

**Vorlesung/Seminar: Modellierung dynamischer und adaptiver Systeme, Wintersemester 2016/17**

# **Kap. 1: Systeme und Systemtheorie - Grundlagen**

- **Grundbegriffe**
- **Systeme und Systemtheorie, kurze Historie**
- **Klassifizierung von Systemen, Beispiele von Systemen**
- **Informationssysteme**
- **Systemanalyse**
- **Systeme und Subsysteme**
- **Systemstruktur**
- **Mensch-Maschine-Systeme**
- **Dynamische und adaptive Systeme**
- **Literatur**

# Systeme

"System" (griech.: σύστημα) = "Zusammengesetztes"

**System (1, n.DIN\*):** abgegrenzte **Anordnung** von aufeinander einwirkenden **Gebilden**.

Solche Gebilde können sowohl Gegenstände als auch Denkmethode und deren Ergebnisse (z. B. Organisationsformen, mathematische Methoden, Programmiersprachen) sein. Diese Anordnung wird durch eine Hüllfläche von ihrer **Umgebung** abgegrenzt oder abgegrenzt gedacht.

**System (2):** Ausschnitt aus der realen oder gedanklichen Welt, bestehend aus Gegenständen - den **Systemelementen** - (z. B. Menschen, Materialien, Maschinen oder anderen Produkten) und darauf vorhandenen **Strukturen** (z. B. deren Aufbau aus Teileinheiten und deren Beziehungen untereinander). (n. [HKL 84])

\* DIN 44300: Informationsverarbeitung -Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin 1982

[HKL 84] W. Hesse, H. Keutgen, A. L. Luft, D. Rombach: Begriffe der Softwaretechnik - Vorschlag zur Terminologie, Informatik-Spektrum 7, pp. 200-213 (1984)

## System: Weitere Definitionen

**System (3):** a set of *objects*, together with *relationships* between the objects and between their *attributes*

*(Hall and Fagen 1956\*)*.

Ein **System (4)** ist durch seinen *Systemzweck* (Funktion), seine *Systemelemente* und *Wirkungsverknüpfungen* (Wirkungsstruktur) sowie seine *Systemintegrität* gekennzeichnet

*(Bossel [Bos 94])*

**System (5):** komplexer Gegenstand, bestehend aus einer Menge von *Komponenten* (seiner Komposition), einer Menge von damit verbundenen *Elementen* (seiner Umgebung) und eine Menge von *Beziehungen* zwischen diesen (seiner Struktur).

*(Bunge [Bun 79] S.4)*

\* A. D. Hall and R. E. Fagen: Definition of System. General Systems 1 (1956), 18

# Systemtheorie



= interdisziplinärer Wissenschaftszweig, der sich mit *allgemeinen Struktur- und Funktionsprinzipien* von Systemen befasst und dabei von den spezifischen Eigenschaften ihrer Elemente und Beziehungen abstrahiert.

⇒ *Mario Bunge (geb. 1919)*: Eine Welt von Systemen [Bun 79]

⇒ *Ludwig von Bertalanffy (1901-1972)*: Zu einer allgemeinen Systemlehre, Biologia Generalis. 195, MIT Press/Wiley & Sons, New York/Cambridge 1948, S. 114–129.

- Systeme (und ihre Abgrenzungen) sind nicht natur- oder anderweitig vorgegeben, sondern werden als solche durch die *Intention* und *Konzeption* von Menschen (den "System-Beobachtern") festgelegt.
- Dazu gehört die Feststellung von sog. "*emergenten*" (oder "*systemischen*") Eigenschaften, die für das System als Ganzes, nicht aber schon für seine einzelnen Komponenten charakteristisch sind.

## Erweiterter (biologischer) Systembegriff

(n. *Ludwig von Bertalanffy*, um 1950):

**System** = Zusammenhang von Funktionseinheiten und Interaktionen, die sich von ihrer Umwelt abgrenzen, die wiederum aus anderen Interaktions-Zusammenhängen besteht.

Damit lassen sich Systeme als sich *selbst organisierende* Funktionseinheiten verstehen, die ihr Weiterfunktionieren selbst organisieren bzw. produzieren, interagieren und sich in spezifischer Weise von ihrer Umwelt abheben, etwa durch Ausprägung besonderer Eigenschaften  
( $\Rightarrow$  *organisierte Komplexität*, später: *Autopoiesis*).

*Beispiel*: Abgelegene Inseln oder Inselgruppen, z.B. *Galapagos*. Die Tier- und Pflanzenwelt war dort einzigartig, *endemische* (allein dort vorhandene) Arten besonders häufig. Seefahrer und (heute) Touristen stören das System, z.B. durch Einfuhr systemfremder Arten.

# Systemtheorie: kurze Historie

- ca. 1950: **Allgemeine Systemtheorie** (Ludwig von Bertalanffy): Themen: *offene* (vorwiegend biologische) Systeme, *organisierte Komplexität*
- ca. 1950: **Kybernetik** (Norbert Wiener, William Ross Ashby): Systemtheorie mit Schwerpunkt auf *Regelung* und *Steuerung*. Beruht weitgehend auf mathematisch-physikalischen Grundlagen und betrachtet z.B. *Signale*, ihre Übertragung, Wirkung und Fähigkeit zur Steuerung von Prozessen.
- ca. 1970: **Katastrophentheorie** (Erik Christopher Zeeman, engl. Mathematiker ): betrachtet sprunghafte, unstetige Veränderungen kontinuierlicher dynamischer Systeme
- ca. 1975: **Autopoiesis** (Humberto Maturana, Francisco Varela): bezieht sich auf biologische Systeme und deren Fähigkeit zur Selbsterschaffung, -erhaltung, -organisation sowie Regeneration



