

Vorlesungsreihe Simulation betrieblicher Prozesse

Werkzeuge für die kontinuierliche Simulation

Prof. Dr.-Ing. Thomas Wiedemann
email: wiedem@informatik.htw-dresden.de



HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT DRESDEN (FH)
Fachbereich Informatik/Mathematik

Werkzeuge für die kontinuierliche Simulation

- Grundlegende Aufgaben kontinuierlicher Simulationssysteme
- Historische Entwicklung
- Modellierung mit CSMP
- Methodik der "Industrial Dynamics" nach Forrester
- Das Simulationssystem VENSIM

Entwicklung von Werkzeugen zur kontinuierlichen Simulation

Grundlegende Aufgaben

- Numerische Berechnung von Differentialgleichungssystemen
- Schrittsteuerung und Fehlerüberwachung
- Ergebnisspeicherung – und präsentation

Historische Entwicklung

- erste Simulationen kontinuierlicher Systeme mit universellen Programmiersprachen
- Basissprache der ersten Simulatoren war meist FORTRAN.
- FORTRAN war für damalige Verhältnisse sehr effizient und sehr gut für numerische Berechnungen in Wissenschaft und Technik geeignet
- Umfangreiche, zuverlässige und ausgetesteten Pakete von Algorithmen zur numerischen Lösung von Differential- und Integralgleichungen in FORTRAN.
- Implementierung der Schrittweitensteuerung jedoch sehr hoch und auch fehlerträchtig, falls der Anwender diese selbst realisieren muß
- durch die Ähnlichkeit der einzelnen Realisierungen entstand schon bald die Idee eines Bausteinkonzepts auf der Basis von Subroutinen, welche wesentliche Teile der Schrittweitensteuerung ausführen
- spätere Zusammenfassung in neuen Sprachen

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 3

Kontinuierliche Simulation mit CSMP

- Eine der ersten, direkt auf die Belange der kontinuierlichen Simulation ausgerichtete Programmiersprache ist CSMP (Continuous System Modeling Program). Sie wurde von IBM für die Rechnerreihe IBM/360 entwickelt und wurde von Nachfolgesystemen in den Grundzügen übernommen und erweitert.
- Die CSMP-Programmiersprache basiert auf FORTRAN und ist auch open-ended bezüglich FORTRAN. Der Nutzer kann dadurch alle Standardfunktionen und selbst erstellte Unterprogramme aus FORTRAN nutzen.
- auch heute noch Einsatz auf speziellen Rechnern (Parallelcomputer)

Anweisungstypen von CSMP

1. Funktionsblöcke zur Beschreibung des statischen und dynamischen Verhaltens der Modellvariablen und der Verknüpfungen zwischen den Variablen in Gleichungsform;
2. Datenanweisungen zur Wertezuweisung an Parameter und Tabellen;
3. Steueranweisungen zur Initialisierung (INITIAL), Durchführung (DYNAMIC) Beendigung (FINISH) und Dokumentation (PRINT / PRTPLT) der Simulation;

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 4

Funktionsblöcke in CSMP

- CSMP-Funktionsblöcke sind als Unterprogramme realisiert (insgesamt 34)

Überblick zu den die wichtigsten Funktionsblöcken von CSMP

- Integrator $Y = \text{INTGRL}(AB, X)$ mit $AB = Y(t=0)$ zur Integration über die Zeit
- Ableitung $Y = \text{DERIV}(AB, X)$ mit $AB = X(t=0)$
- Relais $Y = \text{INSW}(X, A, B)$ mit $Y=A$ für $X < 0$ sonst $Y=B$
- Komparator $Y = \text{COMPAR}(X_1, X_2)$ mit $Y=0$ für $X_1 < X_2$ sonst $Y=1$
- Funktionsgeber $Y = \text{AFGEN}(FU, X)$ mit $FU =$ tabellierter Funktion
- Normalverteilung $Y = \text{GAUSS}(X, My, Sigma)$ generiert ein normalverteiltes Rauschen auf X
- Sprungfunktion $Y = \text{STEP}(X)$ mit $y=0$ wenn $t < X$, $Y=1$ wenn $t \geq X$
- Standardfunktionen wie e^x , $\sin()$ oder $\log(x)$ werden direkt mit den FORTRAN-Funktionen realisiert
- eigene Funktionen können auch in die Experimentsteuerung, z.B. ur Optimierung von Parametern eingesetzt werden

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 5

CSMP-Programmierbeispiel

INITIAL

PARAMETER VNULL = 0
PARAMETER WEGNULL = 0

DYNAMIC

WEGIST=INTGRL(WEGNULL, VIST)
VIST = VNULL + BESCHL * ZEIT
BESCHL = AFGEN(MOTOR, ZEIT)

FINISH

ZEIT > 1000.....

