

Michael Müller

Technische Universität Dresden, Sektion Biomedizinische Technik und  
Gerätetechnik

## EIN INTERAKTIVES SIMULATIONSSYSTEM ZUR UNTERSUCHUNG DISKRETER PRODUKTIONS-PROZESSE DER ELEKTRONIK-INDUSTRIE

Zusammenfassung. Es wird ein Simulationssystem für Personal-Computer beschrieben, mit dem komplexe flexible Fertigungsprozesse modelliert und simuliert werden können. Der Produktionsprozeß wird als diskreter Fertigungsprozeß aufgefaßt, dessen Struktur mathematisch mit dem Erzeugnisflußgraphen beschreibbar ist. Der reale Fertigungsprozeß wurde analysiert und in Grundelemente geteilt; beliebig vermaschte Strukturen werden durch die Verkettung dieser Elemente modelliert. Die Eigenschaften der Elemente sind mit verschiedenen Kenngrößen quantifizierbar (z. B. Prozeßdauer, Umrüstdauer, Fehlerquote); stochastische Eigenschaften können ebenfalls berücksichtigt werden. Ein nutzerfreundlicher interaktiver Dialog garantiert eine ständige Bedienungsführung.

### 1. Problemdiskussion

In der Phase der Vorbereitung einer flexiblen Produktion ist es weit verbreitet, mit Hilfe der Computer-Simulation (digitale Simulation) eine Analyse oder Vorhersage über das Verhalten der Fertigung vorzunehmen, da analytische Modellansätze und Lösungsmethoden vielfach zu aufwendig oder nicht geschlossen lösbar sind.

Der Computer "imitiert" dabei anhand eines Modells den realen bzw. zukünftigen Fertigungsprozeß möglichst genau.

Obwohl mit der Simulation in der Regel nur suboptimale Lösungen erreichbar sind, stellt sie ein effektives Lösungsverfahren dar. Sie bietet eine wirksame Unterstützung bei der Untersuchung des Verhaltens realer oder zukünftiger Fertigungsprozesse auch für extreme Prozeßbedingungen, wobei Simulationsexperimente gefahrlos parallel zur laufenden Produktion, d.h. ohne sie negativ zu beeinflussen, ablaufen können.

Es existieren gegenwärtig 5 Tendenzen für eine möglichst gute Nachbildung des Fertigungsprozesses auf dem Computer:

1. Anwendung und gegebenenfalls vorherige Schaffung universeller mathematischer Modelle und Methoden zur Beschreibung der Fertigungsprozesse;
2. Berücksichtigung zahlreicher Besonderheiten und Randbedingungen der Fertigungsprozesse;

3. Schaffung von Software-Modulen mit einfacher, leichter Parameter-Variation zur Anpassung an den konkreten Fertigungsprozeß;
4. Verwendung von Personal-Computern und Darstellung des Simulationsgeschehens auf dem Display;
5. Entwicklung und Anwendung von Simulations-Unterstützungssystemen zur Verwaltung von Daten für die Modellierung und Simulation.

Die Produktion (Fertigung) ist ein diskreter Prozeß und weist eine komplexe Struktur auf.

Die Struktur wird mathematisch durch sogenannte Erzeugnisflußgraphen erfaßt. Die Pfeile sind Prozeßelemente (wie z. B. Montieren, Bearbeiten, Testen, Reparieren, ...); die Knoten stellen Lager dar.

Die Prozeßelemente werden durch eine konstante oder stochastische Dauer mittels einer Wahrscheinlichkeitsdichte charakterisiert.

Die Lager besitzen eine maximale Lagerkapazität. Dadurch wird eine ständige Funktion der Prozeßelemente unterstützt und ihre gegenseitige Entkopplung erreicht.