## Systemtheorie: Historie (Forts.)

- ca. 1980 **Chaostheorie**: betrachtet nichtlineare dynamische Systeme, mit (u.a.) Verzweigungen, Attraktoren und unvorhersagbaren Veränderungen ("*deterministisches Chaos*"). Bsp.: Turbulenzen, Mehrfach-Pendel, Schmetterlings-Effekt
- ca. 1980 **Soziologische Systemtheorie**: (Niklas Luhmann) überträgt systemtheoretischen Ansatz auf soziale Systeme.  
Wichtige Begriffe: Struktur und Funktion, Handlung, Funktionalismus, Systemerhaltung;  
Zentraler Mechanismus: *Kommunikation* über *Sprache* und *generalisierte (Kommuni-) Medien* (Geld, Macht, Liebe u.a.)
- ca. 1990 **Selbstorganisation**: (Stuart Kauffman, „At home in the Universe“): betrachtet Prozesse, bei denen höhere strukturelle Ordnungen ohne erkennbare äußere steuernde Elemente erreicht werden.
- ca. 1990 **Komplexe adaptive Systeme** (John H. Holland u.a., Santa Fe Institute): beruhen auf Emergenz, Anpassung, Rückkopplung, Selbstorganisation (vgl. unten)

# Klassen von Systemen

**Klassifizierung** kann unter sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen, z.B.:

- statisch/dynamisch, aktiv/passiv, offen/geschlossen
- Systemgröße
- lebend (natürlich) vs. artifiziell
- unterliegender Bereich

## Eine grobe Klassifizierung:

- Systeme in der **Mathematik** und in den **Naturwissenschaften** (Astronomie, Physik, Chemie, Biologie, ..)
- **Technische** Systeme  
. u.a. Informatik-Systeme (z.B. Datenbank- oder Betriebssysteme)
- **Soziale** Systeme (in Politik, in Kommunen, Nachbarschaften etc.)
- **Organisatorische** Systeme (Unternehmen + Personal + Infrastruktur + Abläufe ...)
- **Volks-** und **betriebswirtschaftliche** Systeme



# Klassifizierung von Systemen

## *statisch/dynamisch*

- ***Dynamisches System***: System, bei dem das zeitliche Verhalten des Systembereichs (d.h. dessen Zustände und Zustandsveränderungen) Teil der Systembetrachtung ist.

Gegenteil: *Statisches System*

## *offen/geschlossen*

- ***Offenes System***: System, dessen Zustand mit dem seiner Systemumgebung (aktiv oder passiv) verknüpft ist.

Gegenteil: *Geschlossenes System*

## *aktiv/passiv*

- ***Aktives System***: System, das (mindestens) einen zustandsverändernden Prozess als Teil seiner Beschreibung enthält.

Gegenteil: *Passives System*

# Beispiele von Systemen

- **Sonnensystem:** naturwissenschaftlich (Astronomie);  
*dynamisch*, vorwiegend als *geschlossen* und *aktiv* oder *passiv* betrachtet
- **Ökosystem:** naturwissenschaftlich (Biologie);  
*dynamisch*, *offen*, *aktiv*
- **Wirtschaftssystem:** sozial (Wirtschaftswissenschaften);  
*dynamisch*, *offen*, *aktiv*
- **Lebewesen:** naturwissenschaftlich (Biologie, Medizin);  
*dynamisch*, (vorwiegend) *geschlossen*, *aktiv*
- **Compiler:** technisch (Informatik);  
*dynamisch*, (vorwiegend) *geschlossen*, *passiv*
- **Tonsystem:** naturwissenschaftlich/technisch (Physik, Musik)  
(vorwiegend) *statisch*, *geschlossen*, *passiv*
- **Sudoku:** technisch (Mathematik);  
*statisch*, *geschlossen*, *passiv*

## Beispiel eines komplexen Systems

- *System*: Der menschliche Körper
- *Systemgrenze*: Haut
- *Komponenten*: Glieder, Organe, Blutgefäße, Nerven, ...
- *Beziehungen*: z.B. zw. Knochen und Gelenk, Herz und Blutadern, ...
- *Systemische Eigenschaften*: Stoffwechsel, Fortpflanzung, Bewusstsein, ..



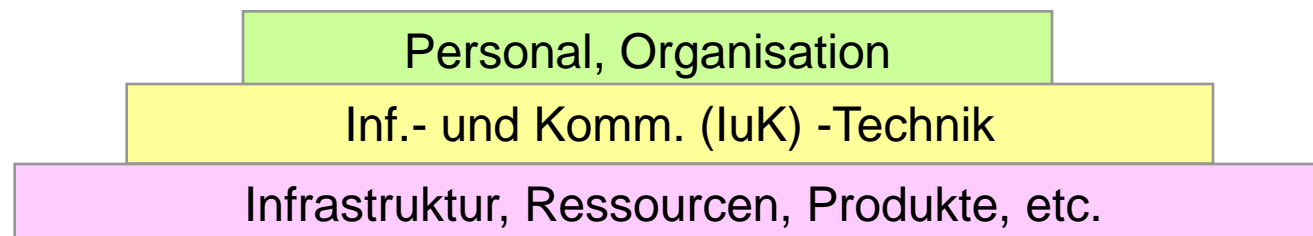
# Weitere Beispiele von Systemen

## Computer:

- **Komponenten:** Hardware- und Software-Bausteine;
  - **Systemische Eigenschaften:** Funktionen zur Datenspeicherung und -verarbeitung, die nur der Computer als Ganzes erfüllen kann.
- Technisches System

## Unternehmen:

- **Elemente:** interagierende Akteure und Ressourcen: Menschen, Material, Rohstoffe, Verfahren, ..
  - **Systemische Eigenschaften:** Fähigkeit, als Ganzes zu agieren, zu produzieren, zu prosperieren, Gewinn/Verlust zu machen.
- Gemischtes System mit sozialen, wirtschaftlichen und technischen Komponenten