PRINT VIST

PRTPLT WEGIST

Initialisierungsroutine zu Beginn der Simulation (nur einmal ausgeführt)

Hauptschleife der Simulation (die Formeln müssen nicht in der logisch notwendigen Reihenfolge notiert werden, da CSMP selbst die Sortierung und Optimierung der Reihenfolge vornimmt)

Endebedingung

Druck und Plotanweisungen zur Ergebnisdokumentation

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 6

Das CSMP-Modell des Lagerbeispiels

- Das Differentialgleichungssystem zur Beschreibung des Beispiellagers

$$d \text{ Lager} / dt = \text{Prod}(t) - \text{Absatz}$$

$$d \text{ Prod} / dt = k * (\text{Soll} - \text{Lager}(t))$$

könnte mit CSMP wie folgt programmiert werden:

DYNAMIC

$$\text{Lager} = \text{INTGRL} (\text{LagerNull}, \text{Lagerzuwachs}) \quad (2.)$$

$$\text{Lagerzuwachs} = \text{Prod} - \text{Absatz} \quad (1.)$$

$$\text{Prod} = \text{INTGRL} (\text{ProdNull}, \text{Produzuwachs}) \quad (4.)$$

$$\text{Produzuwachs} = k * (\text{Soll} - \text{Lager}) \quad (3.)$$

muß noch
sortiert werden !

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 7

Entwicklung weiterer kontinuierlicher Simulationssysteme

- CSMP ist sehr effizient und flexibel in der Anpassung
- bei sehr komplexen Systemen jedoch Probleme mit der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit der Modelle
- bei der Modellierung ökonomischer und betrieblicher Systeme zusätzlich Bedarf an einheitlicher Vorgehensweise und Referenzmodellen.
- in Anlehnung an Systemanalyse entwickelte Forrester unter dem Titel "Industrial Dynamics" bereits 1961 eine breit anerkannte Methodik zur Erstellung sozioökonomischer Modelle unter **Nutzung grafischer Symbole**

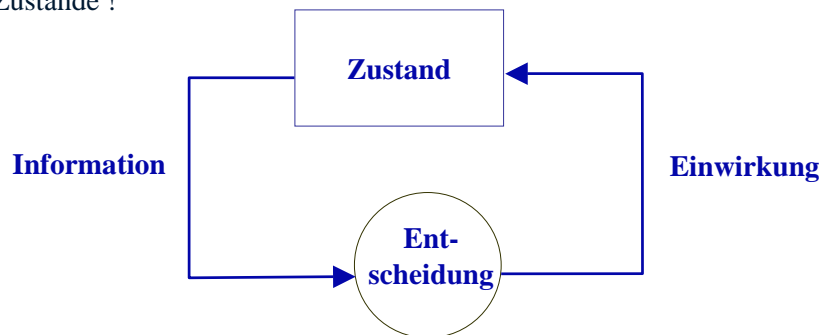
Grundlegende Methodik nach Forrester

- **Ausgangsbasis war Kritik an punktueller Betrachtungsweise von Managementproblemen:**
 - Die einzelne Betrachtung und Lösung von Teilproblemen führt in der Regel nicht zu einer optimalen Funktion des Gesamtsystems !
 - Eine nur auf den aktuellen Zustand bezogene Lösung ist ebenfalls unzureichend !
- **Notwendig ist eine ganzheitliche Betrachtung und Lösung von Faktoren über einen längeren Zeitraum ! Im Managementbereich sind unter längerem Zeitraum meist Jahre zu verstehen.**

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 8

Information Feedback

- Grundlage der "Industrial Dynamics" von Forrester ist der Gedanke der Rückkopplung, bezogen auf die Informationsprozesse
- von Forrester als "Information Feedback" bezeichnet
- Ausgangspunkt sind vorhandene **Zustände**
- die Informationen über diese Zustände liefern die Basis für **Entscheidungen**
- Die **Auswirkungen** der Entscheidungen beeinflussen selbst wieder die Zustände !



Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 9

Arten der Rückkopplung

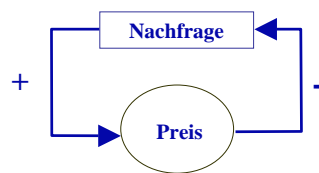
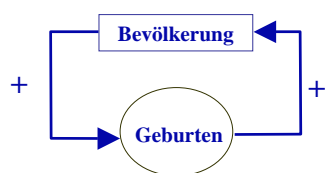
Wie in der Technik existieren zwei Arten der Rückkopplung :

Positive Rückkopplung

- Die Auswirkungen der Entscheidung verstärken den zeitlichen Trend des Zustandes
- Beschleunigung von Wachstums- oder Zerfallsprozessen
- führt in der Regel zu instabilen Systemen (unbegrenzt Wachstum)

Negative Rückkopplung

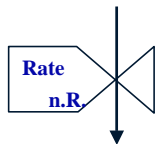
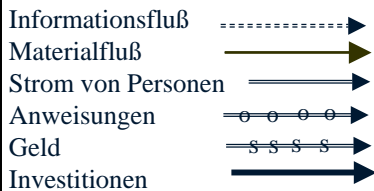
- Die Auswirkungen der Entscheidung wirken Änderungen des Zustandes entgegen.
- Annäherung an einen Sollzustand
- führt in der Regel zu Gleichgewichtszuständen



Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 10

Modellbestandteile

Zur Modellierung werden folgende Elemente eingesetzt:

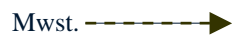
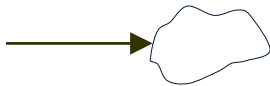
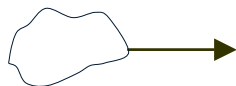


- Zustandsvariable zur Modellierung der Zustände (bei Forrester als Level bezeichnet – Level-Variable)
- Kanäle verbinden die Zustandsvariablen (Strom in den Kanälen analog zu Durchfluß bzw. Stromdichten) bei Forrester unterschiedliche Linienarten für die Medienarten
- Entscheidungselemente zur Beeinflussung des Stromes in den Kanälen (vergleichbar mit einem Ventil oder Stellelement)

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 11

Modellbestandteile II

Zur Modellierung werden folgende Elemente eingesetzt:

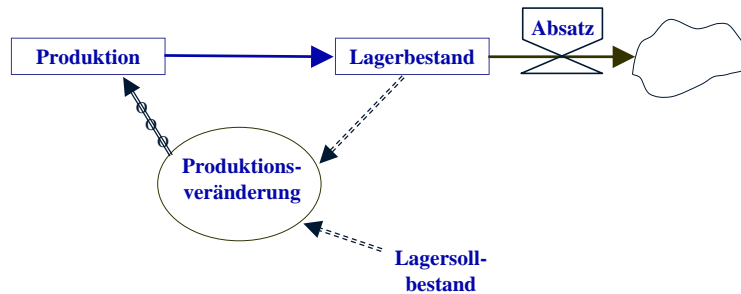


- Quelle von Material oder anderen Kanalmedien
- Senke von Material oder anderen Kanalmedien
- Informationsquelle
- Konstanter Einflussparameter
- Zwischengrößen

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 12

Modellierung mit Kausaldiagrammen

- Die Menge aller Zustandsvariablen wird über Ursache-Wirkungs-Beziehungen mit Kanälen verbunden.
- Es ergibt sich ein Kausaldiagramm, welches auch für erste Analysen eingesetzt werden kann.



Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 13

Kontinuierliche Simulationssysteme

- Aufgrund der technischen Verfügbarkeit diente die Methodik von Forrester zuerst nur als Entwurfsmethode ohne direkte Rechnerunterstützung.
- Auf der Basis der Grafik wurden Formelzusammenhänge abgeleitet und mit verschiedenen Programmiersprachen beschrieben.
- Neben CSMP kam auch die Programmiersprache DYNAMO mit ähnlichen Beschreibungsformen zum Einsatz :
 - Zur Beschreibung werden die Zeitpunkte J,K,L (vorheriger, aktueller, nächster) unterschieden und die Schrittweite DT explizit eingesetzt :

$$\text{Lager.K} = \text{Lager.J} + (\text{DT}) * (\text{Produktion.JK} - \text{Absatz.JK})$$
 wobei JK für die Berechnung des Anstiegs im Intervall J-K verwendet wird
 - Der Übergang von der grafischen Modellierung zur Formelbeschreibung war jedoch immer noch fehlerbehaftet und zeitaufwendig !
- Mit der Verfügbarkeit grafischer Benutzeroberflächen (Windows, X-Windows) wurden die ersten echten vollgrafischen System verfügbar.
- Aus der Menge verfügbarer kontinuierlicher Simulationssysteme soll das **System VENSIM** konkret vorgestellt und in den Übungen verwendet werden.

