

## Kap. 5: Modellierung und Simulation dynamischer Systeme

- **Ansätze für die Modellierung von Systemdynamik**
- **Begriffe und Konzepte der dynamischen Modellierung**
- **Naiver Ansatz: UML- Interaktionsdiagramme**
- **Weitere Ansätze (kausal, Automaten, ..):  
Zustandsdiagramme, Aktivitätsdiagramme**
- **Mathematischer Ansatz: System dynamics**
- **Vorgehen zur Modellierung und Simulation**
- **Rückkopplungen**

# Spektrum der dynamischen Modellierung

H. Bossel umreißt das Spektrum verschiedener Ansätze durch eine Liste von Dichotomien (vgl. [Bos 04]):

- *systemerklärend*  $\Leftrightarrow$  *verhaltensbeschreibend*
- *real (messbare) Parameter*  $\Leftrightarrow$  *(zur Modellbildung) angepasste Parameter*
- *konstante Parameter*  $\Leftrightarrow$  *zeitvariante Parameter*
- *deterministisch*  $\Leftrightarrow$  *zufallsbehaftet / stochastisch*
- *linear*  $\Leftrightarrow$  *nicht-linear*
- *(Zeit-) kontinuierlich*  $\Leftrightarrow$  *(Zeit-) diskret*
- *(Raum-) kontinuierlich*  $\Leftrightarrow$  *(Raum-) diskret*
- *Autonom (geschlossen)*  $\Leftrightarrow$  *exogen getrieben / treibend (offen)*
- *numerisch*  $\Leftrightarrow$  *nicht-numerisch*
- *aggregiertes Verhalten*  $\Leftrightarrow$  *individuelles Verhalten*

# Ansätze zur dynamischen Modellierung

## **Naiver Ansatz:**

- Beschreibung zeitlicher und kausaler Abhängigkeiten  
*Darstellung:* Wenn-Dann-Regeln, Tabellen, Graphen, Natürliche Sprache

## **Mathematischer Ansatz:**

- Funktionen ( $y / t$ ), Differentialgleichungen ( $\Delta y / \Delta t$ ) ( $y$ : Systemvariable)  
*Darstellung:* Formeln, Gleichungen, (Funktions-) Graphen

## **Automaten-Ansatz:**

- Definition von Zuständen, Zustandsübergängen, Ereignissen, ausgelösten Aktionen  
*Darstellung:* Automaten-Tabellen, Zustandsdiagramme

## **Kausaler Ansatz:**

- Definition von Bedingungen, Ereignissen, Abhängigkeiten, ausgelösten Aktionen  
*Darstellung:* Entscheidungstabellen, (Wirkungs-) Graphen, Aktivitätsdiagramme, EPK's, Petri-Netze

## **Ansatz der temporalen / modalen Logik:**

- Definition logischer, zeitbehafteter Abhängigkeiten  
*Darstellung:* Formeln, Axiome, Regeln mit temporalen / modalen Junktoren bzw. Quantoren

# Konzepte dynamischer Modellierung

- **Zeit**

Relativ oder absolut? Explizit oder implizit?

- **Zustand**

(System-) global oder lokal? Komplex (mit Unter-Zuständen) oder nicht? Mit ausgelösten *Aktionen* vor / während / nach .. oder nicht?

- **Zustandsübergang**

Mit ausgelösten Aktionen vor / während / nach .. oder nicht? Wie abgegrenzt von *Ereignis*?

- **Ereignis**

Zeitbehaftet oder nicht? Wie abgegrenzt von *Zustand* / *Z.-übergang* / *Bedingung*?

- **Bedingung**

Zeitbehaftet oder nicht? Wie abgegrenzt von *Ereignis*?

- **Aktivität / Aktion**

Unterschiedliche Konzepte? Zeitbehaftet oder nicht? Wie verankert im *Zustandsmodell*?

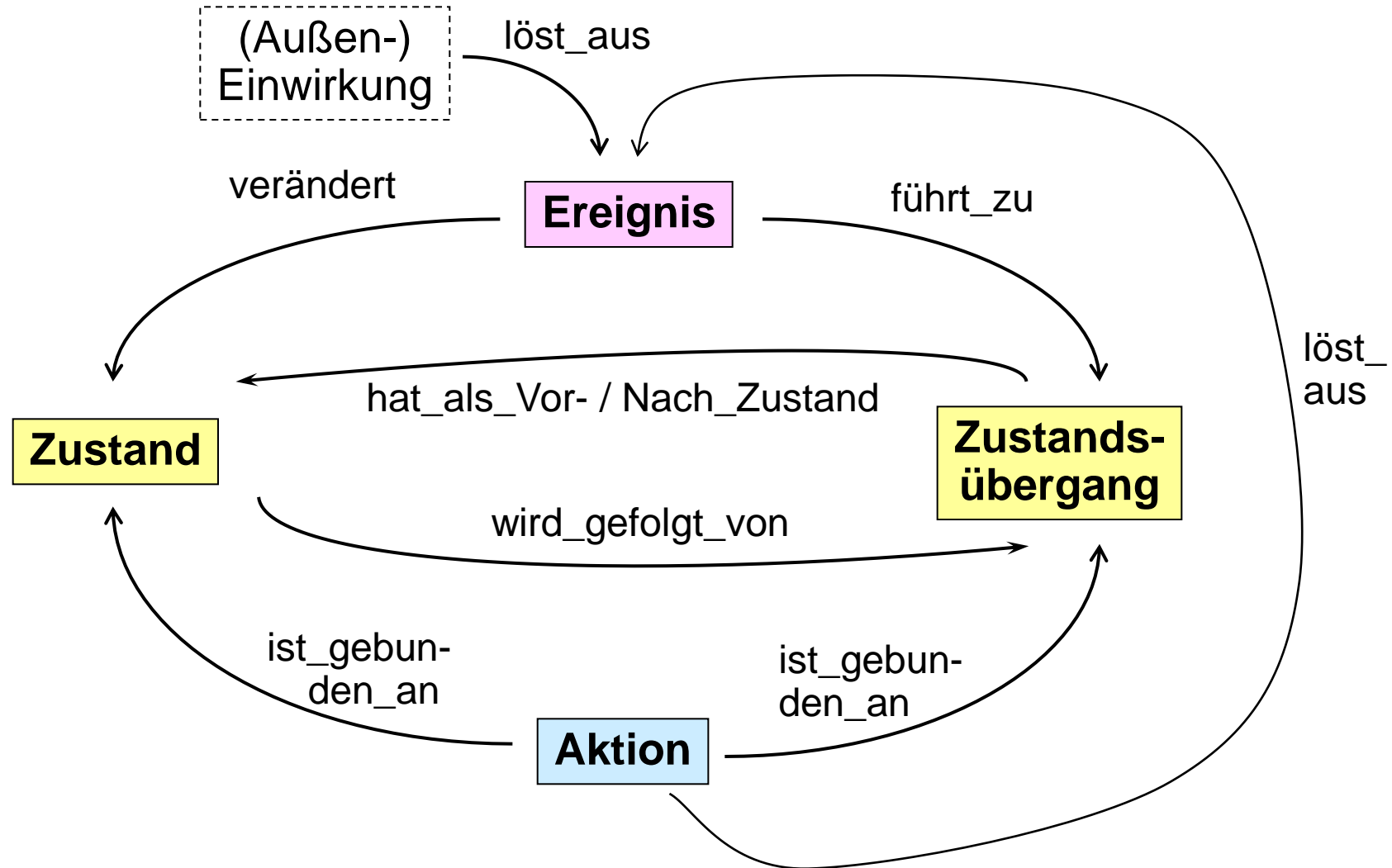
- **Abhängigkeit**

Wie formalisierbar? In welcher Beziehung (kausal, temporal, logisch, funktional, ..)?

