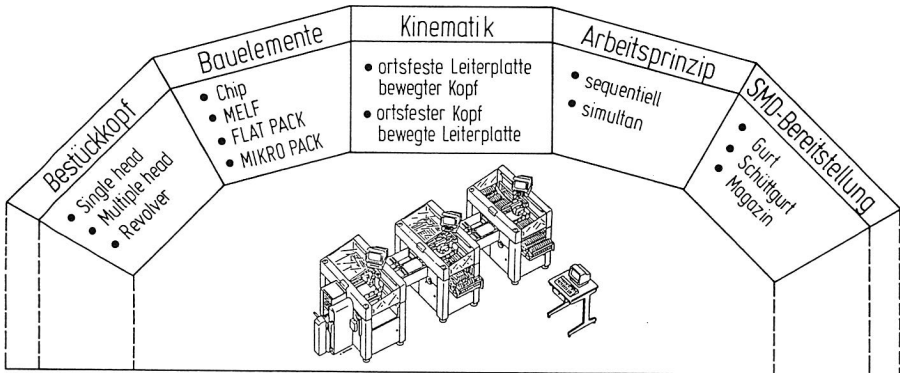


Abbildung 80: Einflüsse auf die Aufbauvarianten

Es wird deutlich, daß insbesondere die Kinematik und das Arbeitsprinzip den Aufbau der Maschinen charakterisieren. Diese Bereiche beeinflussen in erheblichem Maße auch die Bestückungsleistung. Der Nutzungsgrad wird einerseits durch die technische Verfügbarkeit der Maschine und andererseits durch organisatorische äußere Einflüsse geprägt. Hierzu ist auch die Einsatzart zu zählen. So sollten beispielsweise Automaten, die simultan mehrere Bauelemente gleichzeitig auf die Leiterplatte setzen, primär für die Massenproduktion von Konsumgütern eingesetzt werden. Für Kleinserien mit einem stark variierenden Bauelementebedarf müssen umrüstfreundliche Bestückungsmaschinen verwendet werden.

6.1.3 Störungsschwerpunkte bei der Bestückung

Wie bereits in Bild 11 dargestellt, liegen die Nutzungsgradeinbußen von SMD-Bestückungsautomaten sowohl im technischen als auch organisatorischen Bereich.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben Verfügbarkeiten von ca. 90% sowohl an sequentiell als auch simultan arbeitenden Maschinen. Hier zeigte sich, daß vor allem die Bauelementebereitstellung eine häufige Schwachstelle im Bestückprozeß ist. Die Aufnahmezuverlässigkeit R_A wird durch die Bauteilgeometrie und die Art des Zuführsystems beeinflusst. Sie läßt sich nach der folgenden Beziehung ermitteln:

$$R_A = 1 - \frac{n_W}{n_Z} \quad (14)$$

n_W Anzahl der Aufnahmewiederholungen des Bauteils

n_Z Anzahl der bestückten Bauelemente dieses Typs

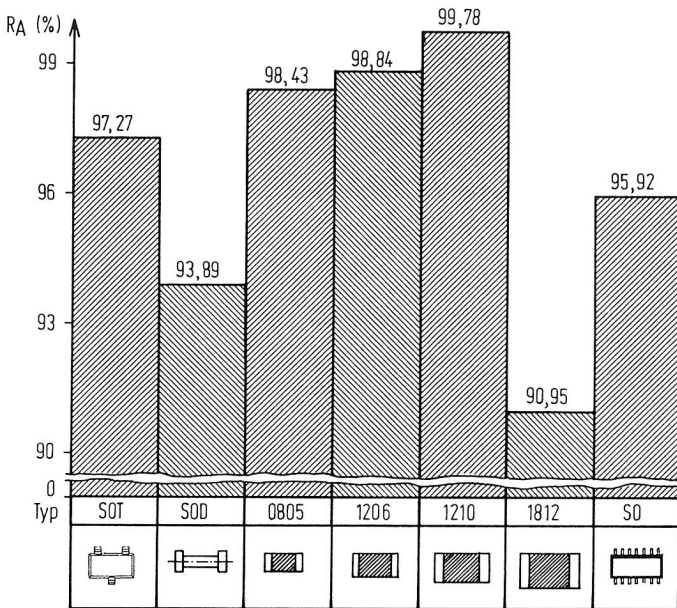


Abbildung 81: Aufnahmezuverlässigkeiten R_A von ausgewählten SMD

Die Aufnahmewiederholungen werden immer dann durchgeführt, wenn ein Vakuumsensor meldet, daß entweder kein Bauelement aufgenommen wurde oder aufgrund einer Fehlpositionierung Nebenluft angesaugt wird. Darüberhinaus be-

steht die Möglichkeit, zweipolige SMD im Bestückkopf bezüglich ihrer elektrischen Kennwerte zu messen und außerhalb der Toleranz liegende abzuwerfen. Bild 81 zeigt, daß die verschiedenen Bauformen große Differenzen ihrer Aufnahmezuverlässigkeit aufweisen.

Besonders die Bauteile der Bauformen 1812 und SO sowie die zylindrischen MELF-Bauelemente SOD haben relativ geringe Aufnahmezuverlässigkeiten. Es liegt der Schluß nahe, daß diese Werte auf deren besondere geometrische Eigenschaften zurückzuführen sind.

Neben der Bauform beeinflußt die Art der Zuführung das Verhalten der Bauelementaufnahme. Bei einem Vergleich am Beispiel der Bauform SOT 23 wurde für die Bereitstellung in Stangenmagazinen eine Zuverlässigkeit von weniger als 95% registriert, während das gleiche Bauelement aus dem Gurt in 98,5% aller Fälle korrekt aufgenommen werden konnte.

Durch die Aufnahmewiederholungen ist eine Nutzungsgradeinbuße von 2,4% zu verzeichnen. Es muß jedoch beachtet werden, daß die Fehlbestückungsrate erheblich reduziert wird und durch den automatischen Anstoß der Wiederholungen eine deutliche Entlastung des Bedienungspersonals erfolgt. Verlaufen auch die wiederholten Aufnahmen fehlerhaft, wird die Bestückungsmaschine nach dem dritten vergeblichen Versuch automatisch stillgesetzt und der Anlagenbediener alarmiert. Durchschnittlich dauern diese Unterbrechungen 75 Sekunden, wobei die Werte bedingt durch die Störungsart und die Mitarbeiterqualifikationen sehr stark streuen (s. Bild 82).

Es wird deutlich, daß etwa drei Viertel aller Unterbrechungen bereits nach einer Minute behoben wurden. Das beweist, daß die Mehrzahl der Störungen schnell erkannt werden und ohne großen Aufwand zu beseitigen sind. Eine relative Häufung ist um die 2-Minuten-Marke zu beobachten. Typisch für diese Zeitklasse ist, daß die Bedienungsperson durch die Nebentätigkeit abgelenkt wird und somit unnötig Zeit vor der eigentlichen Störungsbeseitigung verstreicht.

Neben der Bauelementebereitstellung fallen im technischen Bereich insbesondere Störungen am Bestückungskopf auf. Sehr oft werden verunreinigte Vakuumpipetten nur notdürftig und oberflächlich gewartet mit der Folge, daß sie nach kurzen Laufzeiten wieder zum Ausfall des Automaten führen.

