

## **Modellauswertung durch Simulation**

### **simulare, lat.: etwas vortäuschen**

- Man spricht ganz allgemein von Simulation, wenn bei der Systemanalyse ein Modell an die Stelle des Originalsystems tritt und Experimente am Modell durchgeführt werden.
- Ist die hinreichend korrekte Abbildung zwischen Original und Modell gesichert, so lassen sich die Abläufe des realen, dynamischen Systems im Modell nachvollziehen und Kenntnisse über das Modellverhalten sammeln, die in gewissen Grenzen Rückschlüsse auf das Verhalten des Originals erlauben [Page 91].

- Der oben eingeführte Begriff Simulation ist sehr allgemein gefaßt, so daß er auch den Fall abdeckt, daß Experimente mit analytischen Modellen durchgeführt werden.
- Dennoch werden im allgemeinen nur solche Modelle als Simulationsmodelle bezeichnet, die keine analytische Behandlung erlauben.
- Simulationsmodelle in diesem Sinne können keiner bestimmten mathematischen Methode zugerechnet werden.
- Immer dann, wenn ein analytisches Verfahren (z.B. aus der Warteschlangentheorie) keine adäquate Abbildung eines Systems mehr gestattet, bietet sich die Simulationsmethode an.

- Simulationsmethoden bieten sich besonders für komplexe Systeme an, da eine korrekte Anwendung analytischer Verfahren hier oft starke Vereinfachungen erfordert und somit die Gefahr inadäquater Ergebnisse mit sich bringt.
- Generell sind die folgenden Vorteile von Simulationsmodellen gegenüber analytischen Modellen hervorzuheben:
  - Mit einem Simulationsmodell lassen sich auch komplexe Systemstrukturen untersuchen, welche die Einschränkungen analytischer Verfahren nicht erfüllen.
  - Ohne vereinfachende Annahmen über Verteilungen, Zufälligkeit oder Unabhängigkeit kann das Simulationsmodell mit einem wesentlich höheren Grad an Realitätsnähe versehen werden.

- Ein Simulationsmodell ermöglicht flexible Sensitivitätsuntersuchungen bezüglich der angenommenen statistischen Verteilungen.
- Simulation ist für den Anwender mathematisch weniger schwierig als die Verwendung analytischer Ansätze.
- Simulation ermöglicht eine anschauliche Darstellung des Systemverhaltens, weil die zeitliche Entwicklung des Systemzustandes Schritt für Schritt nachvollzogen wird.

- **Nachteile von Simulationsmodellen im Vergleich zu analytischen Modellen:**

- Im Gegensatz zu analytischen Verfahren (wie der linearen Programmierung oder anderen Optimierungsverfahren) ist bei der Simulation das Auffinden der optimalen Lösung nicht sichergestellt.
- Ein Simulationsmodell erfordert in der Regel höheren Entwicklungsaufwand als ein analytisches Modell.
- Computersimulation erfordert i.a. mehr Rechenzeit und Speicherplatz als die Anwendung analytischer Methoden.

- Die Systemsimulation kann als eine Technik zur Lösung von Problemen verstanden werden, bei der die zeitlichen Änderungen eines dynamischen Modells des Systems beobachtet werden.
- Bei kontinuierlichen Systemen (z.B. physikalische, biologische oder medizinische Systeme), wo primär stetige Zustandsänderungen interessieren, hat man im allgemeinen einen Satz von Differentialgleichungen zur Beschreibung.
- Simulationen, die auf solchen Modellen aufbauen, werden häufig mit
  - kontinuierlichen Simulationenbezeichnet, zutreffender wäre jedoch
  - Simulation kontinuierlicher Systeme oder
  - Simulation mit kontinuierlichen Methoden.

- Analogrechner können lineare und nicht lineare Differentialgleichungssysteme simultan lösen und werden häufig für solche Simulationen eingesetzt.
- Digitalrechner leisten dies auch, wenn man nur mit hinreichend kleiner Integrations-schrittweite bei der Integration der Differentialgleichungen arbeitet.

