

# Complex Systems Engineering

## Einführung

---

Prof. Dr. Christin Seifert

18. Oktober 2017

University of Passau, WS 2017/2018

1. Systembegriff
2. Modellierung und Simulation
3. Zusammenfassung

# Systembegriff

---

## Definition (System)

A system is a regularly interacting or interdependent group of items forming a unified whole (Merriam-Webster).

Ein System besteht aus einer Menge von abhängig oder unabhängig voneinander interagierenden Teilen.

## Beispiele

- Deutsche Sprache
- Ökosystem (z.B. eine Wiese)
- Immunsystem (des Menschen)
- Internet
- Weltmarkt
- Betriebssystem

**Der König von Savatthi** (Gleichnis aus der Sammlung buddhistischer Legenden UDANA, Palikanon, 2. Jhdt. nach Christus)



**Abbildung 1:** Foto privat

Und der König begab sich dorthin, wo die Blinden versammelt waren, und im Hinzugehen, sprach er zu diesen: „Ist euch, ihr Blinden, der Elefant gezeigt worden?“ – „So ist es, Herr, der Elefant wurde uns gezeigt.“ – „So sagt nun, wem gleicht der Elefant?“ Die Blinden, die das Haupt des Elefanten betastet hatten, sagten: „Ein Elefant, Herr, ist gleich einem Topf.“ Jene, welche die Ohren befühlt hatten, sprachen: „Ein Elefant ist gleich einem Worfelsieb.“ Und die den Stoßzahn berührt hatten, die sagten: „Ein Elefant ist gleich einer Pflug-schar.“ Die den Rüssel in Betracht zogen, sprachen: „Ein Elefant ist gleich einem Pflugsterz“, die den Körper betasteten sprachen: „Ein Elefant ist gleich einem Nahrungsspeicher“, die den Fuß befühlt hatten: „Der Elefant ist gleich einem Mörser.“ Welche den Schwanz untersucht hatten: „Der Elefant ist gleich einem Stöbel.“ Und die von Geburt an Blinden, die nur die Schwanzquaste betasteten, sagten: „Der Elefant ist gleich einem Besen.“

## Definition

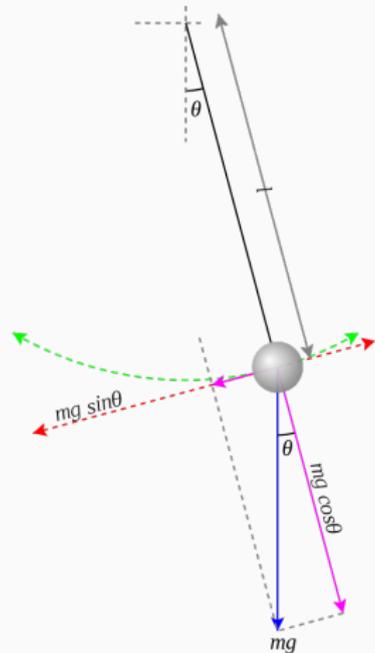
Ein einfaches System besteht aus einer geringen Anzahl von Teilen mit eindeutigen Beziehungen und das Systemverhalten ist einfach vorherzusagen.

- Verhalten des System kann bei Kenntnis der Teile und deren Beziehungen leicht vorhergesagt werden.
- Ähnliche Parametersätze führen zu ähnlichem Verhalten.

## Modell eines einfachen Pendels

- Geg: Auslenkwinkel  $\theta$ , Länge  $l$
- Beschleunigung  $a$ , Kraft  $F$
- Teil der Schwerkraft, die auf das Pendel wirkt:  $mg \sin \theta$
- $F = ma = mg \sin \theta$ , d.h.  $a = -g \sin \theta$
- Zurückgelegte Strecke  $s = l\theta$
- $a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{d^2l\theta}{dt^2}$
- $l \frac{d^2\theta}{dt^2} = -g \sin \theta$ , d.h.