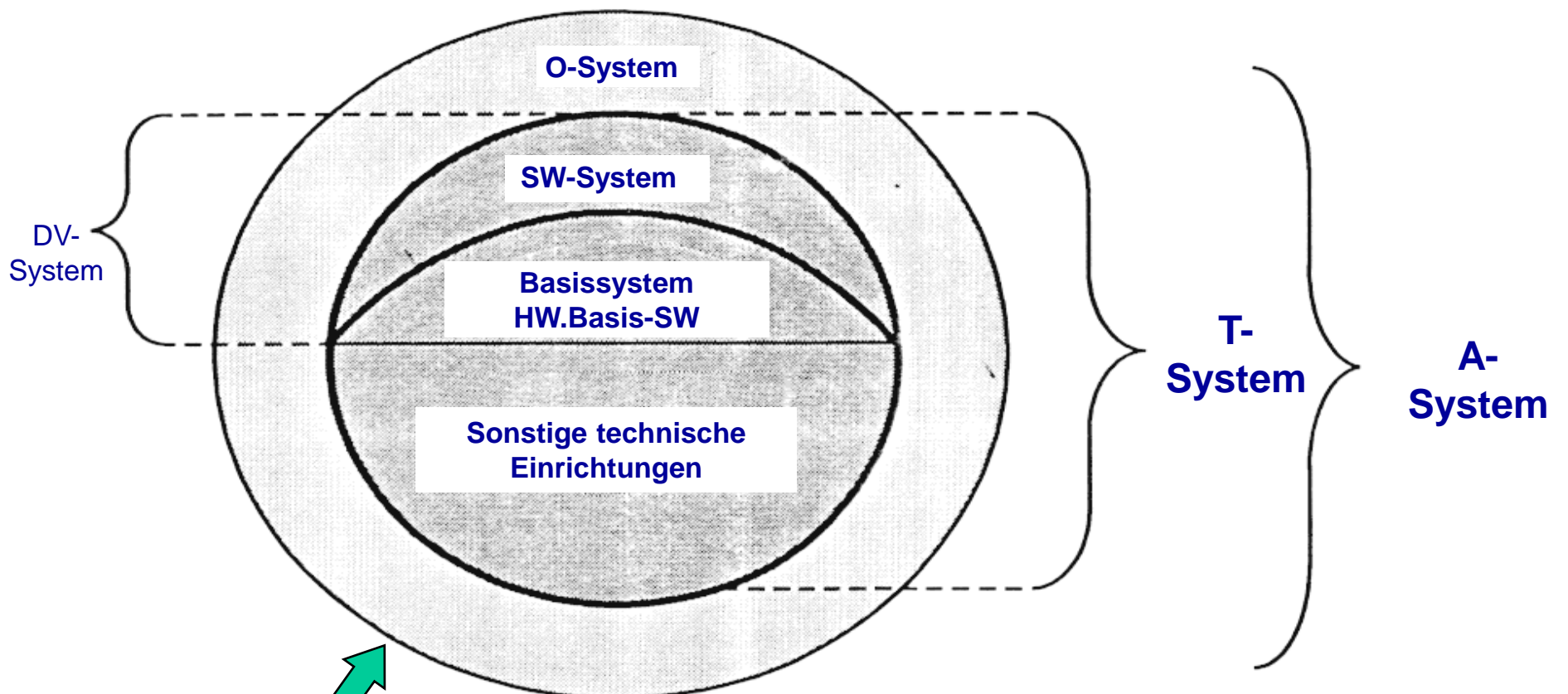


# Informationssysteme

**Informationssystem:** System, das die Deckung von Informationsbedarf zur Aufgabe hat. Dazu gehört die *Beschaffung, Erzeugung, Verarbeitung, Speicherung, Verteilung* und *Weitergabe* von *Daten* bzw. *Informationen*.

- Informationssysteme gehören zu den so genannten *sozio-technischen* (genauer: *Mensch / Aufgabe / Technik-*) Systemen.
- Oft werden sie auch als *Informations-* und *Kommunikations-Systeme* (*IuK-Systeme*) bezeichnet.
- IuK-Systeme nehmen in vielen Unternehmen eine zentrale Stellung ein und sind wesentlicher Gegenstand der *Wirtschaftsinformatik*.

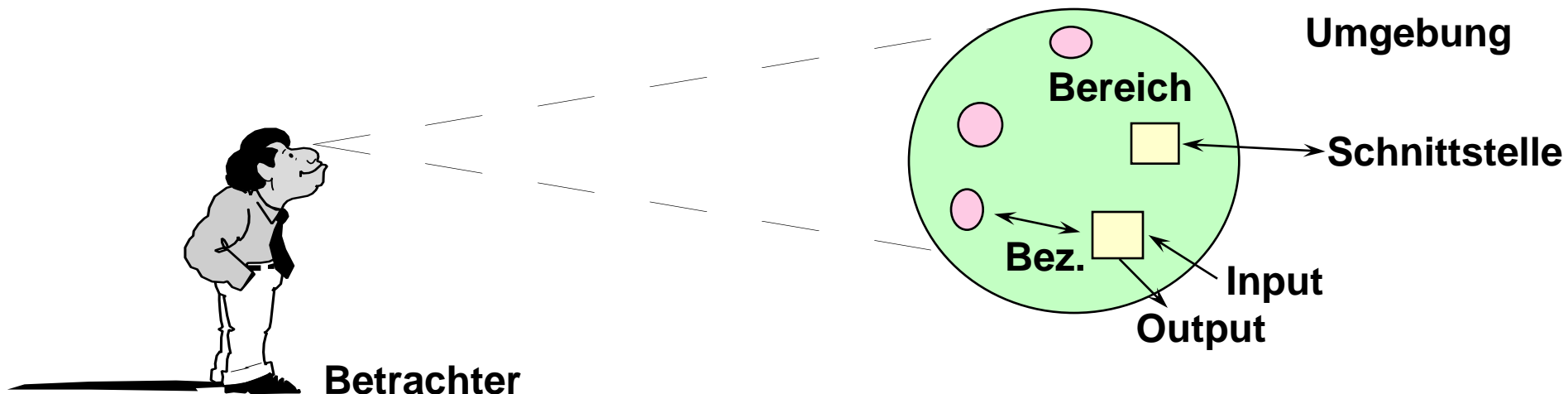
# Systeme im IT-Umfeld



System-Umgebung  
(Nutzer)