- Bei vielen Prozessen, vor allem in betrieblich-organisatorischen Systemen, z.B. bei Abläufen in Produktions-, Transport-, oder Lagerhaltungssystemen, ändert sich der Systemzustand nicht kontinuierlich, sondern diskret.
- Ein gutes Beispiel für ein solches System ist die Warteschlange vor einer Maschinengruppe einer Fertigungsanlage: Der Zustand der Warteschlange (die Zahl der "wartenden" Werkstücke) ändert sich nur bei Ankunft oder Abgang eines Werkstückes.
- Diese Ankünfte und Abgänge können als diskrete Ereignisse betrachtet werden, d.h. als Ereignisse, die zu diskret über die Zeitachse verteilten Zeitpunkten auftreten.

- Bei Systemen, wo primär das Interesse auf den Ereignissen liegt, hat man es im wesentlichen mit logischen Gleichungen zu tun, welche die Bedingungen für das Eintreten der Ereignisse enthalten.
- Die Simulation besteht hier in der Beobachtung von Zustandsänderungen des Modells als Folge zeitdiskret auftretender Ereignisse. Solche Simulationen werden auch

### diskrete Simulationen

genannt.

- **Thema dieser Vorlesung sind diskrete Simulationsmodelle.**
- Da dieser Modellansatz eine Diskretisierung der Zeit und damit eine bestimmte Betrachtungsweise der Realsysteme voraussetzt, spricht man auch von der

### Simulation zeitdiskreter Systeme.

## Elemente zeitdiskreter Simulationsmodelle

- Zeitdiskrete Simulationsmodelle treten in vielfältigen Formen auf und werden für die unterschiedlichsten Problemstellungen eingesetzt.
- Trotzdem lassen sich typische Merkmale und wesentliche Grundelemente identifizieren, die in jedem dieser Modelle auftreten.
- Ziel der nun folgenden Betrachtungen ist es, diese Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten.

### **Beziehung zwischen Zustand und Zeit**

- In jedem zeitdiskreten Simulationsmodell muß eine Beziehung zwischen Systemzustand und der Simulationszeit hergestellt werden.
- Im folgenden geht es um die prinzipiellen Möglichkeiten, den Zusammenhang zwischen der (statischen) Struktur und dem (dynamischen) Verhalten eines Systems in einem zeitdiskreten Modell abzubilden.

- **Statische Systemstruktur:**
  - Objekte, die durch ein Netz von Beziehungen miteinander verbunden sind.
  - Objekte werden durch Attribute näher charakterisiert.
- **Zwei verschiedene Arten von Attributen können unterschieden werden:**
  - Indikative Attribute zur Beschreibung von Objekteigenschaften (Bearbeitungsdauern für Aufträge, etc.).
  - Relationale Attribute, die Objekte zueinander in Beziehung setzen.

- **Zustand eines Objekts**
- n-Tupel aller Attributwerte dieses Objektes
- **Zustand des gesamten Systems**
- Menge aller Objektzustände
- Um das dynamische Verhalten eines Systems abzubilden, müssen die veränderlichen Attributwerte im Modell mit einem Zeitindex versehen werden.
- Der Index kann als spezielles Attribut (Indexattribut) aufgefaßt werden, das allen Objekten gemeinsam ist.

- Das Indexattribut Zeit wird auch als Zeitbasis eines Simulationsmodells bezeichnet.
- Die diskrete, abzählbare Zeitbasis, die in zeitdiskreten Simulationsmodellen verwendet wird, bedeutet eine Einschränkung: Vorgänge, deren exakte Beschreibung eine kontinuierliche Zeitbasis erfordern würde, werden von der Modellierung ausgeschlossen.
- In jedem Fall besteht aber die Möglichkeit einer Approximation kontinuierlicher Vorgänge durch zeitdiskrete Modelle. Bei der Verwendung eines Digitalrechners als "Modellmedium" ist die Diskretisierung kontinuierlicher Vorgänge sogar prinzipiell unumgänglich.
- Beruht das konzeptuelle Modell auf der Vorstellung eines kontinuierlichen Ablaufs und wird dieser nur aus technischen Gründen diskretisiert, so spricht man auch von einem quasi-kontinuierlichen Modell.