# Dynamische Modellierung: Wichtige Begriffe

- **Zustand** (*state*): Beschreibung einer Situation, in der ein Objekt bezüglich bestimmter ausgewählter Eigenschaften unverändert bleibt. Solche Eigenschaften werden mit Hilfe von sog. *Zustandsvariablen* beschrieben. Damit lassen sich Zustände als *Bedingungen* über den Zustandsvariablen definieren: Das Objekt befindet sich im Zustand, so lange die Bedingung gilt. Zustände haben i.a. eine begrenzte zeitliche Dauer.
- **Zustandsübergang** (*state transition*): Veränderung an einem Objekt, die dieses von einem Zustand in einen anderen überführt. D.h. ein Zustandsübergang tritt ein, wenn die Zustandsvariablen so verändert werden, dass die an den betroffenen Zustand geknüpften *Bedingungen* nicht mehr erfüllt sind. Zustandsübergänge werden i.a. durch *Ereignisse* ausgelöst und haben selbst keine Dauer.
- **Ereignis** (*event*): Geschehen, das in einem gegebenen Kontext eine Bedeutung hat und das sich räumlich und zeitlich lokalisieren lässt. Ein Ereignis führt zur Veränderung von Zustandsvariablen und damit in der Regel zu einem oder mehreren *Zustandsübergang(en)* von betroffenen Objekten.
- **Aktion** (*action*): beinhaltet die Ausführung einer oder mehrere Operationen und kann entweder an einen Zustand oder an einen Zustandsübergang gebunden sein. Bem.: UML unterscheidet zwischen "*action*" (im Kleinen) und "*activity*" (übergeordnet).

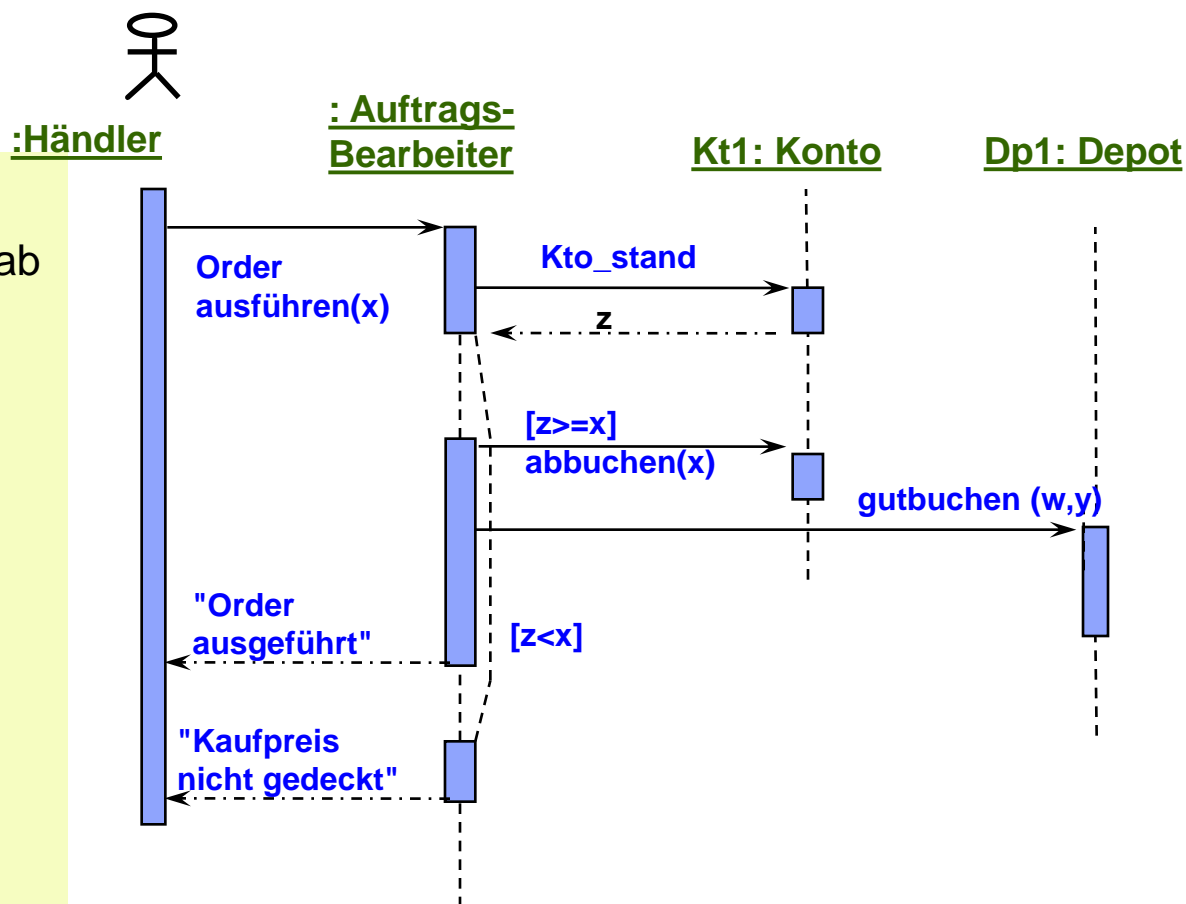
# Dynamische Konzepte und ihre Zusammenhänge



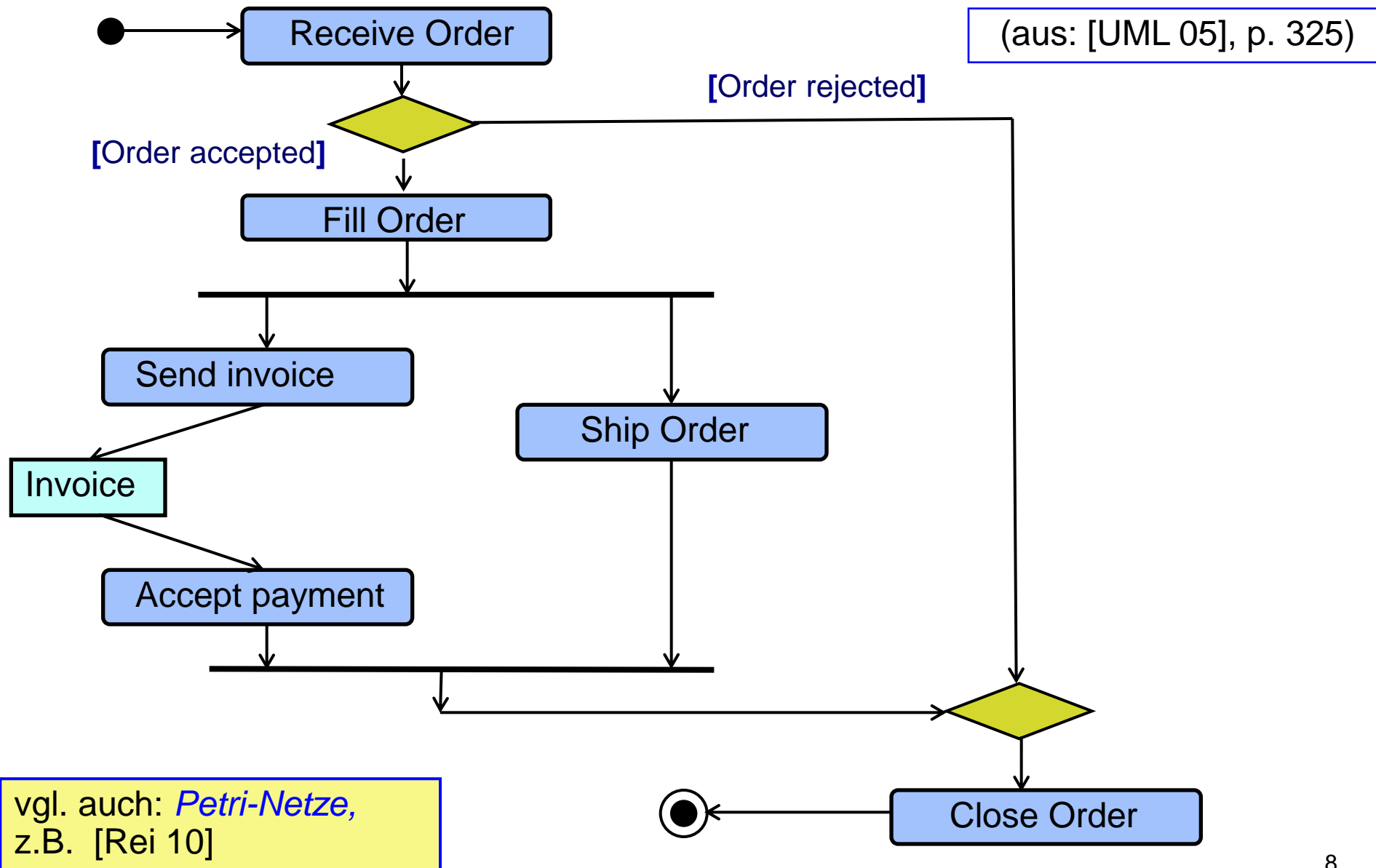
# Naiver Ansatz: Beispiel: UML-Interaktionsdiagramm