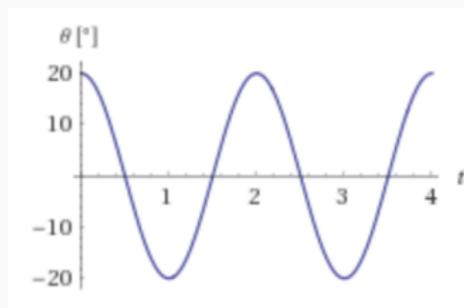
$$\frac{d^2\theta}{dt^2} - \frac{-g}{l} \sin \theta = 0$$



**Abbildung 2:** Modell eines Pendels (CC-SA 3.0, Krishnavedala, via Wikimedia Commons)

# EINFACHE SYSTEME – PENDEL

- Beschreibung des Verhaltens des Pendels:  $\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin \theta$
- Die Differentialgleichung 2. Ordnung ist nicht einfach zu lösen oder in Form von elementaren Funktionen darstellbar.
- Für kleine Auslenkungen  $\sin \theta \approx \theta$ , d.h.  $\frac{d^2\theta}{dt^2} - \frac{-g}{l}\theta = 0$
- Lösung  $\theta(t) = \theta_0 \cos(\sqrt{\frac{g}{l}}t)$ ,  $\theta_0 \ll 1$

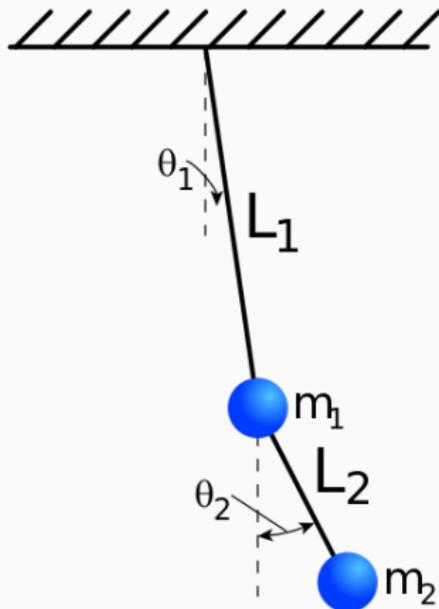


**Abbildung 3:** Schwingung eines Pendels mit kleiner Initialauslenkung  
(erstellt mit <http://www.wolframalpha.com/input/?i=pendulum>)

- Das Verhalten des Systems ist vollständig mathematisch beschreibbar und die Entwicklung über die Zeit vorhersagbar.