Der Graph kann Zyklen enthalten, z. B. wenn im Anschluß an eine Prüfung das Produkt (Erzeugnis) repariert und erneut geprüft wird. In der Elektronik-Industrie gibt es zahlreiche solcher Prüf- und Reparaturzyklen, da die Fehlerquote im allgemeinen einen relativ hohen Wert hat.

Die Fertigung erfolgt in Losen. Die Lose werden durch den Prüfprozeß gesplittet (z. B. in fehlerhafte und fehlerfreie Erzeugnisse geteilt). Die Prüfung zeigt zwei Fehlentscheidungen:

1. Prüfschärfe 1. Art: Einwandfreie Erzeugnisse werden als schlecht (type one error) (fehlerhaft) erkannt und zurückgewiesen;
2. Prüfschärfe 2. Art: Defekte Erzeugnisse werden als gut (fehlerfrei) (type two error) (fehlerfrei) erkannt und angenommen.

Das muß bei der Simulation berücksichtigt werden.

Weiterhin ist die Produktion flexibel, d.h. die Losgröße ist relativ klein und vom Typ des Erzeugnisses abhängig, wobei der Typ des Erzeugnisses, das von einem Prozeßelement bedient werden soll, häufig wechseln kann. Die Prozeßelemente besitzen damit (im allgemeinen unterschiedliche) Umrüstzeiten, die zwischen der Fertigung zweier Lose unterschiedlichen Erzeugnistyps notwendig werden. Weiterhin wird daran deutlich, daß die Prozeßdauer und andere Parameter der Bedienung eines Erzeugnisses für jeden Erzeugnistyp (Fertigungsauftrag) jeweils unterschiedliche Werte annehmen können.

Letztlich ist auch die Zuverlässigkeit der Prozeßelemente zu berücksichtigen, die durch die MTBF (mean time between failures), durch den Typ der Ausfallverteilung und durch die MTTR (mean time to repair) gekennzeichnet wird.

Weitere Randbedingungen und Anforderungen an diskrete Fertigungsprozesse der Elektronik-Industrie, insbesondere bei der Montage elektronischer

Baugruppen, sind ebenfalls bei der Modellierung und Simulation zu beachten, wie z. B.:

- Rationalisierung und zunehmende Automatisierung der Produktion von Klein- und Kleinstserien unter Beibehaltung bestimmter Anteile von Handarbeit;
- ständig nichtstationärer Zustand des Fertigungsprozesses infolge Klein- und Kleinstserienfertigung hoher Flexibilität;
- relativ diskontinuierliche Materialbereitstellung für die Produktion;
- Vielzahl zeitlicher und fehlererzeugender stochastischer Einflüsse;
- optimale Auslastung vieler hochwertiger technologischer Spezialausrüstungen;
- schnelle Reaktion auf Markterfordernisse und Produktionsstörungen;
- optimale Qualitätssicherung ...

## 2. Beschreibung des Simulationsmodelles

Das Simulationsmodell basiert auf einem zustands- und zeitdiskreten mathematisch-statistischen Modell. An ihm können mit der diskreten Simulation unter Zuhilfenahme der ereignisorientierten Zeitsteuerungsmethode Experimente vorgenommen werden. Das Modell berücksichtigt besonders stochastische Eigenschaften von Fertigungsprozessen der Elektronik-Industrie, deren Nachbildung die Monte-Carlo-Methode ermöglicht.

Das Modell existiert in Form eines algorithmischen Rechenprogrammes.

Das Konzept des Modelles beruht auf:

- Modellelementen,
- deren funktioneller Verkopplung zu Modellstrukturen nach dem Prinzip der LAYOUT-Nachbildung des zu untersuchenden Fertigungsprozesses,
- fertigungsorganisatorischen Entscheidungsregeln.