Aktionen in zeitlicher / kausaler Abfolge, ggf. abhängig von Bedingungen

- Ein Händler initiiert **Order ausführen**
- Auftragsbearbeiter fragt **Kontostand** ab
- Wenn Kaufpreis  $x$  gedeckt durch Kontostand  $z$ , dann **abbuchen** ( $x$ ) von Konto **Kt1** sowie **gutbuchen** ( $w,y$ )  $y$  Stück von Wertpapier  $w$  auf Depot **Dp1**,
- Bestätigung an Kunden  
"Order ausgeführt"
- sonst Meldung "Kaufpreis nicht gedeckt"



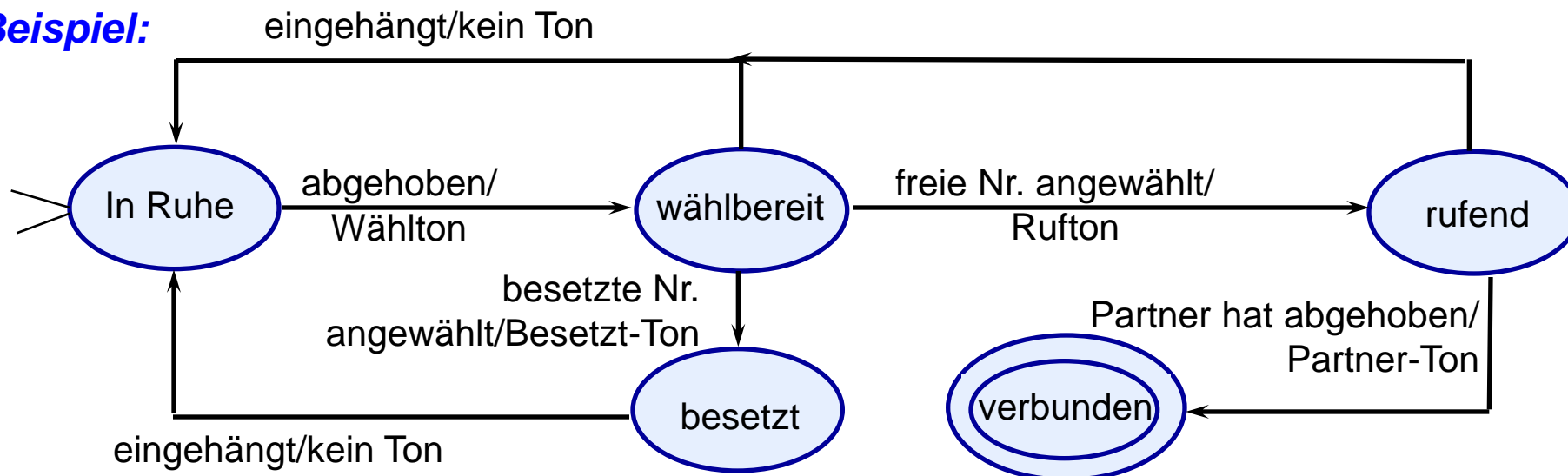
# Kausaler Ansatz: Beispiel UML-Aktivitätsdiagramm





## Automaten-Ansatz: Beispiel: Zustandsdiagramm

**Beispiel:**



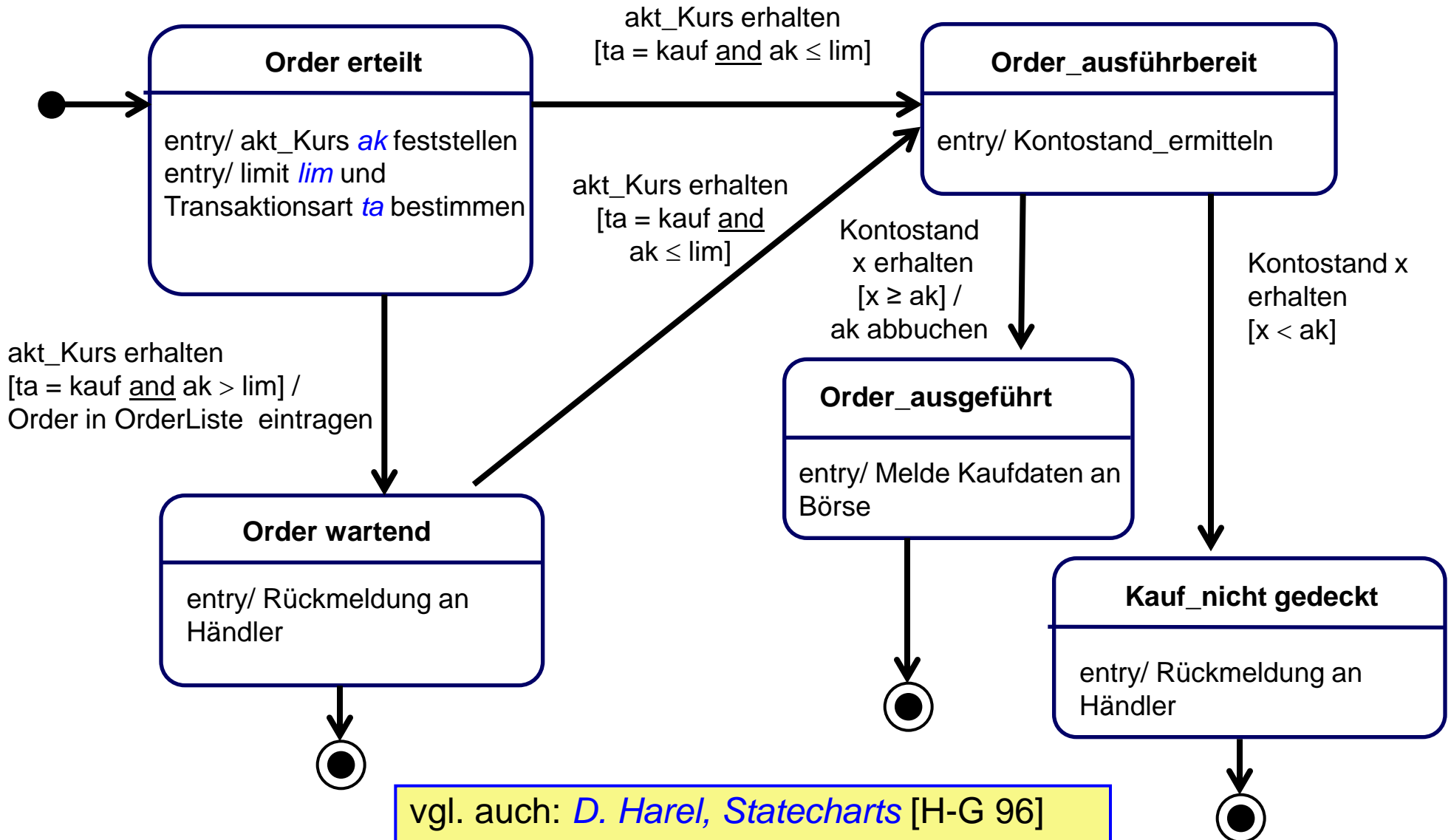
# Automaten-Ansatz: Beispiel: Zustands-Matrix