- Die Beziehung zwischen Zustand und Zeit kann in einem diskreten Simulationsmodell auf folgende Weise hergestellt werden:
  1. Durch ein **Ereignis (event)**, das die Veränderung eines Objektzustandes zu einem bestimmten Zeitpunkt, dem Ereigniszeitpunkt, bewirkt.

Dabei sind zwei Arten von Ereignissen zu unterscheiden:

    - Exogene Ereignisse: Der Ereigniszeitpunkt ist von der Systemumgebung vorgegeben; es besteht keine interne Abhängigkeit von anderen Ereignissen (Beispiel: Eintreffen eines Kunden).
    - Endogene Ereignisse: Sie treten als Folge von Zustandsänderungen ein, wobei die Ereigniszeitpunkte determiniert oder stochastisch sein können (Beispiel: Ende der Bedienung eines Kunden).

2. Durch einen **Prozeß (process)**, der aus einer Folge von Aktivitäten besteht, die auf ein bestimmtes Objekt bezogen sind und während einer Zeitspanne ablaufen.

**Beispiel:**

Prozeß *Bedienung* (von den einzelnen Aktivitäten der Bedienung wird abstrahiert)

Beginn

Zustand:=besetzt; //aktive Phase

**Warte** eine bestimmte Zeit lang; //passive Phase

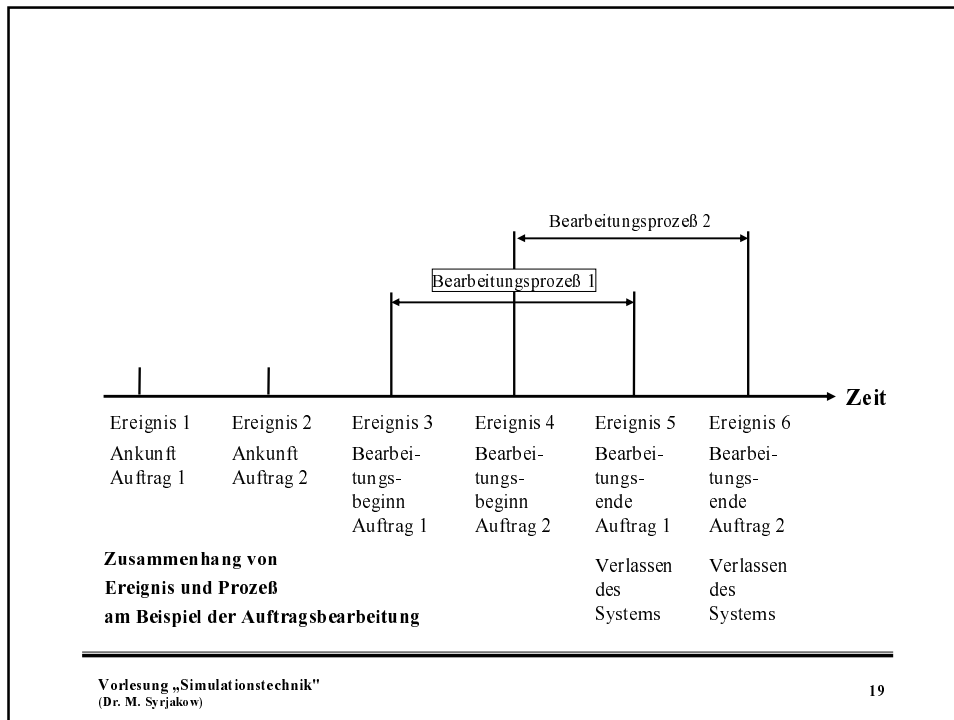
Zustand:=frei; //aktive Phase

Ende



- Systemabläufe können auf elementarer Ebene stets durch Ereignisfolgen gekennzeichnet werden.
- Bei der diskreten Ereignis-Simulation (discrete event simulation) wird eine modellinterne Simulationsuhr von der Ablaufkontrolle jeweils bis zum nächstfolgenden Ereigniszeitpunkt vorgerückt.
- Dies impliziert, daß die Zeit zwischen zwei benachbarten Ereignissen im allgemeinen variabel ist.