Die Nutzungsgradeinbußen, die aus dem organisatorischen Umfeld des Bestückprozesses stammen, sind vor allem durch Verzögerungen im Bauelementenachschub

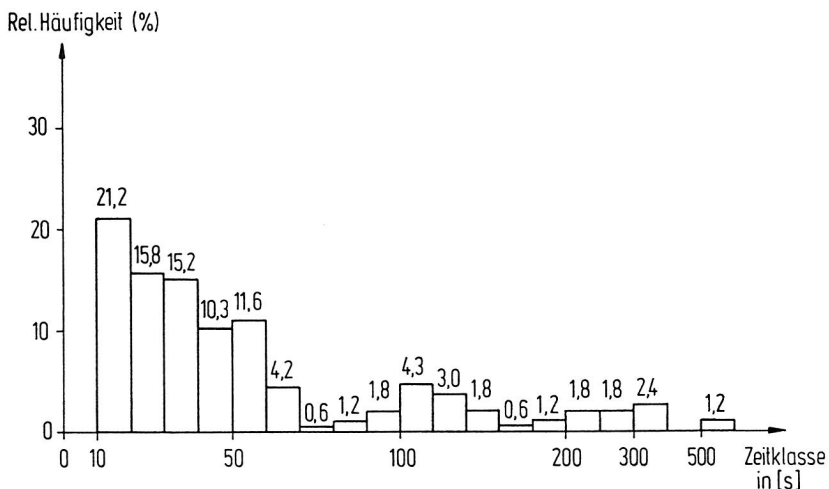


Abbildung 82: Unterbrechungsdauerverteilung nach dreimaligem erfolglosen Aufnahmeversuch

zu erklären. Hier sind unternehmensspezifisch sehr unterschiedliche logistische Probleme zu finden, die zum Stillstand infolge fehlender Bauelemente führen. Darüberhinaus gehen wertvolle Nutzungsgradanteile beim Umrüsten und Wiederanlauf der Bestückungsautomaten verloren. Durch fehlende Zuführmodule, die für einen neuen Auftrag mit einem veränderten Bauteilespektrum vorbereitet werden könnten, verlängert sich die Umrüstdauer erheblich. Die Folge ist, daß beim Programmieren der Abhol- und Bestückpositionen versucht wird, die verlorene Zeit aufzufangen. Dabei entstehen Ungenauigkeiten, die zu vermehrten Aufnahmewiederholungen der Bauelemente führen und im Hochlauf des Automaten korrigiert werden müssen.

6.1.4 Ansätze zur Nutzungsgradsteigerung

Durch die Untersuchungen an den Bestückungsautomaten wurden deren technische Schwachstellen und die Einflüsse aus dem organisatorischen Umfeld sichtbar. Eine Steigerung der Verfügbarkeit der Maschinen sollte im Bereitstellungsbereich der SMD ansetzen. Dort kann durch eine sorgfältige Einstellung der Orientierungsschikanen an den Förderern erreicht werden, daß die Bauelemente lagegerecht in ihrer Abholposition angeboten werden und damit die Aufnahmezuverlässigkeiten gesteigert werden. Die Bereitstellung aus Gurten kann durch eine Qualitätserhöhung des Gurtmaterials und hier besonders durch einen ruckfreien Abzug der Deck-

folien verbessert werden. Durch diese Maßnahmen lassen sich die zahlreichen Vakuumfehler reduzieren. Daneben muß zur Verkürzung der technisch bedingten Störungszeiten eine bessere Qualifikation der Anlagenbediener erfolgen, um Ausfallursachen sorgfältig und damit lang anhaltend beseitigen zu können.

Mit der zunehmenden Verkettung von SMD-Bestückungsautomaten zu kompletten Linien, die aus bis zu zehn Stationen bestehen können, kommen neue struktur- und fertigungssteuerungsbedingte Probleme auf, die sowohl in der Planung als auch im Betrieb gelöst werden müssen. Nicht nur Stillstandszeiten, die durch Umrüstung und Nachfüllaufgaben auftreten, verringern die Nutzung, sondern auch Warte- und Blockierzeiten. Diese ergeben sich immer dann, wenn die zeitlichen Arbeitsinhalte benachbarter Automaten voneinander abweichen oder das Störverhalten stark differiert und nicht durch Puffer ausgeglichen wird. Eine Taktzeitabstimmung verketteter Automaten lediglich auf der Basis der Anzahl zu bestückender Bauelemente vorzunehmen, führt nicht zu akzeptablen Ergebnissen, da Nebenzeiten zum Zentrieren und Adapterwechsel ebenso wenig berücksichtigt werden wie das individuelle Störungsverhalten der unterschiedlichen SMD-Bauformen und Förderer.

Darüberhinaus muß bei der Auslegung von verketteten Bestückungsanlagen das Umrüsten bei Auftragswechsel einbezogen werden. Aufgrund der produktspezifischen Anforderungen und der innerbetrieblichen Fertigungssteuerung, die sich an den Kundenbestellungen orientieren muß, läßt sich eine Optimierung der Rüstzeiten nur sehr aufwendig und rechenzeitintensiv durchführen. Für den Arbeitsvorbereiter wäre jedoch bereits eine Abschätzung der Durchlaufzeiten für seine Aufträge und der Vergleich unterschiedlicher Alternativen der Auftragszusammensetzungen von Vorteil. Ein Hilfsmittel, das ihn bei dieser Aufgabenstellung unterstützen kann, ist das Simulationssystem SASB (**S**imulation **A**utomatischer **S**MD-**B**estückungsanlagen)

6.2 Konzeption des Simulators

6.2.1 Anforderungen an die Simulation

Die Anforderungen, die an die Simulation von SMD-Bestückungslinien gestellt werden, ergeben sich aus den drei Einflußbereichen Anlage, Prozeß und Auftrag. Durch die Vielfalt der zu diesen Bereichen zu zählenden Merkmale und deren Kombinationen ergibt sich eine Komplexität der Fragestellungen an die Planung

und den wirtschaftlichen Betrieb dieser Systeme, die durch eine analytische Vorgehensweise nicht mehr zu beherrschen ist. In Bild 83 ist eine Auswahl der Einflüsse zusammengefaßt.

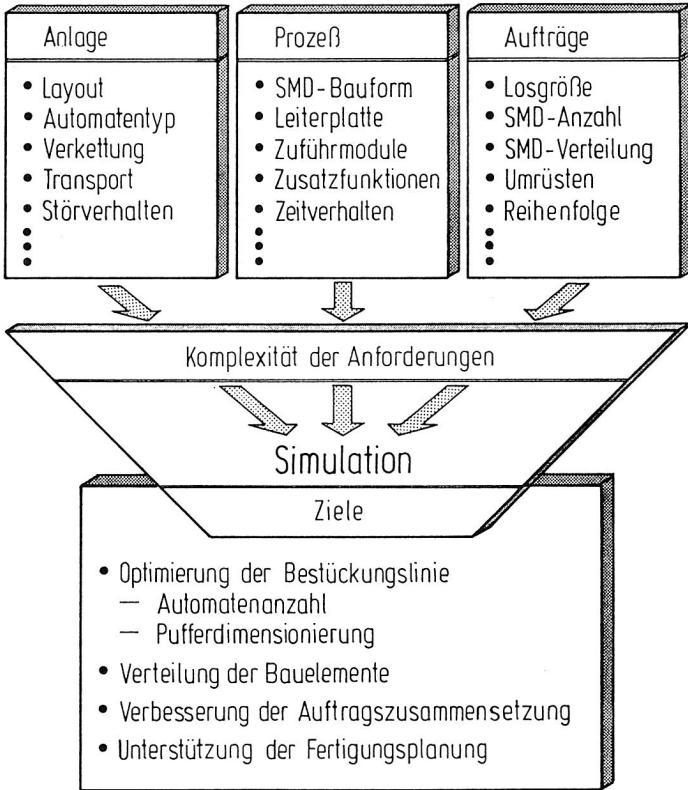


Abbildung 83: Anforderungen und Ziele bei der Simulation von SMD-Bestückungssystemen

Die Anlagen zur Bestückung von Flachbaugruppen in der SMT sind geprägt durch ihr Layout. Dabei stehen die eingesetzten Automaten und ihre Verkettung im Mittelpunkt der Betrachtungen. Für eine sichere Auslegung der Kapazitäten ist die Berücksichtigung des Störverhaltens aller Komponenten unumgänglich. Hier ist die Definition der Verfügbarkeit allein nicht ausreichend. Vielmehr ist es erforderlich, bei der Planung die Verteilungen von Störungsdauern und -abständen einzubeziehen, um Puffer dimensionieren und den Ausstoß der Linie vorab bestimmen zu können.