Ereignis Zustand	eingehängt	abgehoben	besetzte Nr. angew.	freie Nr. angew.	Pa. hat abgeh.
in Ruhe		wählbereit			
wählbereit	in Ruhe		besetzt	rufend	
besetzt	in Ruhe				
rufend	in Ruhe				verbunden
verbunden					

Rück- meldung
Kein Ton
Wählton
Besetzt-Ton
Ruf-Ton
Partn.-Ton

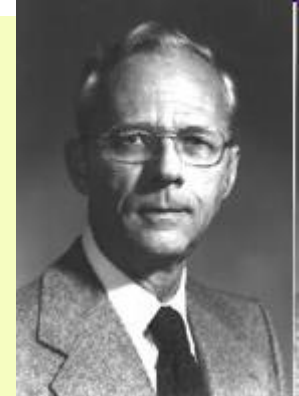
- **Zeilen:** markiert durch alle möglichen Zustände
- **Spalten:** markiert durch alle möglichen Ereignisse
- **Matrixelemente (Zellen):** markiert durch Folgezustände
- **Zusätzliche Spalte:** für System-Rückmeldungen

# Automaten-Ansatz: Beispiel: UML-Zustandsdiagramm



## **Mathematischer Ansatz: System dynamics**

- **Jay W. Forrester** (geb. 1918): Elektrotechniker; entwickelte in den 1950-er Jahren u.a. erste Computer-Kernspeicher
- 1956 Gründung der **System dynamics group** am MIT (Boston), später Zusammenarbeit (u.a.) mit **Gert von Kortzfleisch**
- **System dynamics**, Forresters Methode zur Modellierung dynamischer Systeme wurde u.a. zur Grundlage der Arbeit des **Club of Rome** und des bahnbrechenden Buches **Limits to Growth** (dt.: *Die Grenzen des Wachstums*) von 1972 [Mea 72]



Schwerpunkte der Methodik:

- Qualitative Untersuchung von geschlossenen **Wirkungsketten** (*feedback loops*) mit positiver bzw. negativer Rückkopplung.
- Darstellung und (quantitative) **Simulation** mit Hilfe von (System-) Flussdiagrammen, bestehend aus variablen Systemgrößen (*stocks*), Veränderungsraten (*flows*) und Hilfsgrößen.
- **Anwendungen**: vorwiegend in (volks- und betriebs-) wirtschaftlichen und sozialen Systemen.

## ***Mathematischer Ansatz (H. Bossel):*** **Systeme, Dynamik, Simulation**



**Hartmut Bossel:** geb. 1935;

- 1967 Ph.D. of Engineering, Univ. of Berkeley, CA
- 1973/74: Mitarbeiter am Weltmodell-2 des *Club of Rome*
- bis 1997 Prof. für *Umwelt-Systemanalyse* und Leiter des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung (CESR).

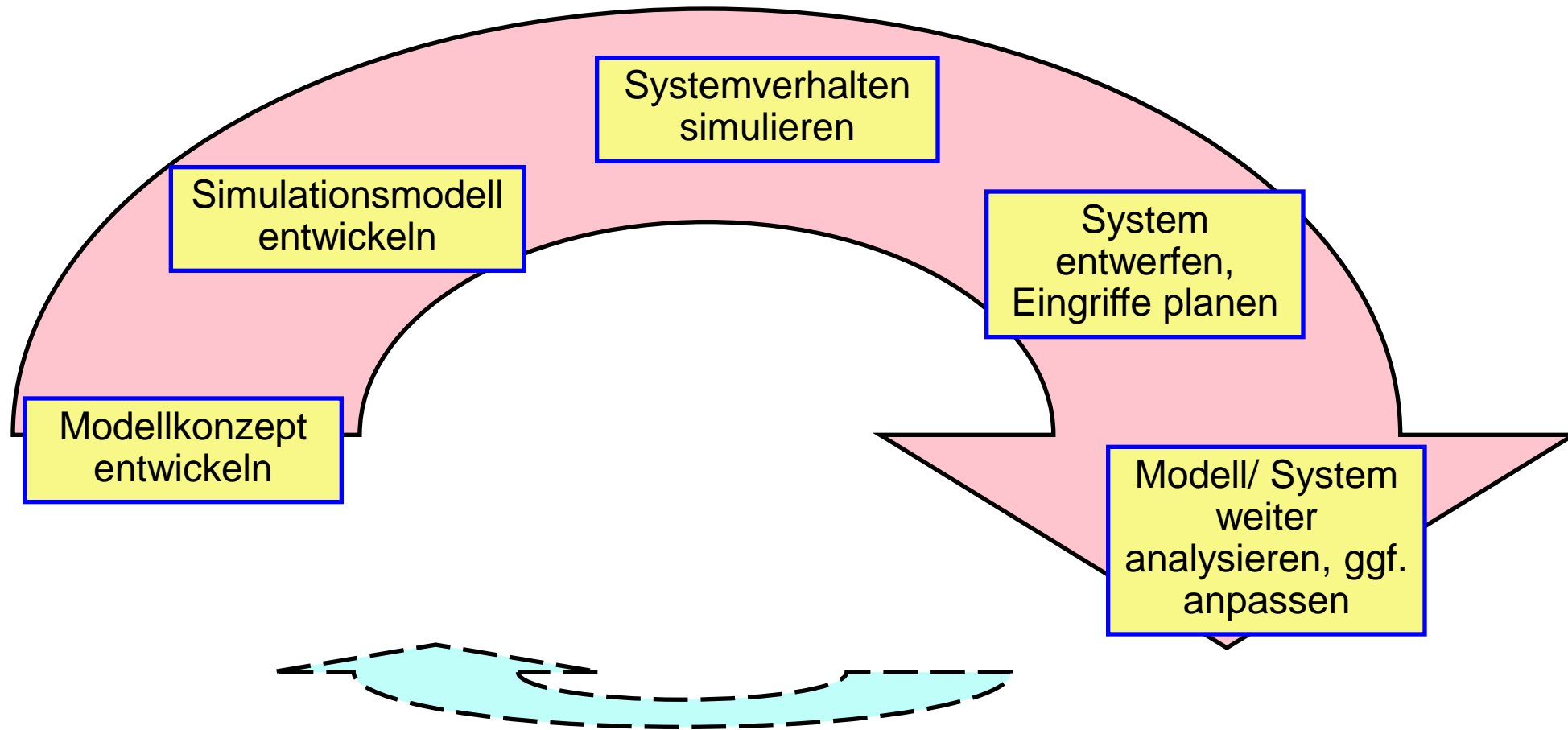
H. Bossel hat eine Methodik zur *mathematischen Modellierung und Simulation* komplexer dynamischer Systeme entwickelt, u.a. aufbauend auf Forrester's *System dynamics*.