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 14

VENSIM als ein Vertreter kontinuierlicher Simulationssysteme

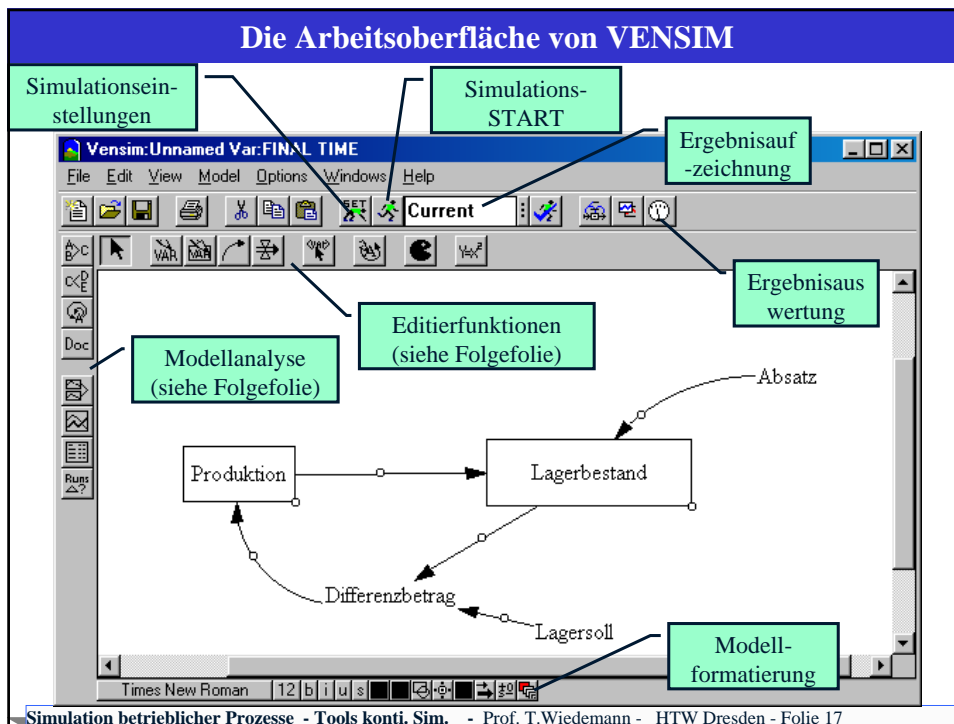
- **Allgemeine Funktionalität**
 - sehr flexible, grafisch-interaktive Eingabe
 - komfortable Eingabe der Formelzusammenhänge mit Syntaxprüfung
 - Fertige Operatoren zur Integration, Verzögerung, Zufallszahlengenerierung
 - modifizierbare Zeitsteuerung
 - Unterstützung von Maßeinheiten bei den Größen
- **Charakteristiken des Anbieters und des Softwarevertriebs**
 - Ventana INC. USA Harvard, Massachusetts www.vensim.com
 - Langjährige Erfahrungen in der Simulation kontinuierlicher Prozesse auf dem Gebieten Management und (gegr. 1985, erste Softwareversionen von Vensim 1991)
 - Starke Anlehnung an die Methodik von Forrester (zum Teil direkter Kontakt zur Arbeitsgruppe von Forrester)

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 15

VENSIM – Technische Merkmale

- **Lösungsverfahren für Differentialgleichungen**
 - Eulerverfahren
 - **Runge-Kutta mit automatischer Schrittweitenanpassung**
 - Keine speziellen Verfahren für steife Systeme, jedoch Warnungen bei Genauigkeitsproblemen während der Berechnung
- **Schnittstellen und Analysefunktionen**
 - Daten-Export- und Importfunktionen (teilweise nur in der Vollversion)
 - Datenanalysetools (teilweise nur in der Vollversion)
 - Modellvergleich
- **Hardwarevoraussetzungen**
 - lauffähig auf üblichen Standard-PC's, Macintosh-Rechner (Apple)
- **Kommerzielle Merkmale**
 - Kostenfreie Lizenz für Hochschulen (sie können die Software frei nutzen)
 - ab 500,- bis 2000,- \$ für Voll- und Profiversion

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 16



VENSIM-Eingabefunktionen

The image shows a row of icons for VENSIM input functions: a mouse cursor, a variable icon (VAR), a stock icon (stock symbol), a flow icon (arrow), a stock icon (stock symbol), a stock icon (stock symbol), a stock icon (stock symbol), a stock icon (stock symbol), and a stock icon (stock symbol).