- A-System:** Anwendungssystem
- O-System:** Organisatorisches System
- T-System:** Technisches System
- DV-System:** Datenverarbeitungs-System
- SW-System:** Software-System

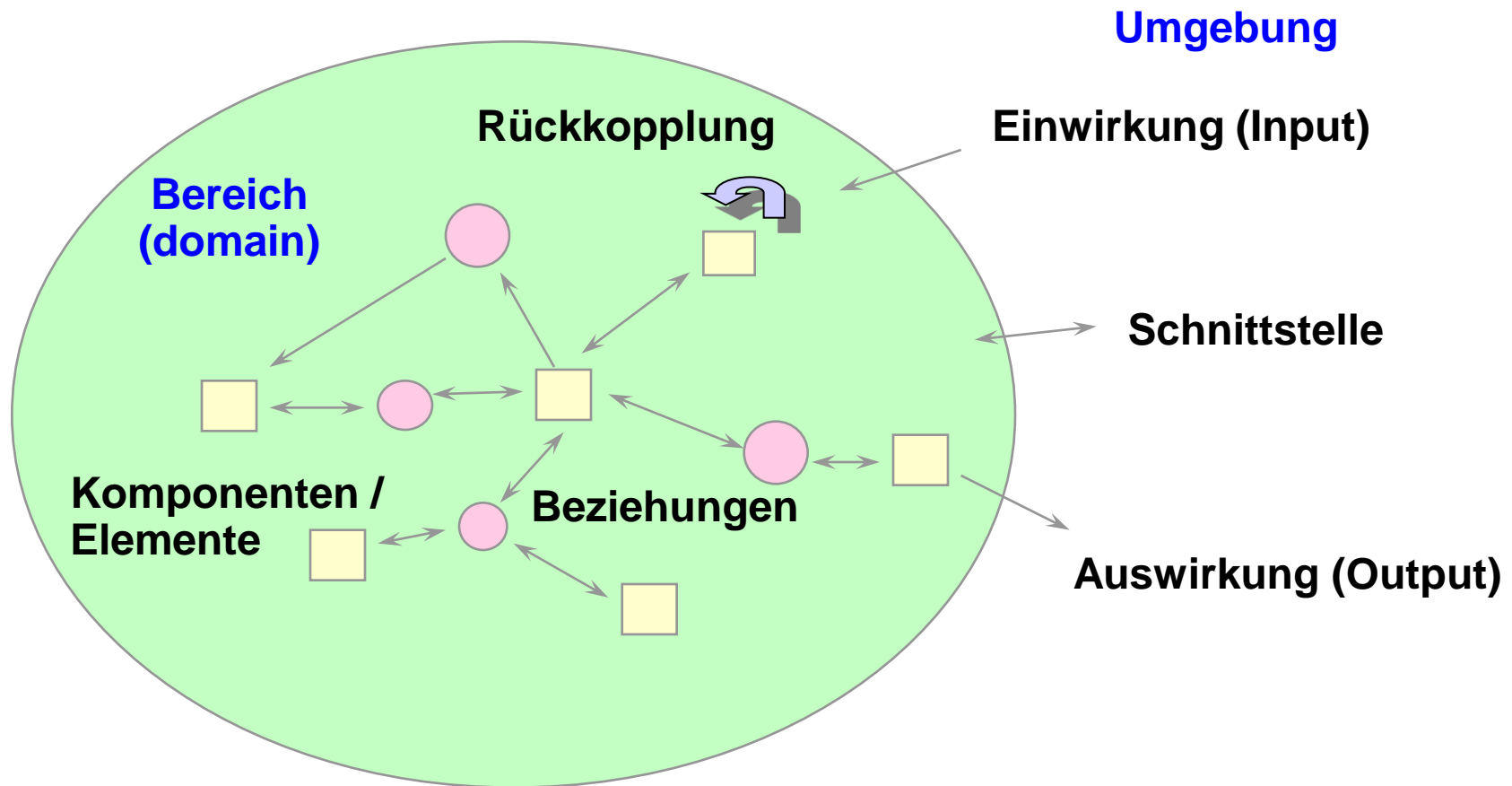
# Systemanalyse



... hat die Definition, Abgrenzung, Untersuchung und Modellierung von Systemen zum Thema und ...

- geht von einem unterliegenden *Systembereich* (**system domain**) aus,
- identifiziert darin eine Menge von **System-Komponenten**,
- untersucht die **Beziehungen** der Komponenten untereinander,
- betrachtet die **Umgebung** und die **Schnittstellen** zu dieser,
- identifiziert **die emergenten** System-Eigenschaften,
- ist immer von der speziellen *Sicht des Betrachters* (**Analysators**) abhängig.