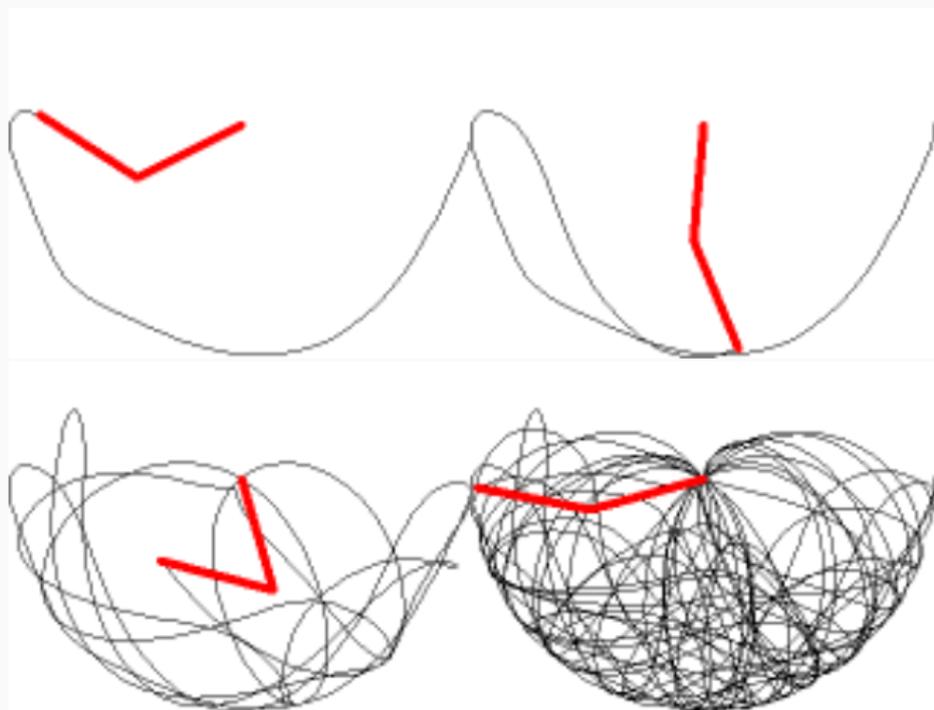
## Modell eines Doppelpendels

- Strukturell einfaches System mit zwei Parametern  $\theta_1$  und  $\theta_2$
- Die Systemteile Kugel 1 und Kugel 2 beeinflussen sich gegenseitig in nicht vorhersagbarer Weise (starke Wechselwirkungen).
- Ein strukturell einfaches System zeigt komplexes Verhalten.



**Abbildung 4:** Modell eines Doppelpendels (CC-SA 3.0, JabberWok, via Wikimedia Commons)

# KOMPLEXE SYSTEME – DOPPELPENDEL



**Abbildung 5:** Chaotische Bewegung eines Doppelpendels über die Zeit  
(Public Domain, Catslash, via Wikimedia Commons)

## Definition (Komplexes System)

Ein komplexes System besteht aus vielen Teilen, die vielschichtig miteinander agieren. Das Verhalten komplexer Systeme ist nicht eindeutig vorhersagbar [1]. Eigenschaften komplexer Systeme sind:

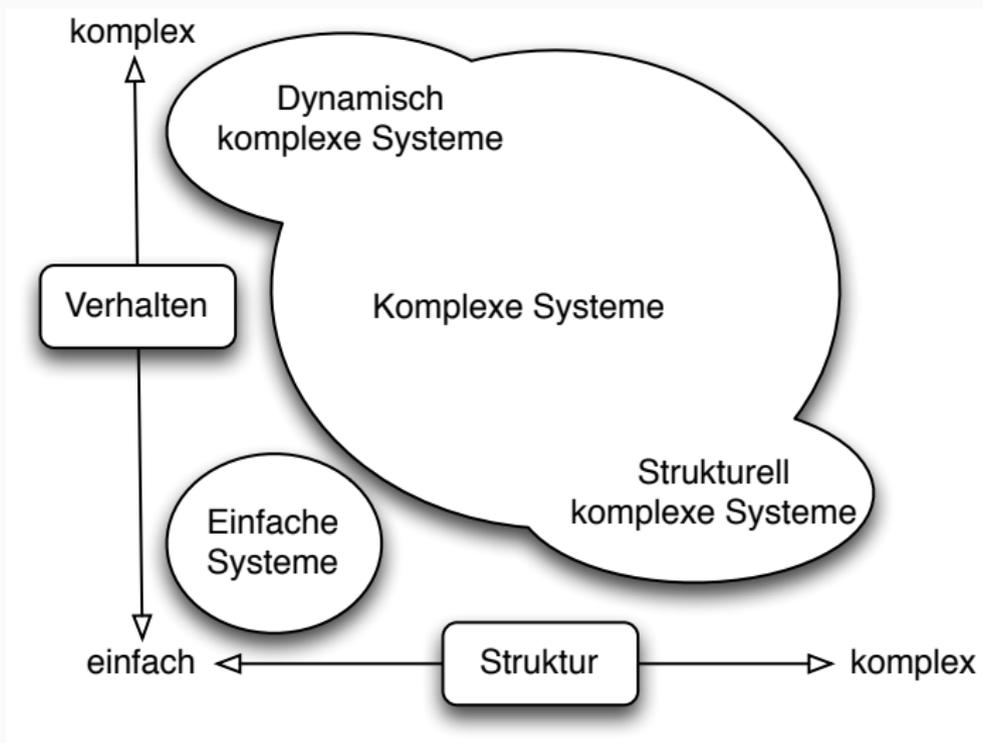
**Emergenz:** Aus Teilen ergibt sich unerwartetes Neues.

**Abhängigkeit:** Eine kleine Änderung an einer Stelle im System kann große Änderung an einer anderen Stelle bewirken (z.B. Wetterphänomene).