Ausgangspunkt für die Modellierung eines Fertigungsprozesses ist dessen Quellen(source)-Senken(destination)-orientierte Analyse und Synthese. Das bedeutet, daß die Erzeugnisse durch die modellierte Prozeßquelle generiert und in den nachgebildeten Fertigungsprozeß eingespeist werden müssen. Nach dem Passieren der zu einer Struktur verkopplten Modellelemente sind die Erzeugnisse von der Prozeßsenke aufzufangen und ankunftsmaßig zu protokollieren.

Beliebig große Fertigungsprozesse lassen sich durch Teilung in jeweils Quellen-Senken-orientierte Abschnitte "scheibenweise" modellieren und simulieren.

Diskrete Fertigungsprozesse der Elektronik-Industrie lassen sich in typische, oft wiederkehrende Modellelemente zerlegen. Durch die Definition 5 verschiedener repräsentativer Arten Grundbausteine sind Arbeits-,

Einstuerungs- und Lagerprozesse nachbildbar:

- Arbeitsbausteine
  - Bearbeitungsbaustein (Bearbeiten, Fehlerbeseitigen, Transportieren, Handhaben);
  - Montagebaustein (Montieren);
  - Prüfbaustein (Fehlerhaft-Fehlerfrei-Trennung, attributive Stichprobenprüfung für Einfachstichprobenpläne);
- Quellbaustein (Einstuern, Generieren);
- Lagerbaustein (Bereitstellen, Puffern, Sammeln, Auffangen).

Entsprechend der zur Verfügung stehenden Implementationsvariante steht dem Nutzer von jeder Art Grundbaustein jeweils eine bestimmte Anzahl Bausteine für die Modellierung zur Verfügung (z. B.: je 31 Bearbeitungs-, Montage-, Prüf- und Quellbausteine sowie 63 Lagerbausteine).

Die Eigenschaften der Bausteine (Modis, Funktionen usw.) werden mit wählbaren Kenngrößen quantifiziert. Diese Kenngrößen berücksichtigen auch stochastische Einflüsse.

Die wichtigsten Kenngrößen der Arbeitsbausteine sind:

- Prozeßdauer (einpunkt-, exponential-, normal- oder betaverteilt, andere Verteilungstypen sind nachrüstbar);
- Verfügbarkeit (exponentialverteilte MTBF und MTTR);
- Umrüstdauer (für die Vorbereitung der Bedienung eines anderen Fertigungsauftrages);
- Interne Puffergröße (z. B. für die Modellierung eines magazinierten Erzeugnisflusses).

Der Bearbeitungs- und Montagebaustein können ihre Funktion mit einer bestimmten vorzugebenden Wahrscheinlichkeit (Fehlerquote) fehlerhaft ausführen.

Außerdem fertigt der Montagebaustein ein Erzeugnis, in dessen Zustand die ODER-verknüpften Zustände aller derjenigen Erzeugnisse eingehen, die bei seiner Montage verwendet werden.

Der Prüfbaustein berücksichtigt in seiner Funktion Prüfirrtümer 1. und 2. Art (fehlerfreies Erzeugnis als fehlerhaft bzw. fehlerhaftes Erzeugnis als fehlerfrei erkannt). Diesen Ereignissen sind Wahrscheinlichkeiten (Prüfunschärpen 1. und 2. Art) zuordenbar.

Mit Hilfe des Quellbausteines erfolgt die Modellierung

- der zeitlichen Einstuerungsreihenfolge von Fertigungsaufträgen und
- des zeitlichen Einstuerungsverhaltens (gesättigt/ungesättigt) eines Fertigungsauftrages.

Hierfür sind die wichtigsten Kenngrößen:

- Startzeitpunkt der Einstuerung eines Fertigungsauftrages;
- Generierungsdauer (analog zu Prozeßdauer);

- Gesamterzeugnisanzahl eines einzusteuernenden Fertigungsauftrages. Weiterhin läßt sich durch Vorgaben für die Kenngrößen "absoluter Erzeugnisanteil" bzw. "Generierungsfehlerquote" (siehe Fehlerquote) eine determinierte bzw. stochastische Generierung des Zustandes einzusteuernender Erzeugnisse nachbilden.