- Der Simulationszeitpunkt eines Ereignisses kann beliebig gewählt werden, wodurch eine wirklichkeitsgetreue Abbildung der Zustandsänderungen möglich ist.
- Dies wäre nicht der Fall, wenn man die Simulationsuhr in konstanten Zeitintervallen weiterschalten würde.
- Dann müßten alle Ereigniszeitpunkte auf das Ende eines solchen Intervalls verschoben werden, was bei ungünstiger Wahl der Schrittlänge erhebliche Verfälschungen des Modellverhaltens bewirken kann.



- Bei der diskreten Ereignis-Simulation ist es durchaus möglich, daß Ereignisse simultan auftreten, also in einem Ereigniszeitpunkt zusammenfallen.
- Ein sequentiell arbeitender Rechner ist jedoch nur in der Lage, die Ereignisse (Zustandsänderungen) nacheinander abzuarbeiten.
- Das erzwingt eine Sequentialisierung paralleler Ereignisse.
- Hierfür wird von Simulationssprachen (und anderen Klassen von Simulationssoftware) in der Regel ein Prioritätsmechanismus bereitgestellt.

### **Konzepte der zeitdiskreten Simulation**

- Innerhalb der zeitdiskreten Simulation haben sich verschiedene konzeptuelle Sichtweisen herausgebildet, auch Weltbilder (world views) oder Modellierungsstile (modelling styles) genannt.
- Sie wurden jeweils durch paradigmatische Simulationssprachen geprägt.
- Mit der Verwendung einer bestimmten Simulationssprache ist somit eine bestimmte Sichtweise der Realsysteme und ein bestimmter Modellierungsstil verbunden.

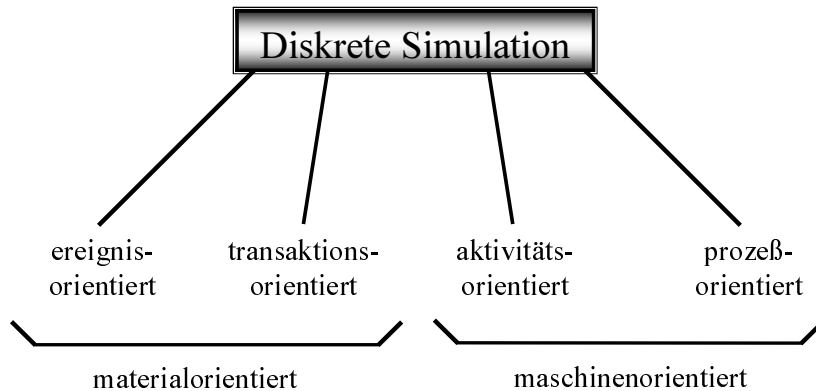
- Die vier klassischen Weltbilder
  - ereignisorientiert
  - transaktionsorientiert
  - aktivitätsorientiert
  - prozeßorientiert

unterscheiden sich in erster Linie in ihrer Sichtweise und Darstellung der Dynamik des Systemverhaltens, also den bereits erwähnten Beziehungen zwischen Zeitablauf und Zustandsveränderungen eines Systems.

- Das hat zur Folge, daß der eine oder andere Modellierungsstil je nach Art des zu modellierenden Realsystems natürlicher erscheint.

## Zeitdiskrete Simulation

### Die "Weltbilder" der diskreten Simulation



- Materialorientiert bedeutet in diesem Zusammenhang, daß bei der Modellierung primär die Materialflüsse durch Bedienstationen und die dabei zurückzulegenden Wege betrachtet werden.
- Ein materialorientiertes Modell des Kundenflusses durch einen Supermarkt würde z.B. das Aufsuchen bestimmter Verkaufsstände als Bedienstationen aus der Perspektive des Kunden darstellen.
- Bei der maschinenorientierten Sicht steht dagegen der Bearbeitungsvorgang selbst im Vordergrund. Hier würde also primär das Geschehen an den einzelnen Verkaufsständen modelliert.