Er hat zahlreiche prototypische *Anwendungen* seiner Methode analysiert, modelliert und die Simulationen in einem Kompendium namens *Systemzoo* dokumentiert.

Wichtige ***Veröffentlichungen:***

- Buch „Globale Wende“ [Bos 98]
- Buch „Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme“ [Bos 04]
- Systemzoo 1-3 [Bos 04a]

# Vorgehen zur Modellierung und Simulation



*nach H. Bossel [Bos 04]*

# Vorgehen bei der Modellbildung und Simulation

Nach H. Bossel durchläuft der Systemanalyse-Prozess die folgenden Schritte (vgl. [Bos 04]):

- **Modellkonzept entwickeln**

Maßgeblich dafür: Modellzweck, Abgrenzung, Systemkonzept ("Wortmodell"), Wirkungsstruktur, Qualitative Analyse

- **Simulationsmodell entwickeln**

Dimensionale Analyse (der Elemente der Wirkungsstruktur), Ermittlung funktionaler Beziehungen, Quantifizierung der Beziehungen, Darstellung im Simulationsdiagramm,

- **Systemverhalten simulieren**

Auswahl der Simulations-Software, Bestimmung von System- und Laufzeitparametern, Programmierung, Ergebnisdarstellung, Gültigkeitsprüfung

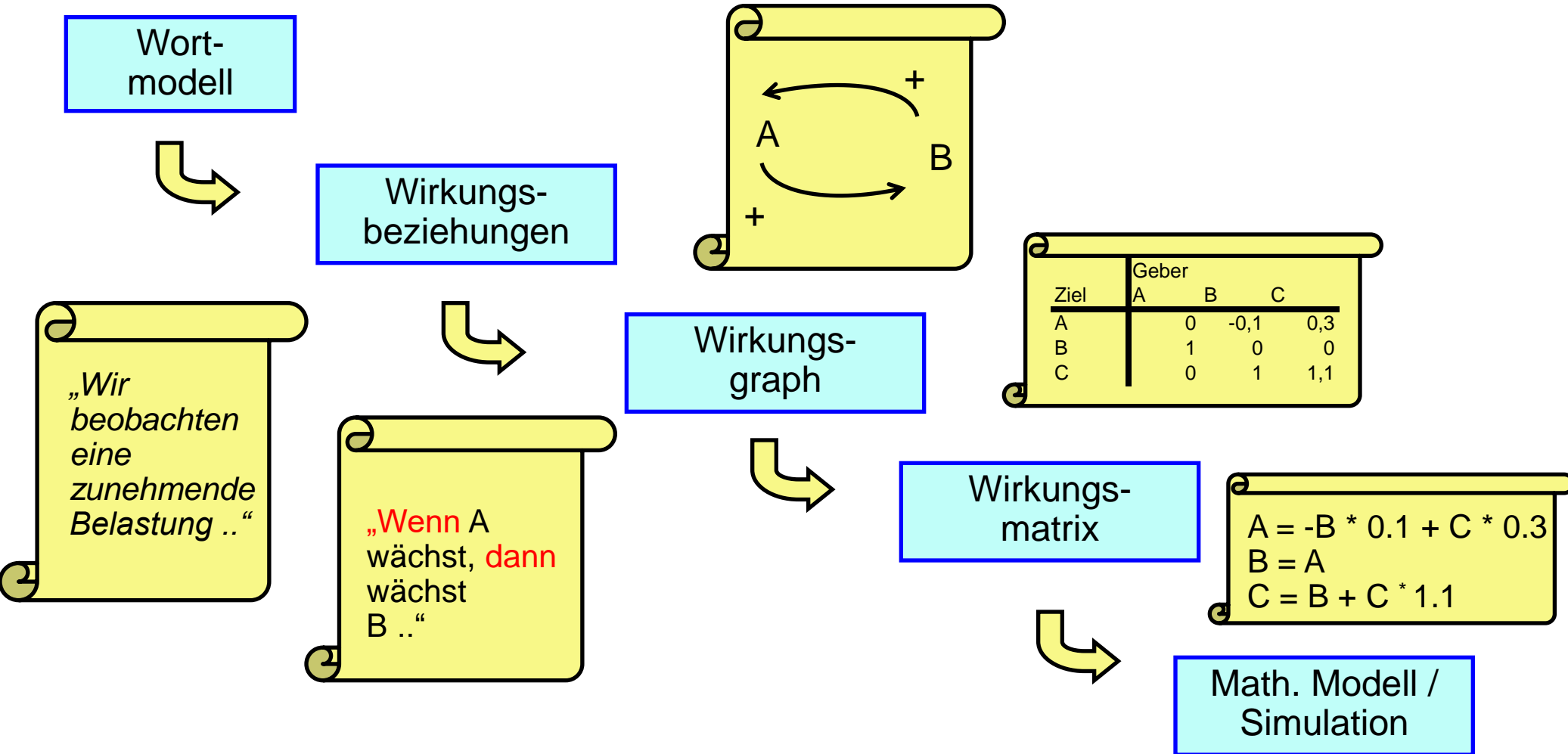
- **System entwerfen und Eingriffe planen**

Eingriffsplanung, Systemänderung und Optimierung, Stabilisierung durch Parameter- und Strukturänderungen