Der Bestückungsprozeß wird durch die große Anzahl unterschiedlicher SMD-Bauformen und deren individuelles Verhalten beim Abholen und Positionieren geprägt. Ebenso muß die Leiterplattengröße und -art bei der Prozeßbeschreibung bekannt sein, da Platinen mit großen Abmessungen längere Bestückzeiten erfordern. Wird im Nutzen gefertigt, müssen die entsprechenden Strategien bei der Reihenfolge der Bestückung abgebildet werden. Ebenso muß die Art der Zuführmodule bei der Planung berücksichtigt werden. Insbesondere spielt hier die Entscheidung, ob Ersatzzuführspuren eingebaut werden sollen, eine wichtige Rolle.

Der dritte große Einflußbereich resultiert aus der Art und dem Umfang der zu verarbeitenden Aufträge. Dabei ist neben der Anzahl unterschiedlicher SMD, die pro Auftrag zu bestücken ist, vor allem deren Verteilung auf die einzelnen Bestückungsautomaten von großer Wichtigkeit. Nur durch eine ausgewogene Arbeitsverteilung können Warte- und Blockierzeiten, die den Nutzungsgrad negativ beeinflussen, vermieden werden. Neben der Optimierung der Abarbeitung einzelner Aufträge ist die Reihenfolgebestimmung mehrerer Lose und damit eine Reduzierung der Rüstzeiten eine entscheidende Fragestellung beim Betrieb von Bestückungssystemen.

6.2.2 Struktur des Simulationssystems

Bedingt durch die vorgestellten Anforderungen und die zu erreichenden Ziele, wurde bei der Entwicklung des Simulators SASB ein modularer Aufbau der Software zugrunde gelegt. Dabei wird die Möglichkeit offengehalten, neue weitere sich durch die Veränderung der Struktur von Bestückungssystemen ergebende Randbedingungen nachträglich einzubeziehen. Die gegenwärtig vorhandenen Bestandteile der Software zeigt Bild 84. Durch die Parameterisierbarkeit der Daten, die das Bauelement- und Zuführverhalten, das Umrüsten und das Nachfüllen abbilden, lassen sich auch zukünftige SMD-Bauformen und modifizierte Bereitstellungsmodulare simulieren. Ein Bestandteil des Simulationssystems liegt in der Generierbarkeit von unterschiedlichen Störungs- und Laufzeitverteilungen der Bestückungsautomaten, um eine realitätsnahe Modellierung zu gewährleisten.

Die Struktur des Simulators gliedert sich im wesentlichen in zwei Schwerpunkte. Sowohl auftragsabhängige als auch auftragsunabhängige Daten werden im Programmteil LOSDATA eingegeben, verwaltet und bereitgestellt. Hier erfolgt auch die Modellierung der zu simulierenden Anlagenkonfiguration. Die Simulations-

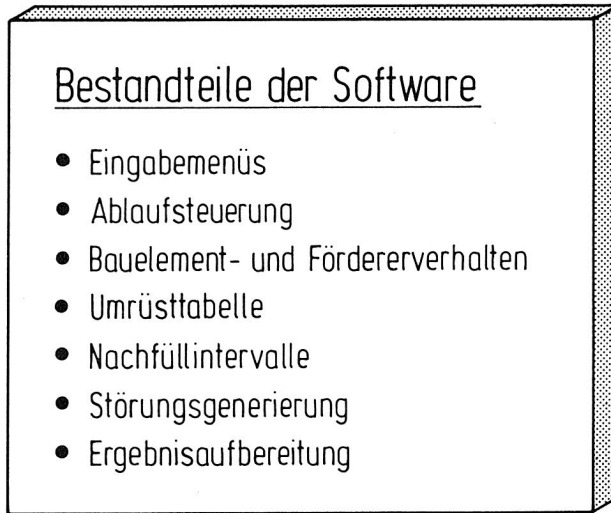


Abbildung 84: Module des Simulators

steuerung basiert auf dem Programmmodul SIMLOS. Bild 85 veranschaulicht das Zusammenwirken der beiden Bereiche.

Der Simulator läuft unter dem Betriebssystem MS-DOS und wurde in TURBO-PASCAL programmiert.

6.2.3 Modellierung und Dateneingabe

Der hier vorgestellte Simulator dient zur Abbildung des zeitlichen Verhaltens einer SMD-Bestückungslinie mit sequentiell arbeitenden Automaten. Der Bestückprozeß innerhalb einer Maschine verläuft unabhängig von der Gesamtzahl der Anlagenkomponenten immer nach dem gleichen Schema. Eine Platine gelangt in den Bestückungsautomaten und wird entsprechend des vorgegebenen Arbeitsplanes mit SMD bestückt. Dieser Bestückungsvorgang kann durch Störungen oder beabsichtigte Unterbrechungen verzögert werden. Nach erfolgter Plazierung der Bauelemente wird die Leiterplatte aus dem Automaten heraustransportiert. Dieser Ablauf ist fest in der Simulationssteuerung abgebildet und muß nicht für jede Anlagenkonfiguration erneut modelliert werden.

Zur Durchführung einer Simulationsstudie muß jedoch die Konfiguration der ge-

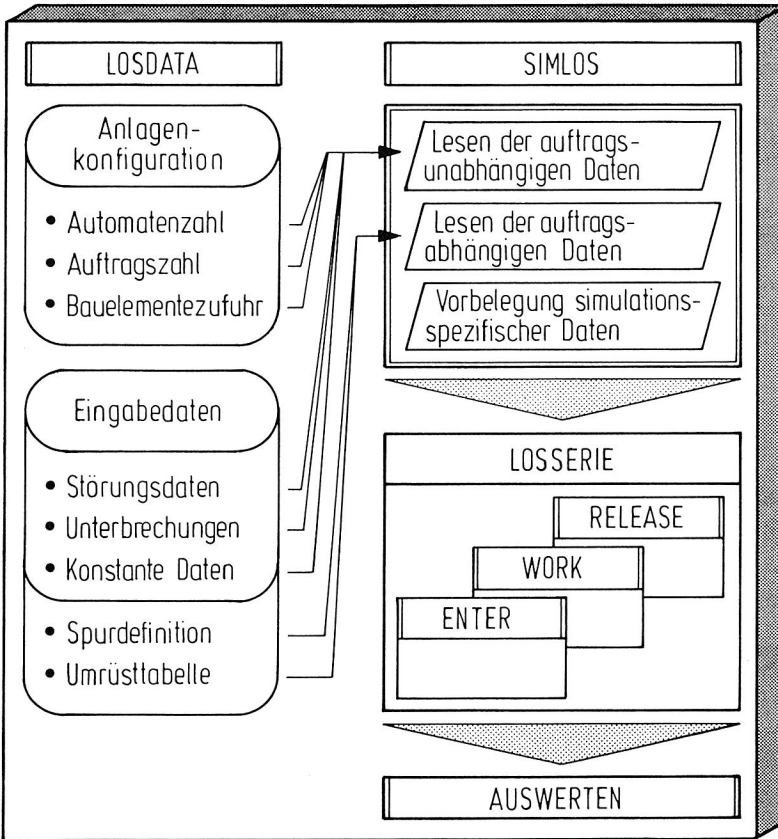


Abbildung 85: Struktur des Simulators

samten Bestückungslinie durch Parameterisierung der Automatenanzahl, der unterschiedlichen Aufträge und der Zuführmodulezahl pro Automat modelliert werden. Dabei wird deutlich, daß es sich hier um eine sehr einfache und schnelle Art der Modellbildung handelt. Der Nachteil einer geringen Flexibilität hat nur eine geringe Bedeutung, da der Aufbau dieser Bestückungsautomaten standardisiert ist und keine Modelländerungen erforderlich sind.