Die wesentliche Kenngröße des Lagerbausteines ist seine Lagerkapazität. Im Bereich einer vorgegebenen Kapazität kann der Lagerbaustein Erzeugnisse entsprechend

- ihrer Zugehörigkeit zu einem Fertigungsauftrag und
- ihres Zustandes

aufnehmen. Erzeugnisse eines Fertigungsauftrages werden zufällig dem Lagerbaustein entnommen.

Die Bausteine verfügen außerdem über Modis und Funktionen, die eine effektive Modellierung gewährleisten, wie z. B.:

- Ablehnung der Bedienung eines Fertigungsauftrages;
- unverzügliche Weitergabe eines Fertigungsauftrages ohne dessen Bedienung;
- Sammler-Funktion und Auffangmodus (Prozeßsenke) usw.

Für die Beschreibung des Zustandes eines Erzeugnisses stehen festzulegende (zu definierende) Erzeugnisfehlerklassen und deren Kombinationen zur Verfügung. Mit der Definition einer Erzeugnisfehlerklasse läßt sich das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein klassifizierbarer qualitativer Erzeugniseigenschaften nachbilden.

In Abhängigkeit von der Implementationsvariante können den modellierten Fertigungsprozeß gleichzeitig eine bestimmte Anzahl unterschiedlicher Fertigungsaufträge durchlaufen. Jeder Fertigungsauftrag darf jeweils eine festlegbare Zahl Erzeugnisse enthalten.

Die Strukturmodellierung erfolgt durch die Verkettung von Arbeitsbausteinen bzw. Quell- und Arbeitsbausteinen, wobei zur Entkopplung zwischen ihnen jeweils ein Lagerbaustein einzufügen ist.

Damit können beliebige Modellstrukturen erzeugt werden, wie z. B.

- Grundstrukturen (Ketten(serial)-, Parallel(parallel)-, Rückführ(feed-back)-Strukturen);
- modifizierte Grundstrukturen (Ketten- und Parallelstrukturen mit besonderen Eigenschaften);
- beliebig vermaschte Strukturen (z. B. cross-overs), (Verkopplung bzw. Vermaschung von mehreren (modifizierten) Grundstrukturen, die beliebig lange, selbst (modifizierte) Grundstrukturen darstellende Zweige enthalten können).

Eine speziell zu vereinbarende Kanalstruktur bildet die zyklische Mehrfachnutzung z. B. einer technologischen Spezialausrüstung mit besonders gekennzeichneten und verkoppelten Bearbeitungsbausteinen (Kanälen) nach.

Die Kanäle einer Kanalstruktur sind hinsichtlich ihres Bedienungs- und Zuverlässigkeitsverhaltens voneinander abhängig.

Für die Steuerung, Verwaltung und Strukturierung des Flusses von Erzeugnissen verschiedener Fertigungsaufträge stehen 5 Entscheidungsregeln zur Verfügung:

- "Einstouereungsreihenfolge" der Fertigungsaufträge in den modellierten Fertigungsprozeß (nutzerdefiniert);
- "Bedienungsreihenfolge" der Fertigungsaufträge in Arbeitsbausteinen (7 unterschiedliche Prioritätsregeln anwendbar);
- "Sammeln des Erzeugnisflusses" (Sammler-Funktion) und "Splitten des Erzeugnisflusses in Rückführstrukturen" (3 unterschiedliche Kriterien) zur Beherrschung der Splittung von Fertigungsaufträgen nach Prüfprozessen und zur Steuerung des Erzeugnisflusses in Rückführstrukturen;
- "Kanalaktivierung", Aktivierungsreihenfolge der Kanäle einer Kanalstruktur (nutzerdefiniert).