Modellaufbau (2. Symbolleiste von oben)

- Selektieren,
- Eingabe einer "normalen" Variable (keine Differential- oder Integralgleichung als Basis)
- Eingabe von "Level"-Variablen (Integralfunktion)
- Kopplung der Variablen mit einfachen Graphen
- Erzeugung gerichteter Flüsse (Kanäle)
- Eingabe von Schattenvariablen, z.B. als Zugriffsmethode auf Variablen in anderen, entfernten Modellbereichen oder simulatorinterne Werte (die Schattenvariable TIME liefert die aktuelle Zeit während der Simulation)
- Kommentare
- Löschen
- Editieren von Berechnungsvorschriften

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 18

VENSIM-Analysefunktionen

Modellanalyse (Symbolleiste linke Seite)

Abhängigkeitsbeziehungen für selektiertes Element anzeigen

- Einflußfaktoren
- Auswirkungen
- Rückkopplungen

Textdokumentation des Modells (DOC)

- Einzelwertanzeige
- grafische Anzeige der Variablenverläufe
- Tabellarische Anzeige
- Analyse durch Vergleich der Ergebnisse mehrerer Läufe

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 19

Eingabe von Berechnungsvorschriften

Dialogmaske zur Eingabe von Berechnungsvorschriften

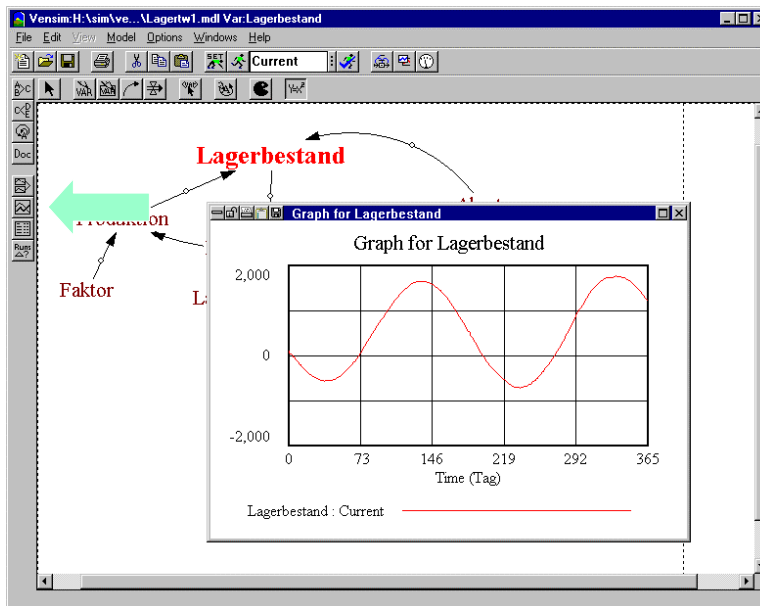
The screenshot shows the 'Editing equation for Lagerbestand' dialog box. It contains the following elements:

- Name der Variable:** Lagerbestand
- Zusammenhang der Einflußgrößen:** = INTEG (Produktion-Absatz)
- Startwert des Integrals:** Initial Value: 100
- Liste der Einflußgrößen:** Lagerbestand, Absatz, Produktion
- Optional: Maßeinheit der Variable:** Units: (empty)
- Ergebnis der Syntaxkontrolle:** Errors: Equation OK

Buttons at the bottom include: OK, Check Syntax, Check Model, Delete Variable, Cancel.

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 20

Generierung von grafischen Diagrammen



Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 21

Definition eigener grafischer Diagramme

- Aufruf über -> Windows -> Control Panel -> Graphs (oder in Symbolleiste ganz rechts)
- Beachten Sie insbesondere die Felder Y-min und Y-max zur unabhängigen Skalierung der Ergebnisse in einem Diagramm !

Custom graph definition for: LAGER1

Title: Übersicht

X-Axis: [] Sel X Label: []

X-min: [] X-max: [] X-divisions: [] Y-divisions: []

Stamp: [] Comment: []

Norm Cum Stack Dots Lb-Intervals Width: [] Height: []

Scale	Variable	Dataset	Label	LineW	Units	Y-min	Y-max
<input type="checkbox"/>	Lagerbestand	Current1	[]	[]	[]	0	700
<input type="checkbox"/>	Lagersoll	Current1	[]	[]	[]	0	700
<input type="checkbox"/>	Produktion	Current1	[]	[]	[]	0	300
<input type="checkbox"/>	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
<input type="checkbox"/>	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
<input type="checkbox"/>	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]

As WIP Graph (maxpoints) [] Copy to... Test output Soft Bounds

OK Cancel

Simulation betrieblicher Prozesse - Tools konti. Sim. - Prof. T.Wiedemann - HTW Dresden - Folie 22