Neben der Definition der Anlagenkonfigurationen müssen vor der Simulation durchführung folgende Eingabedaten bekannt sein:

Störungsdaten

In der Datei für die Störungsdaten werden die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Wiederholungen bei der Bauteilaufnahme abgelegt. Hierbei muß nach der Bauteilform, Zuführart und der Kombination aus beiden differenziert werden. Darüberhinaus wird unterschieden, ob ein Vakuumfehler oder ungenaue elektrische Werte des SMD zur Wiederholung führen.

Unterbrechungen

Die Unterbrechungsdatei enthält die Verteilungen der Stillstandsdauern, die entweder durch vergebliche dreimalige Aufnahmeversuche oder sonstige Ursachen entstehen. Damit besteht die Möglichkeit, die aus Verfügbarkeitsuntersuchungen ermittelten Werte bei der Simulation zu berücksichtigen .

Konstante Daten

Für die Funktionen der Klebestation, Bestückungsautomaten und des Transportsystems werden während der Simulation konstante Werte, die jedoch menügeführt vor jedem Simulationslauf verändert werden können, zugrunde gelegt. Zu diesen Daten gehören beispielsweise die Dauer des Klebepunktsetzens, Adapterwechsel- und Zentrierzeiten sowie das Einziehen der Platinen in den Bestückungsautomaten.

Spurdefinitionen

Für jeden Automaten und Auftrag werden die SMD-Zuführmodule spezifiziert. Dazu gehört neben der Definition von Bauelementform und Fördererart die Anzahl am Anfang im Zuführmodul vorhandener Bauteile. Außerdem wird hier festgelegt, ob ein Adapter oder das Anfahren einer Zentrierstation notwendig ist. In der Spurdefinition wird auch angegeben, wieviele Bauelemente aus der betreffenden Spur für die im vorliegenden Auftrag zu fertigende Leiterplatte entnommen werden müssen.

Umrüst tabelle

Beim Auftragwechsel muß im Regelfall ein Umrüsten der Bauelementbereitstellung erfolgen. Dabei sind für jeden Förderertyp spezifische Umrüstzeiten anzusetzen. So erfordert beispielsweise das Wechseln eines Gurtes einen längeren Zeitraum als das einfache Austauschen eines Linearmagazins.

Im Programmteil LOSDATA lassen sich die vorgestellten Dateien und ihre Parameter menügeführt aufrufen und verändern. Bild 86 verdeutlicht die modulare Struktur dieser Eingabe.

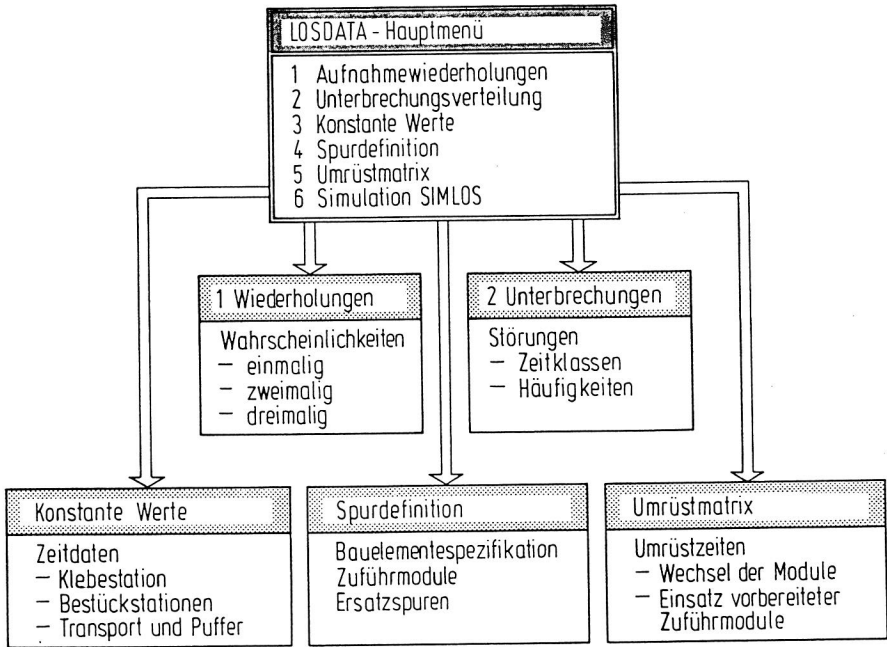


Abbildung 86: Menüführung im Programmteil LOSDATA

6.2.4 Ablauf der Simulation

Wie in Bild 85 dargestellt, erfolgt die Simulation der SMD-Bestückungslinie im Programmteil SIMLOS. Hier werden zunächst die auftragsabhängigen und -unabhängigen Eingabedaten aus LOSDATA übernommen und um simulationslaufspezifische Daten ergänzt. Hierzu gehört die Vorbelegung der im System vorhandenen Pufferdimensionen sowie die Parameterdefinition für die während der Simulation aufzurufenden Zufallszahlengeneratoren. Darüberhinaus müssen die zu produzierenden Aufträge und deren Abarbeitungsreihenfolge benannt werden.

Der eigentliche Simulationslauf wird dann in der Prozedur "LOSSERIE" durchgeführt. Die Abarbeitung der in mehreren Bestückungsautomaten parallel erfolgenden Operationen wird mit Hilfe einer Zeitsteuerung sequenzialisiert. Dabei wird durch zusätzlich implementierte Mechanismen sichergestellt, daß zeitgleiche Ereignisse berücksichtigt werden und nicht zu einer Blockierung in der Simulation führen können. Die Zeitsteuerung beinhaltet für jeden Automaten eine Statusmeldung und den Zeitpunkt seiner nächsten Aktivität. Aus den Statusmeldungen geht hervor, ob der betreffende Automat aufgrund von Platinenmangel im davor-

liegenden Puffer warten muß oder die Abgabe einer bestückten Flachbaugruppe blockiert wird. Innerhalb der Zeitsteuerung wird der nächste Ereigniszeitpunkt ermittelt und die zugehörige Aktivität ausgeführt.