Mit Hilfe der während eines Simulationsexperimentes berechneten Schätzwerte statistischer Kenngrößen erhält man Aussagen über

- Durchlaufzeiten von Fertigungsaufträgen,
- Stillstandszeiten von Arbeitsbausteinen (Ausfall oder Lagerblockierung),
- Kapazitätsauslastungen und
- Erzeugnisqualitäten.

### 3. Konzept des Simulationssystems

Die soeben beschriebene Komponente "Simulationsmodell" sowie die Komponente "Experimentierunterstützungen/-hilfen" stellen die Hauptbestandteile des Simulationssystems FLEXI dar.

Sein funktionelles Modulkonzept ist folgendermaßen gegliedert:

- Modul "Steuerung des Simulationssystems" (einschließlich Datenbasis und Programmbank);
- Modul "Modellerstellung";
- Modul "Datenvereinbarung" (Parametrisierung);
- Modul "Experimentieren": + Steuerkomponente  
+ Algorithmuskomponente (Simulationsmodell)
- Modul "mathematisch-statistische Auswertung und Ergebnisdarstellung";
- Modul "Unterstützung";
- Modul "externe Modellverwaltung" (problemspezifische dBase II-Daten-

banken (Modellbank) und PASCAL-Dateninterface).

Mit dem vorliegenden Simulationsmodell (-system) sollen solche Anforderungen in ihrer Gesamtheit erfüllt sein wie z. B.:

- Realisierung eines viele Bedingungen geschlossen betrachtenden Konzeptes von parametrisierbaren Modellbausteinen (z. B. umfassende Einbeziehung und Implementierung von Besonderheiten diskreter Prozesse in der Elektronik-Industrie; deskriptive Modellierung der Prozesselemente; Strukturmodellierung durch funktionelle, am Prozeß-LAYOUT orientierte Bausteinkopplungen);
- modulare, erweiterbare Struktur der Software-Komponenten;
- einfache Bedienbarkeit des Simulationssystems, d.h. menügesteuerte Führung des Bedieners, der keine Programmierkenntnisse haben muß;
- interaktiver Dialog in allen Phasen der Problembearbeitung und -bearbeitung (z. B. einfache Veränderbarkeit des modellierten Prozesses, seiner Struktur und der Baustein-Parameter; Eingriff in das Simulationsgeschehen; flexible Experimentiermöglichkeiten);
- visuelle Informationen über das Simulationsgeschehen;
- angemessen genaue Simulationsergebnisse in kurzer Zeit verfügbar;
- effektive Erfassung, Verwaltung, Auswertung und Präsentation problemspezifischer Simulationsdatenbestände;
- Verwendung von Personal-Computer-Technik und vereinheitlichter, kompatibler Anwender- und Systemsoftwarekomponenten sowie Absicherung einer aufwärtskompatiblen Software-Entwicklung.

Das Simulationssystem würde in Eigenprogrammierung (PASCAL, ASSEMBLER) für einen 8-bit-PC (CP/M-kompatibles Betriebssystem) implementiert.

Hierbei sind Kompromisse zu treffen.

Gegenwärtig wird an Weiterentwicklungen (z. B. Erweiterung des Modellkonzeptes, Einsatz eines 16-bit-IBM-kompatiblen-PC's) gearbeitet.