# Systeme und ihre Bestandteile





# Perspektiven bei der Betrachtung von Informationssystemen

- ***Daten-Perspektive (data perspective):***

umfasst die Daten- und Speicherstrukturen, mit deren Hilfe das System seine Leistungen erbringt

- ***Funktionale Perspektive (process perspective):***

umfasst die Funktionen, die das System ausführen / unterstützen soll

- ***Verhaltens-Perspektive (behaviour perspective):***

umfasst die zeitabhängigen Aspekte der Systemabläufe und das zeitliche Zusammenwirken der Systemkomponenten

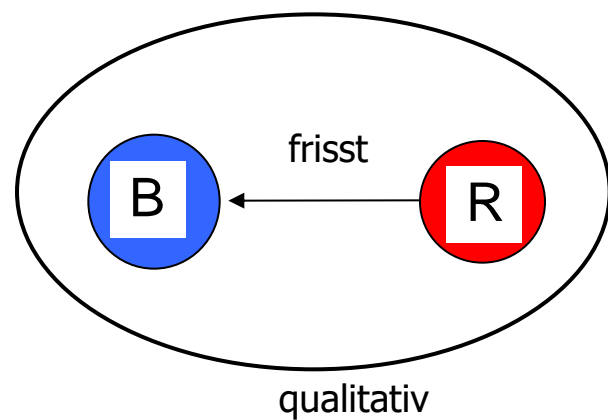
## Dynamische Systeme: Besonderheiten

- Bei der Betrachtung dynamischer Systeme spielt die *Zeit* eine hervorragende Rolle
- *Prozesse, Abläufe, Zustände* und deren *Änderungen* sind wesentliche Gegenstände der (dynamischen) Systemanalyse.
- Die Zeit kann
  - . *explizit* - z.B. als unabhängige Variable  $t$  einer mathematischen Funktion  $f(t)$  oder
  - . *implizit* - z.B. über kausale oder temporäre (vorher- / nachher-) Beziehungen modelliert werden.
- Die Betrachtung von zeitlichen Verläufen kann (explizit) *diskret* oder *kontinuierlich* erfolgen. Im diskreten Fall z.B. durch eine Funktion über natürlichen oder rationalen Zahlen, kontinuierlich über reell-wertige Funktionen und Differenzialgleichungen.

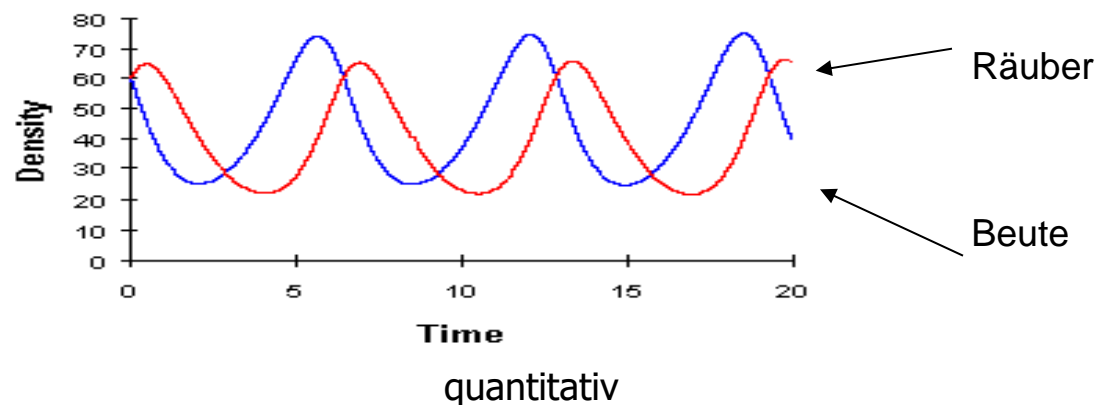
# Systemanalyse in Biologie und Ökologie

- In der *Biologie* betrachtet man Organismen als Systeme.
- In der *Ökologie* untersucht man Populationen aus vielen Individuen - ggf. auch unterschiedlicher Art - und deren Entwicklung und Wechselwirkungen.

## Beispiel: Beziehungen von Räuber- und Beute-Populationen



Volterra-Lotka-Modell



Dynamisches Modell

# Systemstruktur

**(1) Hierarchie:** Es gibt eine ausgezeichnete (Ordnungs-) Beziehung zwischen den Komponenten / Subsystemen *sub* ("gehört zu" / "ist untergeordnet" (o.ä.), die eine *baumartige* Systemstruktur etabliert ("*Monohierarchie*").

Bsp.: Himmelskörper (Sonne, Planeten, Monde, ..), Unternehmen, Militär, Taxonomie in der Biologie, Client-Server-Systeme

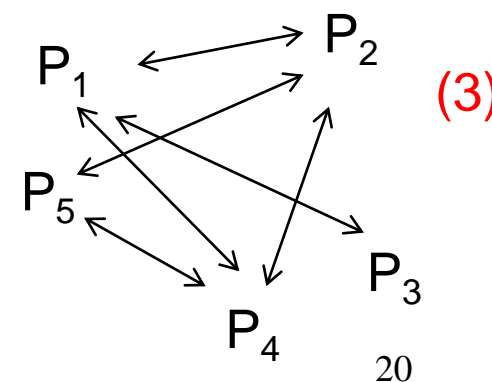
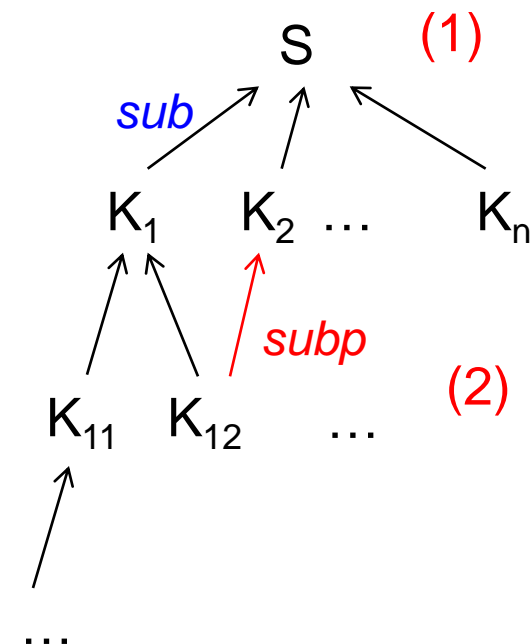
**(2) Quasi-Hierarchie:** wie oben, aber zusätzliche Ordnungsbeziehungen *subp* etablieren die Form eines *azyklischen gerichteten* Graphen ("*Polyhierarchie*").