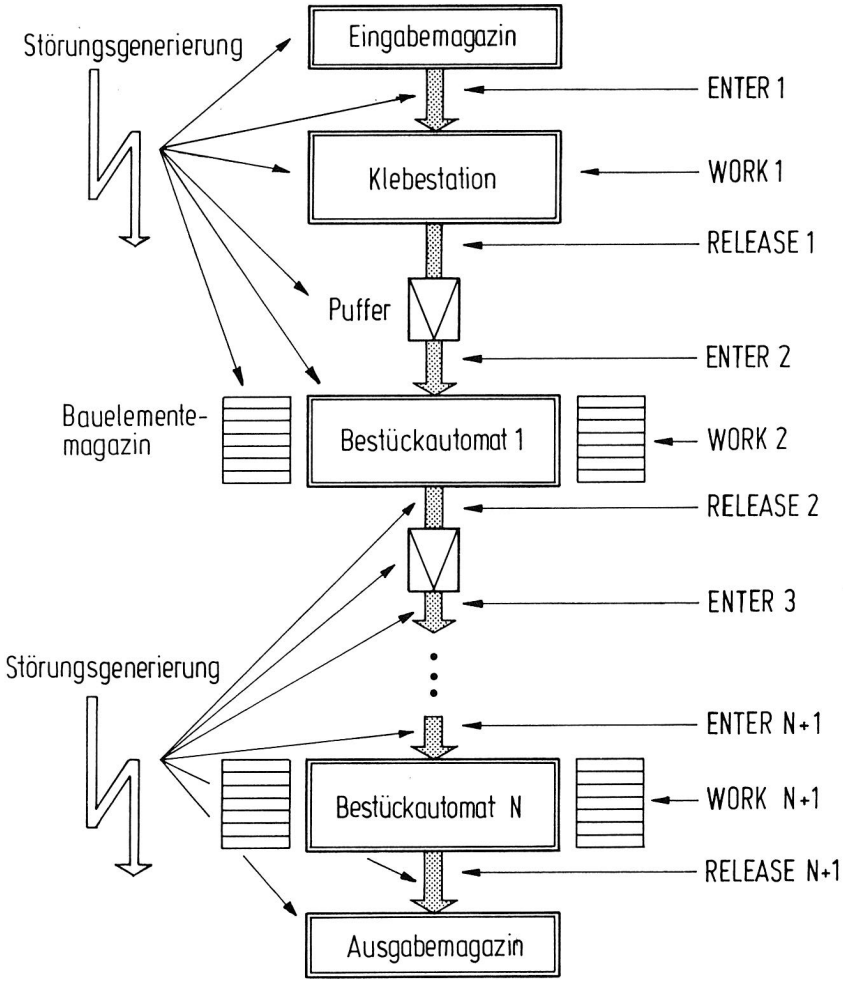


Abbildung 87: Ablauf der Simulationsprozedur LOSSERIE

Bild 87 veranschaulicht den Ablauf der Simulation einer Bestückungslinie mit einer Klebestation und n Bestückungsautomaten. Dabei sind die wichtigsten Arbeitsabschnitte der Prozedur LOSSERIE hervorgehoben.

ENTER

Im Unterprogramm ENTER wird der Platineneinzug in den Automaten simuliert. Es ist zuvor abzuprüfen, ob der Puffer lieferbereit oder leer ist. Kann keine Platine entnommen werden, muß der Bestückungsautomat in den Zustand "Warten" überführt werden.

WORK

Dieses Unterprogramm bildet sowohl den Arbeitsablauf der Klebestation als auch der Bestückungsmaschinen ab. Ein wesentlicher Bestandteil von "WORK" ist die Generierung von Störungen und Unterbrechungen sowie deren zeitlicher Dauer.

RELEASE

Durch Aufruf des Programms RELEASE wird die Ausgabe einer fertigen Platine abgebildet. Ähnlich dem Funktionsumfang von ENTER werden auch hier Warte- bzw. Blockierbedingungen abgefragt und die Pufferbelegungen aktualisiert.

6.3 Vorstellung des Simulators SASB an Beispielen

Nach der Beschreibung des konzeptionellen Aufbaus des Simulationssystems SASB soll dessen Einsatzbereich und Arbeitsweise an zwei Beispielen konkretisiert werden. Dabei handelt es sich zum einen um eine Anwendung bei der Planung und Investitionsentscheidung eines SMD-Bestückungssystems. Zum anderen wird der Simulator zur Beantwortung einer häufig vorkommenden Fragestellung des betrieblichen Einsatzes einer bestehenden Bestückungslinie verwendet.

6.3.1 Planung einer SMD-Bestückungslinie

Die Planung von Anlagen zur Bestückung elektronischer Bauelemente orientiert sich an dem zu produzierenden Auftragsspektrum sowie an den prognostizierten Stückzahlen. Für die Verarbeitung von SMD stehen am Markt eine Reihe von unterschiedlichen Bestückungssystemen zur Verfügung, die wiederum verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten bieten. Am Beispiel einer aus mehreren Sta-

7 Zusammenfassung

In der Montageplanung gewinnt der Einsatz rechnerunterstützter Hilfsmittel zunehmend an Bedeutung. Das liegt einerseits an den Erfordernissen durch immer kürzer werdende Planungszyklen und andererseits an der zunehmenden Komplexität heute eingesetzter Montagesysteme. Die Realisierung anwenderfreundlicher Planungssoftware wird durch das breite Angebot an Standardprogrammen und durch ein verbessertes Preis-Leistungs-Verhältnis der Rechner erleichtert. Dadurch wird auch sichergestellt, daß bei Beachtung ergonomischer Grundprinzipien, die Akzeptanz von Rechnerarbeitsplätzen im Planungsbereich steigt. Die spezifischen Belange der Montagetechnik werden bei den vorhandenen Programmsystemen jedoch nicht oder nur sehr unzureichend berücksichtigt.

Eine zentrale Bedeutung im Planungsablauf neuer oder zu modifizierender Montageanlagen besitzt die Simulationstechnik. Mit ihr lassen sich durch eine modellhafte Abbildung des realen zeitlichen Verhaltens geplanter Systeme Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Schwachstellen gewinnen. Insbesondere die Frage nach dem Nutzungsgrad und der daraus resultierenden Ausbringung gefertigter Geräte kann durch die Simulation beantwortet werden. In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten, die durch die Integration der Simulation in den Planungsprozeß eröffnet werden, aufgezeigt. Darüberhinaus werden zunächst systematisch die Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen vorgestellt. Die Grenzen alternativer Verfahren zur Simulationstechnik bei der Überprüfung von gewählten Verbesserungsmaßnahmen werden dargelegt.

Anschließend erfolgt eine Vorstellung der besonderen Belange der Montagesystemplanung bezüglich der Simulation. Es wird herausgestellt, welche Strukturen in der Montage vornehmlich anzutreffen sind, um die Anforderungen an spezifische Bausteine für die Montagesystemsimulation definieren zu können. Dabei wird auch auf die Bestückung elektronischer Bauelemente als bedeutender Sonderfall in der Montage eingegangen. Die Darstellung der Vorgehensweise bei Simulationsstudien mit dem Schwergewicht der Modellbildung schließt sich daran an. Das Kapitel wird durch die Beschreibung der Arbeitsinhalte von Planern und Simulationsexperten während einer Simulationsstudie abgerundet.

An einem konkreten Beispiel für die flexible Montage von elektromechanischen Kleingeräten wird der Einsatz eines allgemeinverwendbaren Simulationspaketes vorgestellt. Mit dem Simulator GPSS-FORTRAN Version III wurde eine sehr komplexe Linie modelliert und verschiedene layout- und steuerungsspezifische Fra-

gestellungen behandelt. Damit wird aufgezeigt, daß mit Hilfe dieses sehr mächtigen Simulationswerkzeugs eine Planungsunterstützung grundsätzlich möglich ist. Aus den Erfahrungen wurden aber auch die Probleme deutlich, die insbesondere bzgl. der Akzeptanz beim Planer und der Interpretationsfähigkeit der Ergebnisse gemacht wurden.

Als Konsequenz aus den mit GPSS-FORTRAN gewonnenen Erkenntnissen wurde das Simulationssystem SIMU entwickelt, daß primär für die Grobplanung von Montagestrukturen konzipiert ist. In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Leistungsfähigkeit von SIMU beschrieben und an einem typischen Montagesystem demonstriert. Dabei steht insbesondere auch der ergonomische Aspekt der Bedienerführung und Ergebnisdarstellung einschließlich Animation im Vordergrund. Abschließend wird ein Vergleich von SIMU mit dem GPSS-FORTRAN-Montagemodell durchgeführt.

Das letzte Kapitel beschäftigt sich mit der Simulation zur Nutzungssteigerung verketteter SMD-Bestückungsautomaten. Hier werden zunächst die besonderen Problemfelder der Bestückung elektronischer Bauelemente aufgezeigt und Ansätze zur Verbesserung erarbeitet. Zur Modellierung und Simulation der Abläufe in flexiblen Bestückungslinien wurde SASB entwickelt. Mit diesem Simulator lassen sich zum einen alternative Linienkonfigurationen miteinander vergleichen und zum anderen auch auftragssteuerungsspezifische Fragen beantworten. Ein Schwerpunkt wird hier auf die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Bestückungssysteme gelegt. Abschließend wird ein Maschinen-Daten-Management-System vorgestellt, mit dem u.a. simulationsrelevante Eingabedaten direkt aus der Bestückungslinie ermittelt werden und dem Anlagenbediener zur Einleitung von Verbesserungsmaßnahmen online auf einem Grafikbildschirm zur Verfügung gestellt werden.