- **Modell und System weiter analysieren, ggf. anpassen**

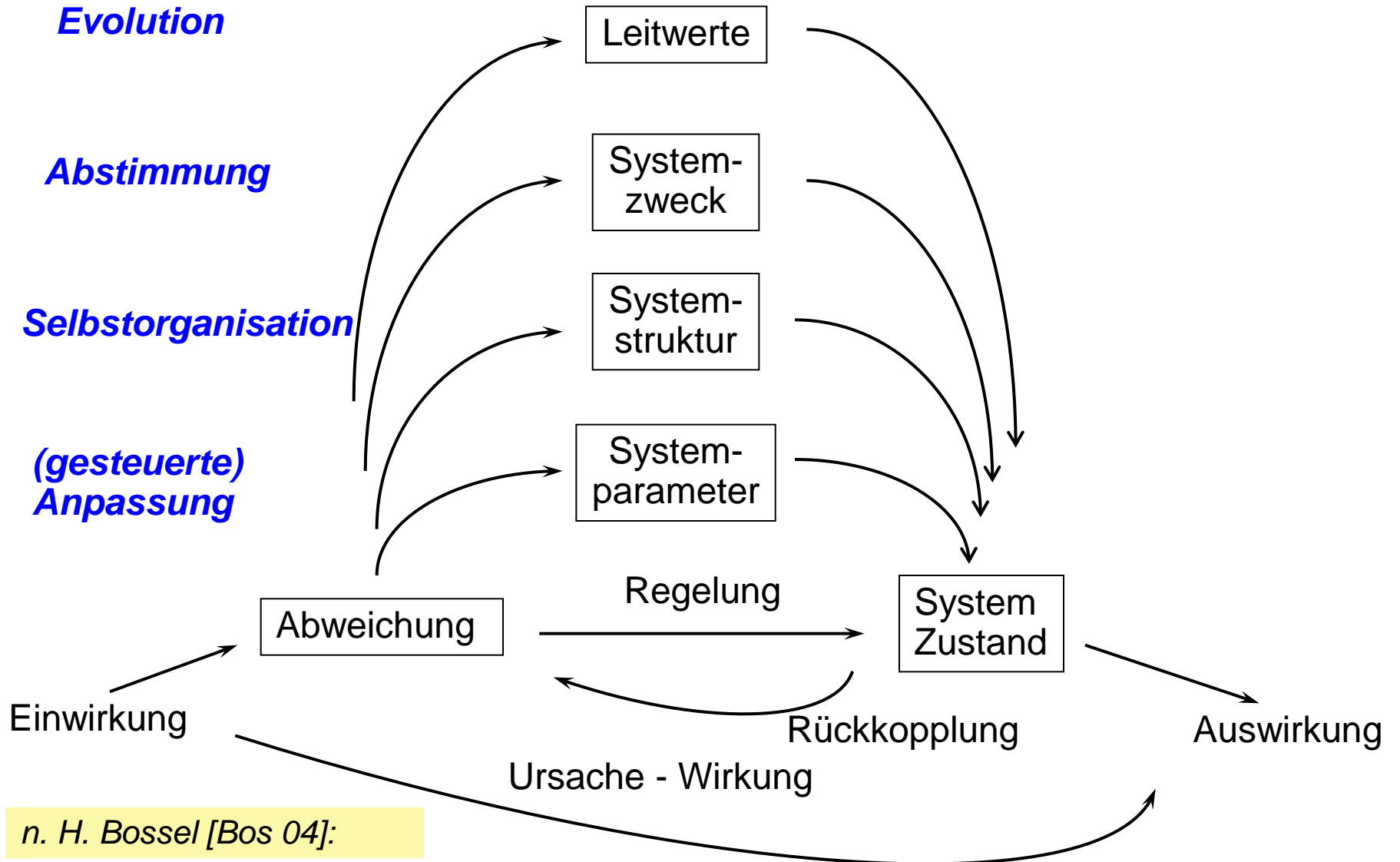
(u.a.) Ermittlung von Gleichgewichtspunkten, Linearisierung, Parameter-Variation

# Vom Wortmodell zur Simulation





# Verhalten komplexer Systeme



# Mechanismen des Wandels

## Systemveränderungen:

- von innen (aus dem System heraus) oder:
- von außen
- Mögliche *Auslöser* von Veränderungen:
  - .. *Attraktoren*: Ziel-Ausprägungen für wesentliche System-Eigenschaften (Bsp: Konzept „Stadt“ für an Grenzen stoßende Dorfbevölkerung)
  - .. *Distraktoren*: Ausprägungen von als unattraktiv empfundenen Systemeigenschaften (Bsp: Plattenbau-Siedlung als Wohnform)
- Arten von Systemübergängen: *Fluktuation* / *Bifurkation* / *Chaos*:
  - .. *Fluktuation*: stetiges, lineares oder annähernd lineares Systemverhalten
  - .. *Bifurkation*: Fortschreitung aus einer (oft instabilen) Krisensituationen in die eine oder andere mögliche Richtung („Herkules am Scheidewege“)
  - .. *Chaos*: Ungeordnetes, nicht-lineares, hochgradig instabiles Systemverhalten
- Mögliche Gründe für *notwendige grundsätzliche* Veränderungen:
  - .. *Systemverhalten* verletzt eigene Entwicklungs- und Überlebensbedingungen („System läuft aus dem Ruder“),
  - .. *Umwelteinflüsse* gefährden Fortexistenz des Systems in ggw. Form. (äuß. Bedrohung)

vgl. auch [Bos 98], S. 87 ff.

# Selbstorganisation und Zusammenwirken

**Selbstorganisation** in einem dynamischen System: Gestaltende und beschränkende Einflüsse gehen von den Elementen des Systems selbst aus.

- System verändert seine **Struktur** und **Funktion** aufgrund von neuen **Anforderungen**.
- Selbstorganisation ist **Grundphänomen des Universums** und findet im Besonderen in biologischen Systemen und Gemeinschaften statt.

**Zusammenwirken** (auch: **Kanalisation**, **Synchronisation**, **Synergie**, ..): Tendenz nichtlinearer, schwingender Systeme, Schwingungen verschiedener Frequenz zu synchronisieren.

- Zusammenwirken bewirkt **synergetische** Verstärkung durch Kooperation (Bsp. aus der Physik: Laser-Licht )

Vgl. dazu auch: **Autopoiese**,  
Arbeiten von Maturana & Varela  
„*Kognitive Biologie*“ [M-V 90]

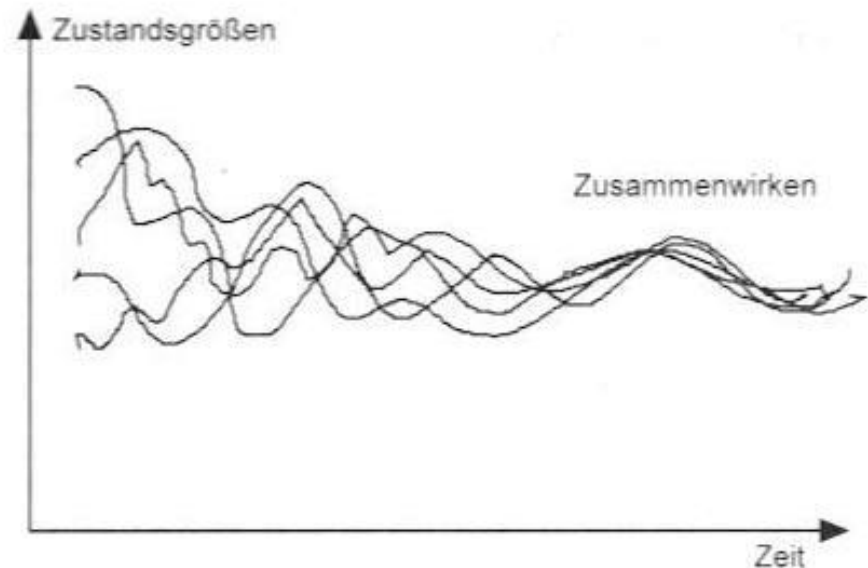


Abb. aus [Bos 98], S. 93

# Wirkungsgraphen

- Ein **Wirkungsgraph** ist ein *bi-partiter Graph*, bestehend aus *Zustandsgrößen* (Knoten) und *Wirkungsbeziehungen* (Kanten)
- **Wirkungsbeziehungen** verbinden eine *Ausgangs-Zustandsgröße* mit einer *Ziel-Zustandsgröße*. Sie werden durch "+" bzw. "-" markiert, um eine *verstärkende* bzw. *abschwächende* Wirkung zu signalisieren.
- Wirkungsbeziehungen können auch durch Faktoren quantifiziert werden.  
Bsp. "+ 1.2": Veränderung bei Ausgangs-Zustandsgröße wirkt sich um 20 % verstärkend auf Ziel-Zustandsgröße aus.