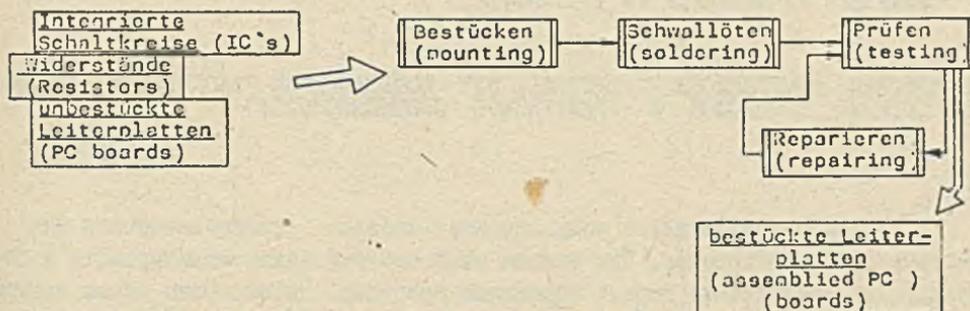
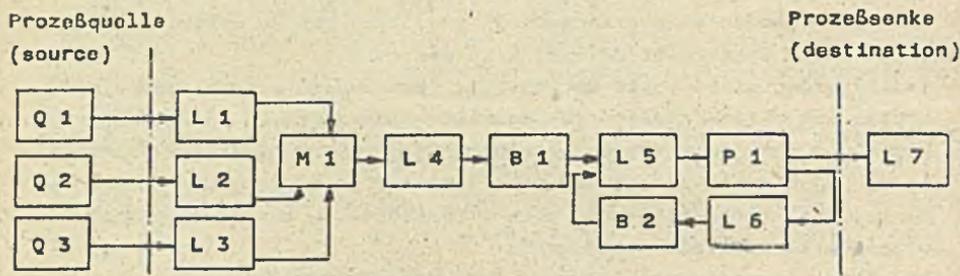


Abbildung 1: Beispiel für die Montage elektronischer Baugruppen (Schema) Rys.1. Przykład montażu modułów elektronicznych /schemat/



B = Bearbeitungsbaustein (processing module)  
 M = Montagebaustein (mounting module)  
 P = Prüfbaustein (testing module)  
 Q = Quellbaustein (source module)  
 L = Lagerbaustein (storing module)

Abbildung 2: Modellierung des Beispiels für einen diskreten Fertigungsprozess der Elektronik-Industrie (siehe Abbildung 1) mit Hilfe des Simulationssystems (-modells) FLEXI

Rys.2. Przykład modelowania dla dyskretnego procesu produkcyjnego w przemyśle elektronicznym /patrz rys.1./ z wykorzystaniem systemu symulacyjnego FLEXI

#### LITERATUR

- [1] Müller M.: Ein Bausteinssystem für die Modellierung diskreter Fertigungsprozesse und seine Nutzung auf Technologenarbeitsplätzen zur Simulation der Fertigung im elektronischen Gerätebau, TU Dresden: Dissertation A, 1988 (eingereicht)

Recenzent: Prof. dr inż. H. Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

ДИАЛОГОВАЯ СИМУЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИСКРЕТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

#### Резюме

В работе представлена симуляционная система, предназначенная для персональных компьютеров. При помощи этой системы можно моделировать и симулировать комплексные гибкие монтажные процессы. Рассмотрены также монтажные процессы, описуемые при помощи графов потоков объектов. Дан анализ действительного монтажного процесса, показаны его основные элементы. Подбирая состав этих элементов можно моделировать процесс с любой структурой. Свойства рассматриваемых элементов описаны различными параметрами. Могут учитываться также стохастические свойства элементов.

DIALOGOWY SYSTEM SYMULACYJNY DO BADANIA DYSKRETNYCH PROCESÓW  
PRODUKCYJNYCH W PRZEMYŚLE ELEKTRONICZNYM

## S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono system symulacyjny przeznaczony dla komputerów osobistych, za pomocą którego można modelować i symulować kompleksowe, elastyczne procesy montażowe. Rozpatrywano takie dyskretne procesy montażowe, których strukturę opisać można za pomocą grafów przepływu obiektów. Analizie poddano rzeczywisty proces montażowy. Wydzielono w nim tzw. podstawowe elementy. W wyniku łączenia tych elementów można zamodelować proces o dowolnej strukturze. Właściwości elementów podstawowych opisano za pomocą różnych parametrów /np. czas operacji, czas przebrojeń, częstość uszkodzeń/; uwzględnione mogą być również stochastyczne właściwości elementów.