Durch die vorgestellten Arbeiten werden dem Planer von komplexen Montagesystemen neue Hilfsmittel angeboten, die ihn bei seinen Aufgaben unterstützen und dem Führungspersonal abgesicherte Ergebnisse als Grundlage für Entscheidungen geben. Damit wird ein wichtiger Beitrag auf dem Weg zur durchgängigen rechnergeführten Montageplanung geleistet. Die Softwaremodule wurden so konzipiert, daß sie mit anderen Programmsystemen kombiniert werden können und somit als integrierter Bestandteil einer Verfahrenskette zu betrachten sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Abele, E., Bäbller, R., Wolf, E.M.; Einsatzmöglichkeiten flexibel automatisierter Montagesysteme; VDI-Z Bd.126 (1984) Nr.13, S.465-473
- [2] Abele, E., Bäbller, R., Wolf, E.M.; Stand und Entwicklung in der Serienmontage; wt-Z. ind. Fertig., 75 (1985), S.15-19
- [3] Anderson, D.R., Moodie, C.L.; Optimal Buffer Storage Capacity; Production Line Systems International Journal of Production Research 7 (1969)3, S.233-240
- [4] Augsburg, G., Diedenhofen, H.; Nutzungsverbesserung von kapitalintensiven Produktionseinrichtungen durch On-line Datenerfassung und Echtzeitsteuerung; Zwf 78 (1983)4, S.162-169
- [5] Bachers, R.; Vergleichende Simulation durch Kennwertbildung - Eine SIMULAP- Studie in der Automobilindustrie - ; Fachtagung Simulationstechnik und Logistik, 3. u. 4.Juni 1986 in Dortmund
- [6] Bäckers, R.; Beitrag zur rechnergestützten Bearbeitung betrieblicher Planungsprobleme mit Hilfe der Simulationstechnik; Dissertation an der RWTH Aachen 1983
- [7] Becker, B.-D.; Die Fabrik im Simulator - Simulation als Planungsexperiment für Fertigungsprozesse; CIM-Praxis September 1987, S. 46-50
- [8] Börnecke, G.; Stand und Tendenzen der Automatisierung in der Elektrotechnik; Zwf 80 (1985)3, S.101-105
- [9] Börnecke, G.; Produktivitätssteigerung durch Materialflußoptimierung; Zwf 82 (1987)3, S.127-132
- [10] Boothroyd, G., Redford, A.H.; Mechanized Assembly Mc Graw-Hill; London 1968
- [11] Brankamp, K., Bongartz, B.; Ausführung und Anwendung von Geräten zur Qualitätssicherung an Maschinen der Massenfertigung durch Prozeßüberwachung; QZ 26 (1981)3, S.68-71
- [12] Brankamp, K., Paul, H.J.; BDE-Daten als Basis für die Überwachung der Fertigungssteuerung; Zwf 81 (1986)6, S.297-301

- [13] Bryda, R., Rasspe, A.; Gut geplant mit "KASIMIR" Logistik im Unternehmen; Heft Juli 1987, S.58 ff.
- [14] Bullinger, H.-J.; Systematische Montageplanung-Handbuch für die Praxis; Carl Hanser Verlag, München 1986
- [15] Bullinger, H.-J., Koether, R., Letters, F.; Auslegung einer Automobil-Endmontage mit Hilfe der Simulation; ZwF 79 (1984)12, S.607-612
- [16] Bullinger, H.-J., Schweizer, W.; Interaktive Simulation von Montagesystemen; wt-Z. ind. Fertig. 75 (1985), S.421-424
- [17] Buzacott, J.A.; The Role of Inventory Banks; Flow-Line Production Systems Research 9 (1971), S.425-436
- [18] Chmielnicki, S.; Flexible Fertigungssysteme - Simulation der Prozesse als Hilfsmittel zur Planung und zum Test von Steuerungsprogrammen; Springer Verlag, Berlin 1985
- [19] Dangelmaier, W., Becker, B.-D.; Vergleich und Entwicklungsrichtungen von Werkzeugen zur diskreten Simulation von Fertigungssystemen; Informatik-Fachberichte 150 - Simulationstechnik -, S.564-571; Springer Verlag Berlin 1987
- [20] Dilling, H.-J.; Montagegerechte Produktgestaltung; VDI-Bericht Nr.323 (1978), S.33-39
- [21] Dreger, W.; Planung der Verfügbarkeit von Förder-Anlagen; VDI-Z Bd.119 (1977) Nr.5, S.245-249
- [22] Eißler, W.; Automatisierte Überwachungsverfahren für Fertigungseinrichtungen mit speicherprogrammierten Steuerungen; Springer Verlag, Berlin 1983
- [23] Eißler, W.; Automatische Überwachung einer Fertigungslinie; ZwF 75 (1980)8, S.384-387
- [24] Engelke, H., Schwarz, W., u.a.; Integrated Manufacturing Modelling System (IMMS); IBM Journal of Research and Development, Vol.29 Nr.4/85
- [25] Eversheim, W., Hoeschen, R.D., Müller, W.; Handhabungsgerechte Konstruktion; Industrieanzeiger 101 (1979)12, S.19-21

- [26] Eversheim, W., Müller, U; Aufgabenspezifische Überwachungsstrategien - Voraussetzung für eine wirtschaftliche Fertigung; QZ 27 (1982)12, S.374-377
- [27] Feldmann, K.; Anwendung der Warteschlangentheorie zur optimalen Gestaltung von Handhabungssystemen; Industrie-Anzeiger 97.Jg. Nr.31 v. 16.4.75, S.621-622
- [28] Feldmann, K.; Rechnergestützte Planungsmethoden für Montagesysteme; Vortrag anlässlich des Kolloquiums "Automatische Produktionssysteme"; München 1985
- [29] Feldmann, K., Kleineidam, G.; CAD für Montageplanung und montagegerechte Produktgestaltung; Tagungsband zum 7. Deutschen Montagekongreß, München 1987
- [30] Feldmann, K., Kleineidam, G., Eisele, R.; Verfahrenskette zur Planung und Programmierung von Montagesystemen; Zwf 82 (1987)9, S.521-527
- [31] Frank, H.-E.; Das Verhalten von Werkstücken in der Fertigung bei automatischer Handhabung; VDI-Z 118 (1976)12, S.573-578
- [32] Gairola, A.; Montage automatisieren durch montagegerechtes Konstruieren; VDI-Z 127 (1985)11, S.403-408
- [33] Gehler, R.; Wirtschaftlichkeitsverbesserung automatischer Montageanlagen in der Anlaufphase; Zwf 78 (1983)7, S.301-304
- [34] Gehler, R.; Steigerung der Anlagennutzung in der Anlaufphase; Tagungsband zum Fachseminar des Instituts für Fabrikanlagen "Nutzungsgradverbesserung automatischer Montageanlagen"; Hannover, 18. u. 19.09.1984
- [35] Gericke, E.; Verfügbarkeitsberechnung für komplexe Fertigungseinrichtungen; Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1980
- [36] Granow, R.; Simulation hilft bei der Auslegung von Werkstattfertigung; VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.6, S.189-194
- [37] Großeschallau, W.; Materialflußrechnung; Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1984
- [38] Großeschallau, W.; Planning of Production and Material Flow Systems by Interactive Computer Graphics Simulation (INSIMAS); Proceedings of the 17th Annual Simulation Symposium, Tampa 1984