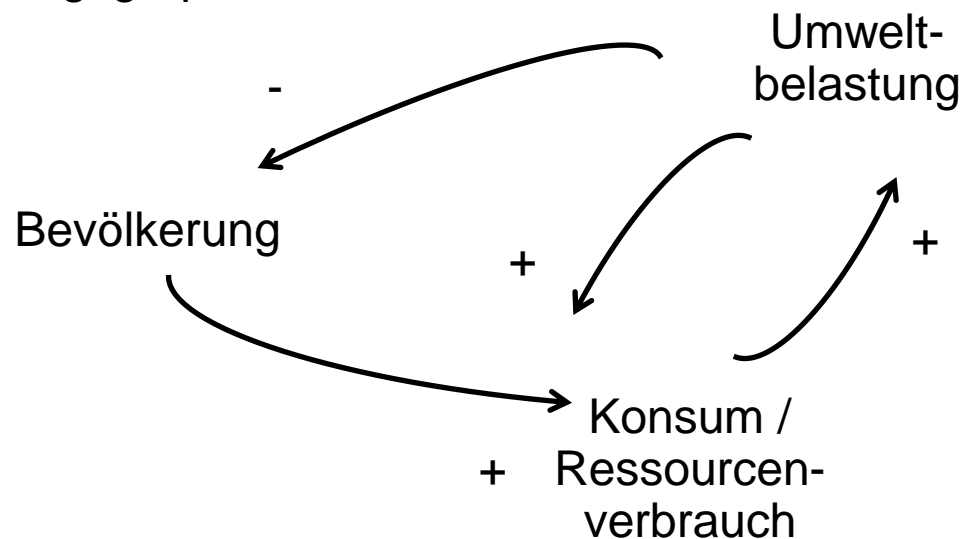
## Notation:

xyz	Zustandsgröße (Variable, <i>stock</i> )
$\xrightarrow{+}$	Wirkungsbeziehung ( <i>flow</i> ), verstärkend
$\xrightarrow{-}$	Wirkungsbeziehung ( <i>flow</i> ), abschwächend

# Wirkungsgraph: Beispiel

- Wirkungsbeziehungen: Wenn die *Bevölkerung* wächst, so wächst auch der Konsum und der *Ressourcenverbrauch*.
- Wenn der *Ressourcenverbrauch* wächst, so wächst auch die *Umweltbelastung*.
- Wenn die *Umweltbelastung* wächst, so wächst auch der *Ressourcenverbrauch*.
- Wenn die *Umweltbelastung* wächst, so vermindert sich die *Bevölkerungszahl*.

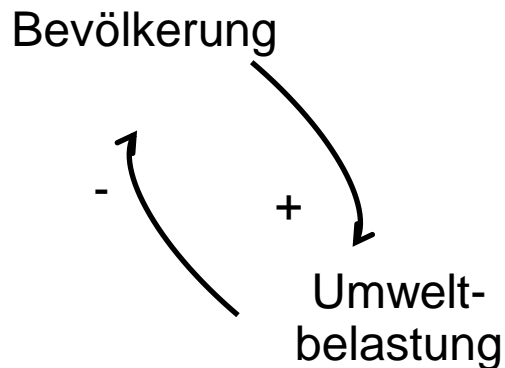
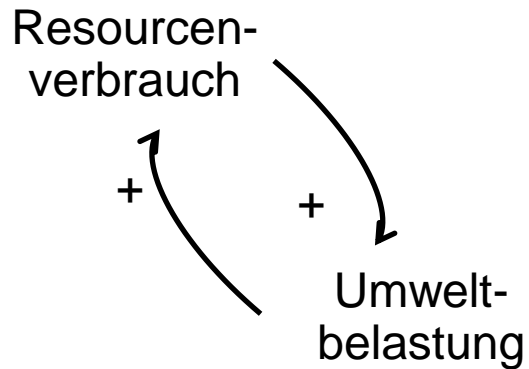
Wirkungsgraph:



(n. H. Bossel, [Bos 04])

# Rückkopplungen

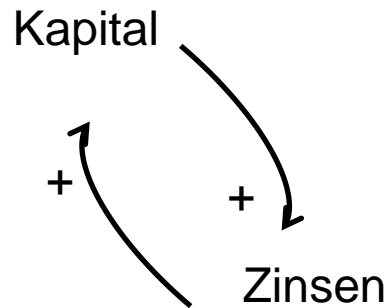
Beispiel aus dem Wirkungsgraph:



- Zwei (oder mehrere) Zustandsgrößen beeinflussen sich gegenseitig.
- Im Wirkungsgraph ist das an einem *Zyklus* erkennbar ("*Rückkopplungszyklus*").
- Sind die Wirkungsbeziehungen gleichgerichtet, so spricht man von *positiver Rückkopplung*, die Auswirkungen verstärken sich.
- Andernfalls spricht man von *negativer Rückkopplung*, die Auswirkungen kompensieren einander (zumindest teilweise).

# Spezialfall *Positive Rückkopplung*

## Bekanntes Beispiel:



Prinzip *Wachstum*:

$$x' = x + p \cdot x \quad p = \text{Wachstumsfaktor, z.B.}$$

$$p = 0.05, \text{ d.h. } 5\% \text{ Wachstum}$$

$$x' = x (1+p)$$

$$x'' = x' (1+p) = x (1+p)^2$$

...

$$x_n = x (1+p)^n \quad \text{d.h. } x \text{ wächst}$$

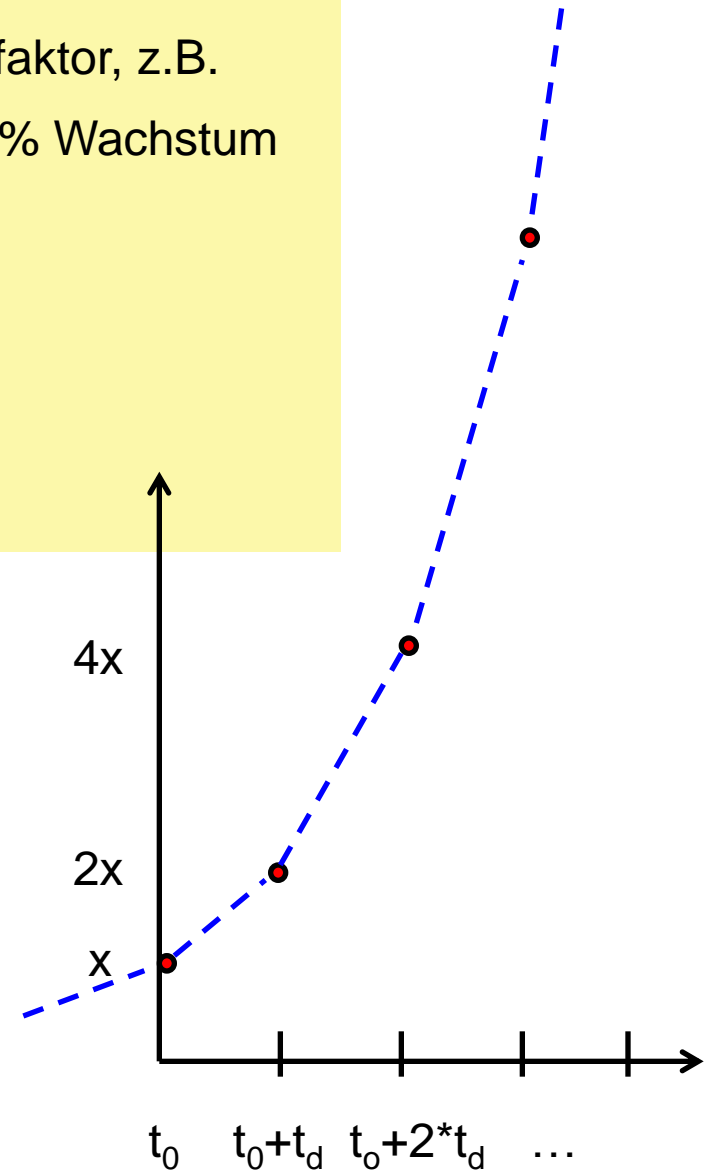
*exponentiell*

## Beispiele:

- 10% Wachstum:  $p = 0.10$   
 $\Rightarrow x_7 = 1.95$ , d.h. Verdoppelung in ca. 7 Jahren
- 7 % Wachstum:  $p = 0.07$   
 $\Rightarrow x_{10} = 1.97$ , d.h. Verdoppelung in ca. 10 Jahren