Bsp.: Ahnen (Vorfahren, Stammbaum), zeitliche Ereignisse (vorher/nachher)

**(3) Netzstruktur:** Alle Komponenten sind gleichrangig, d.h. es gibt keine Ordnungsstruktur

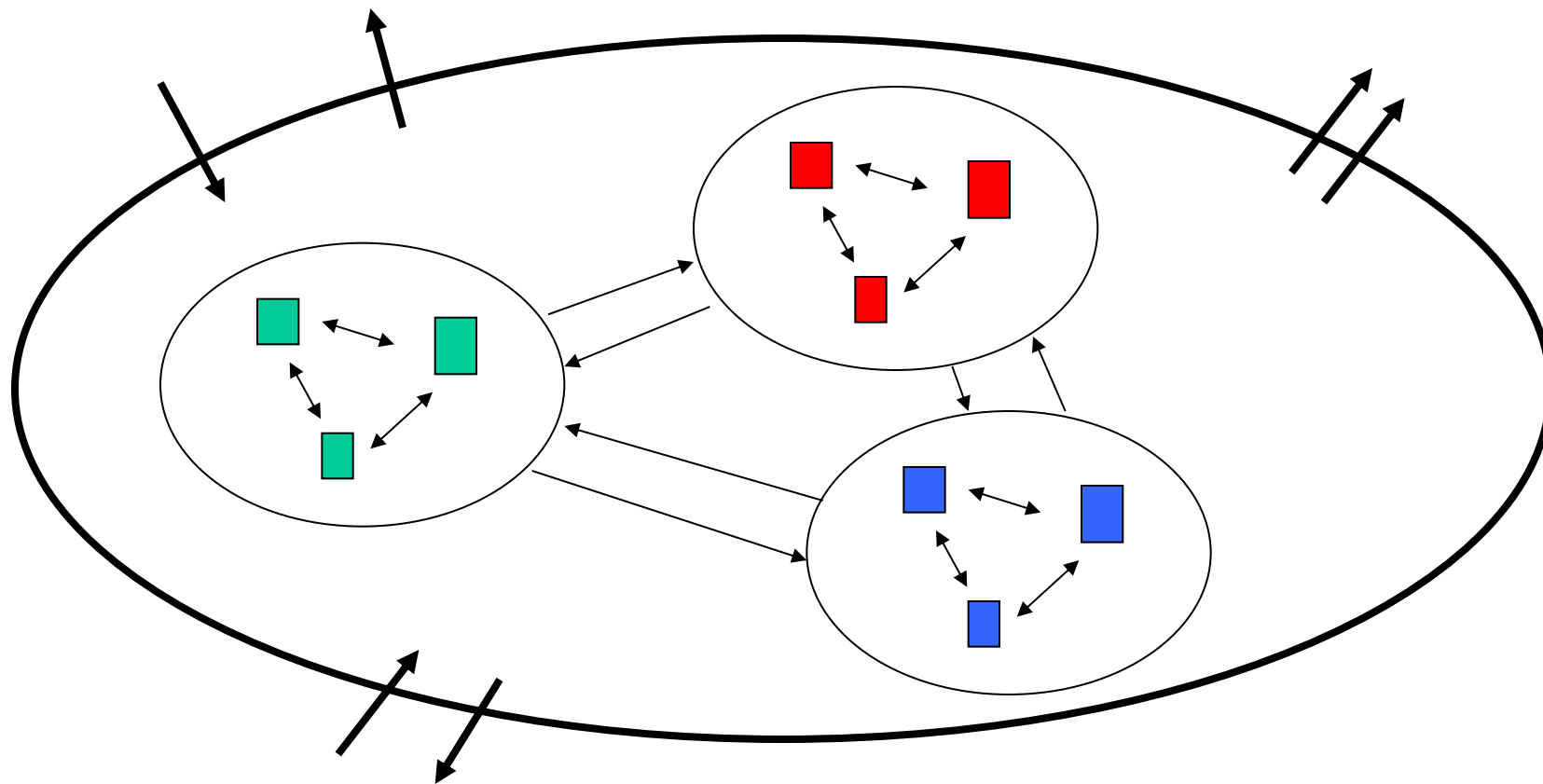
Bsp.: Sandhaufen, Internet, Peer to peer-Netze, relationale Datenbanken

Lehre vom Verhältnis vom *Ganzen* zu seinen *Teilen*:  
**Mereologie** (Teilgebiet der angewandten Logik)



# Subsysteme

- Ein System kann in *Subsysteme* unterteilt werden. Diese ..
- .. sind selbst Systeme im o.g. Sinne
- .. haben einen Teil-Systembereich (Untermenge der Komponenten)
- .. haben i.a. unterschiedliche systemische Eigenschaften



# Systeme und Subsysteme: Beispiele

- Das ökologische System einer *Insel* oder *Inselgruppe*
- Die *Pflanzen, Tiere* und ihre *Arten* als Subsysteme mit ihren Erhaltungs- und Fortpflanzungsprozessen sowie ihren (Art-internen und externen) Interaktionen, z.B. Räuber-/Beute-Zyklen