- [39] Großeschallau, W., Kuhn, A., Jünemann, R.; Simulation von Materialflußsystemen; f+h - fördern und heben 30 (1980) Nr.2,5,6
- [40] Guttman, H.-T.; Leistungsermittlung mit Betriebsdatenerfassungssystemen; VDI-Z Bd.128 (1986) Nr.3, S.51-55
- [41] Habenicht, D.; ANSIM - Ein praxisgerechtes Instrumentarium zur Planungsüberprüfung; Vortragsmanuskript anlässlich der VDI-Fachtagung "Praxis der Montageautomatisierung", Würzburg 1986
- [42] Hahn, R.; Aufgaben der Produktionsplanung bei Mehrprodukt-Linienfertigung und Möglichkeiten zu ihrer Lösung; Dissertation an der Universität Stuttgart 1971
- [43] Hemberger, A.; Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme; Carl Hanser Verlag, München 1988
- [44] Herzberg, F., Mausner, B., Snyderman, B.; The Motivation to Work Mausner; B.:J. Wiley & Sons, 1959
- [45] Herzlieb, G.; Methoden und Vorgehensweise zur Optimierung störungsbehafteter automatischer Produktionsanlagen; Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 2 Nr.80; VDI-Verlag, Düsseldorf 1984
- [46] Herzlieb, G.; Stördaten - Erfassungssystem (SDE- System) zur Anlagenoptimierung; AV 20 (1983)5, S.138-143
- [47] Hesse, S.; Prinzipien automatisierungsgerechter Werkstückgestaltung; Fertig. u. Betr. 29 (1979)3, S.172-176
- [48] Janisch, H.-W.; Optimierung der Puffer bei elastisch verketteten Fertigungssystemen; Dissertation an der Universität Hannover 1979
- [49] Kaiser, D.-W.; Rechnergestützte Simulation; ZwF 82 (1987)6, S.321-324
- [50] Kettner, P., Thome, H.G.; Graphisch interaktive Simulation von integrierten Fertigungs- und Montagesystemen ; Informatik- Fachberichte 150-Simulationstechnik, S.572-584; Springer Verlag Berlin 1987
- [51] Kiener, W., Löhr, G.-H.; Auswirkungen des Montage- und automatisierungsgerechten Gestaltens von Einzelteilen, Baugruppen und Fertigprodukten; mht (1975)2, S.16-19

- [52] Kistner, K.-P.; Betriebsstörungen und Warteschlangen, Die Erfassung störungsbedingter Stauungen mit der Warteschlangentheorie, Westdeutscher Verlag 1974
- [53] Kopp, H.; Kriterien und Methoden für die Überwachung hochautomatisierter Fertigungseinrichtungen; VDI- Berichte Nr.364, 1980, S.69-74
- [54] Koxholt, R.; Die Simulation - ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung; Oldenburg Verlag, München 1967
- [55] Letters, F.; Die Simulation unterstützt die Montageplanung; Informatik-Fachberichte 109 - Simulationstechnik , S.483-492; Springer Verlag, Berlin 1985
- [56] Löhr, H.-G.; Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme; Krausskopf Verlag, Mainz 1977
- [57] Lotter, B.; Wirtschaftliche Montage - ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik; VDI-Verlag Düsseldorf, 1986
- [58] Luithle, J., Pentz, N., Scheue, H.; Dimensionierung von Werkstückpuffern; wt-Z. ind. Fertig. 68(1978), S.19-21
- [59] Matull, E.; Rechnergeführte Gewinnung von Verfügbarkeitsdaten zur Nutzungssteigerung automatisierter Großanlagen; Dissertation an der Universität Hannover 1982
- [60] Mexis, N.D., Buckenberger, T.; Die Komplexionsanalyse in der Ernährungsindustrie; Rhenania Verlag, Hamburg 1983
- [61] Mexis, N.D., Döltsch; Beeinflussung der Verfügbarkeit durch das Schwachstellenverhalten; Konstruktion 34 (1982)11, S.327-334
- [62] Möhl, R.; Werkstück- und Werkzeugüberwachung-Funktionsprüfung und Fehlerdiagnose in der spanenden Fertigung; Werkstatt und Betrieb 118 (1985)11 S.735-738
- [63] Nagel, S.; Transactionsorientierte Modelle mit beschränkten Warteräumen in GPSS-FORTRAN; Informatik Fachberichte 109 -Simulationstechnik, S.235-240; Springer Verlag, Berlin 1985
- [64] Neupert, H.; Flexible Fertigungssysteme flexibel simulieren; Sicomp- Information Ausgabe 8, Oktober '86, S. 5 ff

- [65] N.N.; DIN 55 350 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Beuth Verlag GmbH, Berlin 1980
- [66] N.N.; Information über das Betriebsdaten-Erfassungssystem MADADOR; Firmenschrift der Siemens AG München 1986
- [67] Nolting, F.-W.; Rechnergestützte Systeme zur Montageplanung; atp-Sonderheft Fertigungsautomatisierung 1987, S.53 ff
- [68] Petermann, J., Pester, K.-H.; Probleme der Zuverlässigkeitsanalyse für Maschinen und Strukturen des Maschinenbaus; Fertigungstechnik und Betrieb 23 (1973)7, S.415-421
- [69] Peters, H.; Simulation zur Personaleinsatzplanung in der Fertigung; Informatik Fachberichte 150 -Simulationstechnik, S.558-563; Springer Verlag, Berlin 1987
- [70] Redeker, G., Janisch, H.; Pufferoptimierung bei verketteten Fertigungssystemen; ZwF 76 (1981)12, S.579-585
- [71] Reinhardt, A.; Die Kluft zwischen Simulations- und Steuerungssoftware - Ansätze und Möglichkeiten zur Überbrückung; Fachtagung Simulationstechnik und Logistik 3. u. 4.Juni 1986 in Dortmund
- [72] Reinhardt, A.; Realzeitsteuerung mit dem graphisch-interaktiven Simulator SIMFLEX/2; Informatik-Fachberichte 109 - Simulationstechnik; Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1985
- [73] Reisch, D.; Die Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanforderungen bei der Planung von Maschinensystemen; Dissertation an der Universität Hannover 1978
- [74] Rosemann, H.; Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Anlagen und Geräte; Springer Verlag, Berlin 1981
- [75] Roth, H.-P., Zeh, K.-P.; Planungssicherheit durch Simulation; VDI-Z Bd.126 (1984) Nr.12, S.189-194
- [76] Sauer, H.; Simulationsmodell zur Planung der Kapazität von Montagesystemen; wt-Z. ind. Fertig. 74 (1984), S.419-422
- [77] Scheifele, M., Warschat, J.; Simulation eines flexiblen Montagesystems; wt-Z. ind. Fertig. 74 (1984), S.337- 340

- [78] Schilling, W., Brandes, H.; Dimensionierung von Störungspuffern in Montagefließreihen; Fertigungstechnik und Betrieb 33 (1983)7, S.394-398
- [79] Schlüter, K.; Verfügbarkeits- und Nutzungsgradanalyse von SMD-Bestückungsautomaten und -anlagen und Optimierung ihres Betriebsverhaltens; Tagungsband anlässlich der SMT'87 in Berlin 1987
- [80] Schlüter, K.; Grafischer Modellaufbau und grafische Prozeßverfolgung; Simulationsmodelle als betriebswirtschaftliche Entscheidungshilfen; Erlangen 1986
- [81] Schlüter, K.; Computer Aided Planning of Assembly Lines with the Simulation System SIMU; Vortrag anlässlich der ESM'88 Nizza 1.-3. Juni 1988
- [82] Schmidt, B.; Systemanalyse und Modellaufbau -Fachberichte Simulation; Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1985
- [83] Schmidt, B.; Classification of Simulation Software; Syst. Anal. Model. Simul. 3 (1986)2, S.133-140
- [84] Schneeweiß, W.; Die Methoden der zuverlässigkeitstechnischen Modellbildung; Automatisierungstechnik at, 33. Jg Heft 9/1985, S.267-271
- [85] Schraft, R.D.; Flexibles Montieren und Schweißen; wt-Z. ind. Fertigung. 75 (1985) S.25-28
- [86] Schulz, H., Vossloh, M.; Modellgestützte Diagnosesysteme zur flexiblen Überwachung der Fertigung; Werkstatt und Betrieb 119 (1986)4, S.295-300
- [87] Seliger, G., Wieneke-Toutaoui, B., Rabe, M.; Simulationsunterstützung bei der Planung und im Betrieb von Flexiblen Fertigungssystemen; Informatik-Fachberichte 150 - Simulationstechnik, S.512- 519; Springer Verlag, Berlin 1987
- [88] Soliman, H.; Simulationssprachen und -pakete für die Codierung diskreter fertigungstechnischer Modelle - Eine Übersicht; Automatisierungstechnik at, 35. Jg., Heft 2/1987, S.50-55
- [89] Sowa, J.; Das integrierte Materialfluß-Simulationssystem TRANSIM; Informatik Fachberichte 109 - Simulationstechnik, S.500- 510; Springer Verlag, Berlin 1985
- [90] Spur, G., u.a.; Simulation zur Auslegungsplanung u.a. und Optimierung von Produktionssystemen; Zwf 77 (1982)9 S.446-452