*Faustregel* (die sog. 70-er-Regel):

$$p \cdot t_{\text{doppel}} \cong 70$$



# Exponentielles Wachstum

## Exponentielles Wachstum

	%	0	1,00	2,00	3	3,5	5	7	10	20	50	100
Zeit												
0		100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100
1		100	101,00	102,00	103,00	103,50	105,00	107,00	110,00	120,00	150,00	<b>200</b>
2		100	102,01	104,04	106,09	107,12	110,25	114,49	121,00	144,00	<b>225,00</b>	400
3		100	103,03	106,12	109,27	110,87	115,76	122,50	133,10	<b>172,80</b>	337,50	800
4		100	104,06	108,24	112,55	114,75	121,55	131,08	146,41	207,36	506,25	1600
5		100	105,10	110,41	115,93	118,77	127,63	140,26	161,05	248,83	759,38	3200
6		100	106,15	112,62	119,41	122,93	134,01	150,07	177,16	298,60	1139,06	6400
7		100	107,21	114,87	122,99	127,23	140,71	160,58	<b>194,87</b>	358,32	1708,59	12800
8		100	108,29	117,17	126,68	131,68	147,75	171,82	214,36	429,98	2562,89	25600
9		100	109,37	119,51	130,48	136,29	155,13	183,85	235,79	515,98	3844,34	51200
10		100	110,46	121,90	134,39	141,06	162,89	<b>196,72</b>	259,37	619,17	5766,50	102400
11		100	111,57	124,34	138,42	146,00	171,03	210,49	285,31	743,01	8649,76	204800
12		100	112,68	126,82	142,58	151,11	179,59	225,22	313,84	891,61	12974,63	409600
13		100	113,81	129,36	146,85	156,40	188,56	240,98	345,23	1069,93	19461,95	819200
14		100	114,95	131,95	151,26	161,87	<b>197,99</b>	257,85	379,75	1283,92	29192,93	1638400
15		100	116,10	134,59	155,80	167,53	207,89	275,90	417,72	1540,70	43789,39	3276800
16		100	117,26	137,28	160,47	173,40	218,29	295,22	459,50	1848,84	65684,08	6553600
17		100	118,43	140,02	165,28	179,47	229,20	315,88	505,45	2218,61	98526,13	13107200
18		100	119,61	142,82	170,24	185,75	240,66	337,99	555,99	2662,33	147789,19	26214400
19		100	120,81	145,68	175,35	192,25	252,70	361,65	611,59	3194,80	221683,78	52428800
20		100	122,02	148,59	180,61	<b>198,98</b>	265,33	386,97	672,75	3833,76	332525,67	104857600



# Club of Rome

- Nicht-kommerzielle, nicht-staatliche Organisation, gegründet 1968 von Unternehmern, Beratern und Wissenschaftlern im Umfeld der OECD
- In der Folge einer initialen Konferenz in Rom Gründung der Gruppe "*Club of Rome*"
- **Ziele:** „*building a global society in the 21st century*“ und "*Global governance*"  
“*„Unser Ziel ist die gemeinsame Sorge und Verantwortung um bzw. für die Zukunft der Menschheit!“*“
- **Grenzen des Wachstums** ("*limits to growth*", 1972): vom Club of Rome beauftragte Studie zur Entwicklung verschiedener Szenarien und Prognosen für die zukünftige Weiterentwicklung der Welt.  
Autoren: *Dennis & Donella Meadows* u.a. ⇒ [Mea 72], [Mea 92].  
**Weltmodelle:** im Rahmen der Studie Anfang der 1970-er Jahre systematisch entwickelt auf der Basis von Forresters *System dynamics*
- Neuere Studie: *Jorgen Randers: 2052 - Der neue Bericht an den Club of Rome: Eine globale Prognose für die nächsten 40 Jahre* ⇒ [Ran 12].

# Bossels "Weltmodell"

- *World3* von *Meadows et al.*: geht auf Weltmodell *World2* von *Jay Forrester* vom MIT (1970) zurück.
- *Forresters* Methode "*System Dynamics*" (vgl. oben) hatte großen Einfluss auf die Umwelt- und Klimaforschung und auch auf den Ansatz von H. Bossel.
- *World 3*: sehr komplexes Modell mit 18 Zustandsgrößen, 60 Parametern, 52 Tabellenfunktionen, ca. 200 Gleichungen für Zwischengrößen und Veränderungsrate.
- Bossels "*Miniwelt*" ist einfacher und kleiner – weist aber qualitativ ähnliches Verhalten (und ähnliche Prognosen) auf.
- Danach wird die *Bevölkerung* (und parallel dazu die Industrie- und Nahrungsmittelproduktion) zunächst weiter ansteigen, erhöhte *Umweltbelastungen* nach sich ziehen und schließlich zu einem "Kippen" der Bevölkerungsentwicklung führen.

(vgl. [Bos 04], S. 109ff.)

# Literatur

- [Bos 98] H. Bossel: Globale Wende – Wege zu einem gesellschaftlichen und ökonomischen Strukturwandel, Droemer-Knauer 1998:
- [Bos 04] H. Bossel, Hartmut (2004): Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Books on Demand, Norderstedt/Germany, 2004
- [Bos 04a] H. Bossel: Systemzoo 1-3 Books on Demand, Norderstedt/Germany, 2004
- [B-D 04] B. Bruegge, A.H. Dutoit: Object-oriented Software Engineering 2nd Ed., Prentice Hall 2004. Dt. Ausgabe: Objektorientierte Softwaretechnik, Pearson Studium 2004
- [Dör 04] D. Dörner: *Die Logik des Misslingens – Strategisches Denken in komplexen Situationen*. 2. Aufl., Reinbek/Hamburg 2004
- [For 77] J. W. Forrester: *Industrial dynamics*. 9. Aufl., Cambridge 1977
- [Fow 04] M. Fowler: UML konzentriert. Addison-Wesley eBook 2004
- [H-G 96] D. Harel, E. Gery: Executable object modelling with statecharts. Proc. 18th Int'l. Conf. on Software Eng., Berlin, pp. 246-257, IEEE 1996
- [H-K 99] M. Hitz, G. Kappel: UML@Work. dpunkt.verlag 1999
- [H-M 08] W. Hesse, H.C. Mayr: Modellierung in der Softwaretechnik: eine Bestandsaufnahme Informatik-Spektrum 31.5, pp. 377-393 (2008)
- [K-K 05] U. Kastens, H. Kleine Büning: Modellierung – Grundlagen und formale Methoden, Hanser 2005

## Literatur (Forts.)

- [Mea 72] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens: The limits to growth. Potomac Ass., Washington D.C. 1972
- [Mea 92] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers: Beyond the limits. Chelsea Green, Post Mills VT 1992
- [M-V 90] H. R. Maturana, F.J. Varela: *Der Baum der Erkenntnis: Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens*. Goldmann Taschenbuch, 1990
- [Ran 12] J. Randers: 2052. Der neue Bericht an den Club of Rome. Oekom Verlag 2012
- [Rei 10] W. Reisig: *Petrinetze - Modellierung, Analyse, Fallstudien*. Vieweg-Teubner 2010
- [UML 01] OMG Unified Modelling Language Specification. Version 1.5 (2001).  
<http://www.rational.com/uml/resources/documentation>
- [UML 05] OMG Unified Modelling Language: Superstructure, Version 2.0. Object Management Group 2005 .
- [Ves 01] F. Vester: Die Kunst vernetzt zu denken, dtv 2001