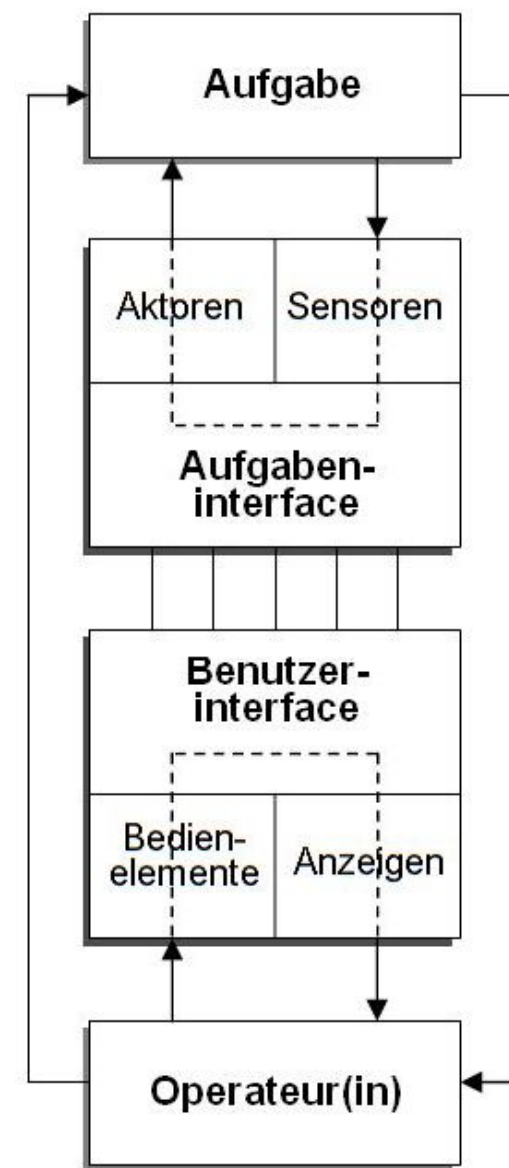
- Das Unternehmen *Universität* als Ganzes (gemischt),
- Die *Bibliothek* als Univ.-Subsystem mit Bibliotheks-Personal, Buchbeständen, organisatorischen Abläufen (gemischt)
- Regale, Buchbestände, Karteikästen (technisch)
- *BIBS*: Bibliotheks-Verwaltungssystem (techn.-organisatorisch)

- Das Unternehmen *ÖVU* (Öff. Verkehrsunternehmen) als Ganzes (gemischt),
- das von ÖVU betriebene *Verkehrsnetz* mit Infrastruktur, Personal und Organisation (gemischt),
- das *ÖVU-Liniennetz* mit Knoten, Strecken und Verknüpfungen (organisatorisch)
- der von ÖVU unterhaltene *Fuhrpark* (technisch)
- PIV: *ÖVU-Planungssystem* (technisch-organisatorisch, Inf.-System i.w.S.)
- ÖVU-*Fahrpläne* (technisch, Inf.-System i.e.S.)

# Mensch-Maschine-Systeme

In der Informatik von besonderem Interesse:

- Interagierende Systeme von *sozialen* und *technischen* Systemkomponenten (Menschen und Maschinen/ Rechnern)
- Zugehöriges Fachgebiet der Informatik: **Mensch-Maschine-Interaktion** (*Human-Computer Interaction*)
- Zentrales verbindendes Element: **Benutzer-Schnittstelle** (*user interface*). Diese wird *Benutzerzentriert* oder *System-* (genauer: *Technik-*)-*zentriert* modelliert.
- Thomas B. *Sheridan* unterscheidet *Benutzer-* und *Aufgabenseitige Interaktionsformen* (= Schnittstellen, s. Bild rechts)

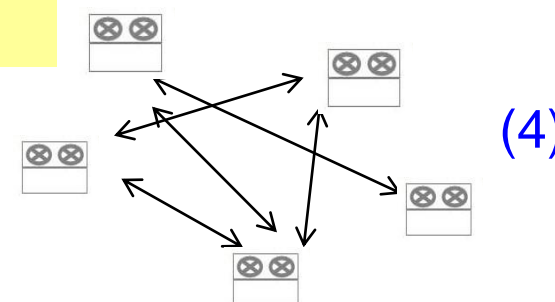
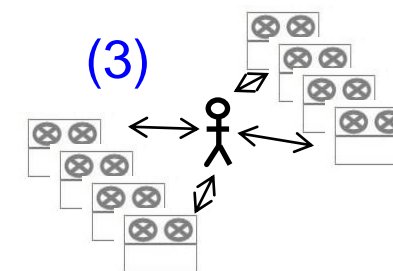
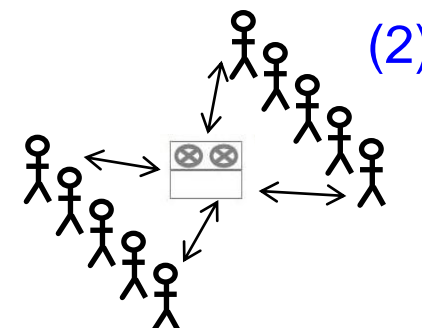
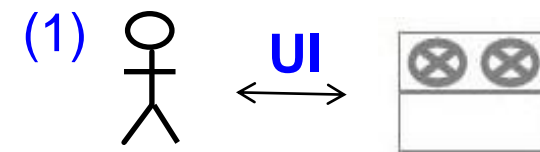


Interaktionsformen nach  
Sheridan, 1987, Qu.: Wikipedia

# MM-Systeme: Interaktionsstrukturen

## Interaktionsstrukturen:

- *Ein-Benutzer-Systeme (1)*,  
Bsp.: Taschenrechner, PC (*Personal Computer*)
- *Mehr-Benutzer-Systeme*,  
Bsp.: Klassischer Großrechner
- *Vermittlungssysteme (2)*:  
Bsp.: Telefonvermittlung, EMail, Makler (*broker*),  
Blackboard-Systeme
- *Benutzer-gesteuerter Systemverbund (3)*:  
Bsp.: Kontrollzentrum, Smartphone Apps
- *Selbstgesteuerter Systemverbund (4)*:  
Bsp.: Agentensysteme, Internet der Dinge (*Internet of Things*)





# Adaptive Systeme

- **Adaptives System:** ein System, das sich durch ein besonderes Anpassungsvermögen an seine Umgebung auszeichnet; das die Möglichkeit hat, auf deren Veränderungen zu reagieren und sich damit auf diese einzustellen. Dabei spielen *Rückkopplungsschleifen*, *Emergenz* und *Selbstorganisation* eine herausragende Rolle.