- [91] Spur, G., u.a.; Rüstfreie Montage von elektronischen Baugruppen; ZwF 82 (1987)10, S.606-612
- [92] Stahlknecht, P.; Operations Research, Teil 2: Simulationsmethoden / Ablauf- und Terminplanung, Braunschweig 1966
- [93] Stetten v., R.; Auslegung von Störungspuffern in kapitalintensiven Fertigungslinien; Dissertation an der Universität Stuttgart 1977
- [94] Storr, A., Mayer, J.; Zeitdiskrete Simulation verketteter Fertigungssysteme; Simulationstechnik in der Fertigung; Hanser Verlag, München 1986
- [95] Streifinger, E.; Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel; Springer Verlag, Berlin 1986
- [96] Streifinger, E.; Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit komplexer Fertigungsanlagen; VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.21, S.865-870
- [97] Stute, G., Schwager, J.; Mikrorechner zur Fehlerdiagnose an Fertigungseinrichtungen; wt-Z. ind. Fertig. 71 (1981), S.477- 480
- [98] Takahashi, K., Senba, K.; Design for Automation Assembly; Proceedings of the 7th International Conference on Assembly Automation; IFS Bedford 1986 S.149-160
- [99] Tempelmeier, H., Endesfelder, T.; Der SIMAN MODUL PROZESSOR - ein flexibles Softwaretool zur Erzeugung von SIMAN - Simulationsmodellen; Angewandte Informatik 3/87 S.104-110
- [100] Teriete, A.; Dialogorientierte Simulation von automatisierten Materialflußsystem; Informatik-Fachberichte 109 - Simulationstechnik, S.511; Springer Verlag, Berlin 1985
- [101] Tribus, M.; Planungs- und Entscheidungstheorie ingenieurwissenschaftlicher Probleme; Vieweg Verlag, Braunschweig 1973
- [102] Vetter, H.; Ein Beitrag zur systematischen Ordnung für Verfügbarkeitsbegriffe und Erfassung bei Kraftwerksanlagen; Dissertation an der RWTH Aachen 1973
- [103] Vetter, R.; Materialflußgerechtes Gestalten von Montagesystemen für die Serienfertigung von Elektroerzeugnissen; Werkstatt und Betrieb 119 (1986)1, S.25-31

- [104] Vettin, G.; Simulation von Ablaufsystemen in der verketteten Fertigung; Maschinenmarkt, Würzburg 86 (1980) S.147-150
- [105] Viehweger, B., Wienke, B.; Rechnerunterstützte Planungshilfen für Fertigungssysteme; ZwF 81 (1986)1, S.23-28
- [106] Virnich, M.; Betriebsdatenerfassung - Ein "altes" Thema gewinnt zunehmend an Aktualität; VDI-Z Bd.129 (1987)1 S.10-16
- [107] Vladziyersky, A.P.; Problems of the Theory of Automatic Production Lines; Garrilov A.N.: Automation and Mechanization of Production Processes in the Instrument Industry; Oxford London 1967
- [108] Wagner, H.; Verfügbarkeitsverbesserung an einer Montageanlage in der Feinwerktechnik; Tagungsband zum Fachseminar des Instituts für Fabrikanlagen "Nutzungsgradverbesserung automatischer Montageanlagen" am 18. u. 19.9.1984 in Hannover
- [109] Weck, M., Kohen, E.; Simulation als Hilfsmittel für den Aufbau und Betrieb von flexiblen Fertigungssystemen; Simulationstechnik in der Fertigung; Hanser Verlag, München 1986
- [110] Wiendahl, H.-P., Lorenz, W.; Analyse von Warteschlangenmodellen mit realen Betriebsdaten einer Werkstattfertigung; wt-Z. ind. Fertig. 74 (1984), S.619-623
- [111] Wiendahl, H.-P., Springer, G.; Untersuchung des Betriebsverhaltens flexibler Fertigungssysteme; ZwF 81 (1986)2, S.95-100
- [112] Wiendahl, H.-P., Winkelhake, U.; Rechnergestützte Strukturierung automatischer Montageanlagen; ZwF 82 (1987)11, S.627-631
- [113] Wiendahl, H.-P., Walenda, H., Mayer, C.,; Diagnose des Betriebsverhaltens verketteter automatischer Montageanlagen auf der Basis eines Expertensystems; ZwF 83 (1988)1, S.40-45
- [114] Winkler, P.; Ein Beispiel für Modellierung und Simulation mit Petrinetz-Modellen; Informatik-Fachberichte 109 -Simulationstechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1985
- [115] Witte, K.-W.; Konstruktions- und Entscheidungshilfen zur montagegerechten Produktgestaltung; VDI-Bildungswerk Stuttgart 1986

- [116] Wolf, G.; Rechnergesteuerte automatisierte Kleinschützfertigung; VDI - Berichte 722 - Praxis der Montageautomatisierung 1988; VDI-Verlag, Düsseldorf 1988
- [117] Ziersch, W.-D.; Strategien zur Leistungssteigerung von automatischen Montageanlagen durch zuverlässige Zuführsysteme; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2 Nr.85; VDI-Verlag, Düsseldorf 1985
- [118] Ziersch, W.-D.; Betriebsverhalten automatischer Montageanlagen und Strategien zur Leistungssteigerung; Tagungsband zum Fachseminar des Instituts für Fabrikanlagen "Nutzungsverbesserung automatischer Montageanlagen" am 18. u. 19.9.1984 in Hannover
- [119] Zülch, G.; Simulationsverfahren in der Anwendung; Teil 1, wt-Z. ind. Fertig. 75 (1985), S.291-297
- [120] Zuse, K.; Petri-Netze aus der Sicht des Ingenieurs; Vieweg Verlag, Braunschweig 1980

Lebenslauf

Persönliches

Karsten Schlüter

geb. am 09. Dezember 1957 in Rendsburg

verh. mit Susanne Schlüter, geb. Bracht

1 Sohn: Frederik Henning, geb. 13.09.86

Eltern: Hermann Schlüter

Gerda Schlüter, geb. Gierke

Schulbildung

1964 - 1967	Grundschule in Rendsburg
1967 - 1976	Herdergymnasium Rendsburg
13.05.1976	Abitur

Studium

1976 - 1982	Studium der Fachrichtung Maschinenbau an der Universität Hannover
16.11.1978	Diplomvorprüfung
13.10.1982	Diplomhauptprüfung

Berufstätigkeit

1976 - 1980	Praktikantentätigkeiten bei verschiedenen Industrieunternehmen
1977 - 1982	Studentische Hilfskraft am Institut für Fabrikanlagen der Universität Hannover
02.01.1983	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg Leiter: Prof. Dr. K. Feldmann
01.10.1987	Oberingenieur für den Bereich Elektronikfertigung am gleichen Lehrstuhl

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

Andreas Hemberger. 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesy-
steme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

Detlef Classe. 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Projektierung von Montagesystemen

Friedrich-Wilhelm Nolting. 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.
Kartoniert.

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

Karsten Schlüter. 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

Shir-Kuan Lin. 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.