### **Simulationssprachen und ihre Sichtweisen**

- GPSS           transaktionsorientiert
- Simula         prozeßorientiert
- ECSL          aktivitätsorientiert
- **Simscript   ereignisorientiert**

### **Ereignisorientierte Sicht (event scheduling)**

- Dieser Ansatz beruht auf einer detaillierten Beschreibung von Ereignissen in Form von Ereignisroutinen (event routines).
- In einem ereignisorientierten Modell werden lediglich die Zustandsänderungen nachvollzogen, die zu den Ereigniszeitpunkten stattfinden, nicht jedoch die Tätigkeiten (Aktivitäten), die in den dazwischenliegenden Intervallen ablaufen.
- Zeitlich ausgedehnte Vorgänge werden somit auf eine Folge von Ereignissen reduziert, von denen jedes einzelne einem Punkt auf der Zeitachse (dem Ereigniszeitpunkt) zugeordnet ist.

- Unabhängig davon, wieviel Rechenzeit zur Ausführung einer Ereignisroutine auf einem Computer real verbraucht wird, geschieht sie konzeptuell zeitverzugslos.
- Die interne Simulationsuhr wird vor der Ausführung der Ereignisroutine zum Ereigniszeitpunkt vorgestellt, steht während der Ausführung still und springt nach vollzogener Zustandsänderung auf den Zeitpunkt des nächsten Ereignisses vor.

- Die ereignisorientierte Sicht erlaubt eine klare Trennung zwischen der Struktur und dem dynamischen Verhalten des zu simulierenden Systems.
- Im Modell werden unterschieden:
  - **Statische Komponenten:**
    - Die Datenstrukturen, welche die unterschiedlichen Objektklassen des Realsystems und die permanent vorhandenen individuellen Objekte (Ausprägungen dieser Klassen, z.B. Maschinen eines bestimmten Maschinentyps) abbilden.
    - Die vorgesehenen Attribute ermöglichen die Kennzeichnung der individuellen Objekte und legen die prinzipiell möglichen Zustandsänderungen fest.

- **Dynamische Komponenten:**

- Die im Modell vorgesehenen Ereignisse (z.B. Beginn der Bearbeitung eines Werkstücks), dargestellt durch sogenannte Ereignisroutinen, und temporäre Objekte, die im Laufe der Simulation durch Ereignisroutinen erzeugt oder vernichtet werden (z.B. Werkstücke).

- Die **Ereignisroutinen** bestimmen in ihrem Zusammenspiel das Verhalten des Modells, indem sie
  - Attributwerte von Objekten ändern,
  - temporäre Objekte generieren oder löschen,
  - einer Ereignisliste neue, geplante Ereignisse hinzufügen oder aus der Liste streichen.

- Die **Ablaufkontrolle** erfolgt durch einen Programmteil, der die in einer Ereignisliste nach ihren Ereigniszeitpunkten geordneten Ereignisse sequentiell abarbeitet (next event approach).
- Als wesentlich ist nochmals hervorzuheben, daß bei diesem Ansatz die sogenannte tote Zeit, also die Zeit zwischen den Ereigniszeitpunkten, übersprungen wird.

- Die ereignisorientierte Formulierung eines Modells liegt nahe bei Vorgängen, die im wesentlichen im Belegen und Freigeben von Bedienstationen bestehen, ohne daß die Modellkomponenten komplex interagieren.
- Die Ablaufsteuerung ist wesentlich einfacher zu realisieren und die Programme laufen meist auch schneller als prozeß-, transaktions- oder aktivitätsorientierte Modelle.



- Prozeßorientierte Sicht (process interaction)
  - siehe *Bernd Page: Diskrete Simulation, Springer-Verlag 1991.*