Oft auch: **Komplexe adaptive Systeme (CAS)**

CAS: Menge zusammenhängender Komponenten, die gemeinsam ein integriertes Ganzes bilden, emergente Systemeigenschaften aufweisen und sich durch Interaktion an gegebene Bedingungen anpassen.

Herkunft: *Interdisziplin. Santa Fe Institut*; *John H. Holland*, (Erfinder der *Genetischen* und der *Evolutionären Algorithmen*), *Murray Gell-Mann* (Nobelpreisträger, entdeckte die Quarks) u.a..

CAS-Forschung ist hochgradig interdisziplinär. Sie sucht Antworten auf fundamentale Fragen von lebenden, anpassungsfähigen und veränderlichen Systemen.



# CAS – Wesentliche Merkmale

## ***Parallelität:***

- viele Komponenten / Agenten interagieren gleichzeitig.  
Beispiel: Zellen interagieren via Proteine

## ***Bedingungsabhängige Aktionen***

- IF-/THEN-Struktur

Beispiel Agent: WENN [Signale X eintreffen] DANN [führe Aktion Y aus]

## ***Modularität***

- Aufteilung in Subroutinen, die unterschiedlich miteinander kombiniert werden können  
Beispiel: Zitronensäure-Zyklus (Biochemie, Stoffwechselzyklus, ben. nach KREBS)

## ***Adaptation und Evolution***

- Agenten verändern sich im Laufe der Zeit aufgrund von Feedback, Selektion, über „Generationen“ hinweg

# Adaptive Systeme - Beispiele

## ***Beispiele für CAS:***

- Ameisen- und Bienenvölker
- Biosphäre, Ökosysteme
- Gehirn und das Immunsystem, Zellen und Embryonen
- soziale Systeme: Familien, Sippen, Stämme, Völker, Unternehmen, Aktienmarkt
- künstliche Systeme: Roboter-Schwärme, "Ensembles"

## ***Beispiel-Anwendungen***

- Handels- und Wirtschaftssysteme analysieren, Marktgeschehen simulieren, prognostizieren
- Ökosysteme beschreiben, erhalten, beeinflussen
- Immunsystem verstehen, beeinflussen, stärken

# Literatur

- [Bos 94] Bossel, H.: Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Vieweg, Braunschweig 1994
- [Bun 79] M. Bunge: Treatise on basic philosophy, Vol. 4: Ontology: A world of systems. Reidel 1979
- [Can 95] M.J. Canty: Chaos und Systeme: Eine Einführung in die Theorie und Simulation dynamischer Systeme, Vieweg 1995
- [FHL+98] E. Falkenberg, W. Hesse, P. Lindgreen, B.E. Nilsson, J.L.H. Oei, C. Rolland, R.K. Stamper, F.J.M. Van Assche, A.A. Verrijn-Stuart, K. Voss: FRISCO - A Framework of Information System Concepts - The FRISCO Report. IFIP WG 8.1 Task Group FRISCO. Web version: <http://www.mathematik.uni-marburg.de/~hesse/papers/fri-full.pdf> (1998)
- [Hol 00] J.H. Holland: Emergence. From Chaos to Order. Oxford University Press, 2000
- [Hol 06] J. H. Holland: Studying Complex Adaptive Systems. Journal of Systems Science and Complexity 19 (1): 1-8 (2006)
- [HVS 01] W. Hesse, A. Verrijn-Stuart: Towards a theory of Information Systems: The FRISCO approach. In.: In: H. Kangassalo et al. (Eds.): Information Modelling and Knowledge Bases XII. IOS Press, Amsterdam, 2001, pp. 81-91
- [She 02] Th. B. Sheridan: Humans and Automation: System Design and Research Issues. Wiley, 2002.
- [Sta 73] H.Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie. Springer, Wien 1973
- [Tab 06] P. Tabeling: Softwaresysteme und ihre Modellierung
- [Wie 48] N. Wiener: 1948: Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. MIT Press 1948 (dt. Ausg.: Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine)

## Weitere Literatur (Auszug)

- [Axe 97] R. Axelrod: The Evolution of Cooperation, Penguin Books 1991, 2nd ed. 1997
- [Bos 04] H. Bossel: Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Books on Demand, Norderstedt/Germany, 2004
- [Buc 00] M. Buchanan: Das Sandkorn, das die Erde zum Beben bringt, Campus Verlag 2000
- [Dör 83] D. Dörner: Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität. Huber, Bern 1983
- [E-W 90] M. Eigen, R. Winkler: Das Spiel, Naturgesetze steuern den Zufall. Serie Piper Bd 410 (1990)
- [For 71] J. W. Forrester: World Dynamics, Wright-Allen Press. Dt. Übers.: Der teuflische Regelkreis: das Globalmodell der Menschheitskrise, DVA 1972
- [G-T 05] N. Gilbert, K. Troitzsch: Simulation for the Social Scientist. Open University Press, Berkshire 2005
- [Kau 96] St. Kaufmann: At home in the Universe, Oxford University Press 336 (1996)
- [Klu 01] F. Klügl: Multiagentensimulation: Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen. Addison-Wesley 2001
- [Mea+ 72] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens: The limits to growth. Potomac Ass., Washington D.C. 1972
- [RRW 11] F.J. Radermacher, J. Riegler, H. Weiger: Ökosoziale Marktwirtschaft – Historie, Programmatik und Alleinstellungsmerkmale eines zukunftsfähigen globalen Wirtschaftssystems. oekom Verlag, München 2011.