**Selbstorganisation:** Durch die komplexe Interaktion von Teilen ergeben sich Muster im Ganzen (z.B. Fraktale).

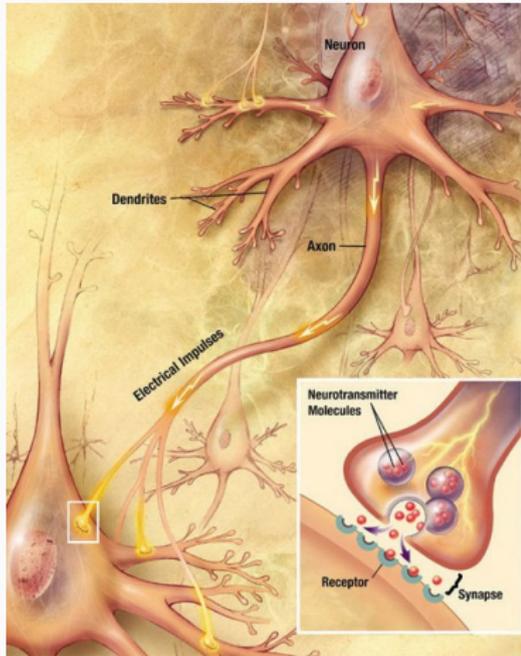
- Eine spezielle Untergruppe sind komplexe adaptive Systeme, d.h. Systeme, die sich an ihre Umwelt anpassen (z.B. das menschliche Immunsystem).

# KOMPLEXE SYSTEME – KATEGORISIERUNG



**Abbildung 6:** Einteilung einfacher und komplexer Systeme

# KOMPLEXE SYSTEME – BEISPIELE



**Abbildung 7:** Nervenzellen im menschlichen Gehirn (Public Domain, US National Institutes of Health, via Wikimedia Commons)

- Internet
- Ameisenhügel
- Menschliches Immunsystem
- Gehirn einer Maus
- Organisationen (Universitäten, Firmen)
- Stadionbesucher\*innen beim Fußball
- Chemischer Reaktor
- Twitter
- Ökosysteme (Donau)

1. Nennen Sie 5 (konkrete) Systeme.
2. Kennzeichnen Sie für jedes System, ob es sich um ein einfaches, ein komplexes oder ein komplexes adaptives System handelt.

<b>System</b>	<b>einfach</b>	<b>komplex</b>	<b>adaptiv</b>
...			

Beispiel von komplexen (unerwarteten) Einflüssen im Ökosystem des Yellowstone Nationalparks, Video

<https://www.youtube.com/watch?v=BYqD9WK-Voc> (4:33 min)



**Abbildung 8:** Wolf (Public Domain, National Digital Library of the United States Fish and Wildlife Service via Wikimedia Commons)

# Modellierung und Simulation

---

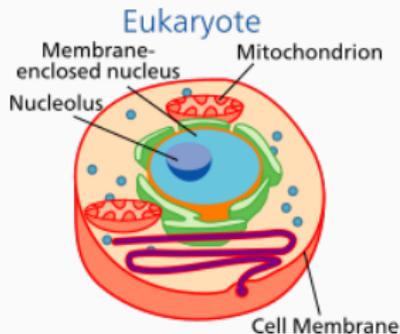
## Definition (Modell)

Ein Modell ist eine Repräsentation von *etwas*, einem Original aus der Realwelt. Modelle können wiederum Abbildungen anderer Modelle sein [2]. Ein Modell besitzt folgende Eigenschaften:

- **Abbildung:** Ein Modell bildet ein abstraktes oder konkretes existierendes Objekt der Wirklichkeit ab.
- **Verkürzung:** Es werden nur die für den Anwendungszweck wichtigen Attribute des Original (vereinfacht) abgebildet.
- **Pragmatismus:** Es gibt nicht nur ein eindeutiges Modell eines Originals sondern sind subjektspezifisch (für wen wird modelliert), zeitspezifisch (wann wird modelliert) und anwendungsspezifisch (zu welchem Zweck wird modelliert).

## Beispiele

- Random-Surfer-Modell (vereinfachte Abbildung einer im Internet sich bewegenden Person)
- Modell des Econs (rational denkender Mensch) in den Wirtschaftswissenschaften
- Netzwerkmodell eines Unternehmensnetzwerkes
- Modelle biologischer Zellen



**Abbildung 9:** Modelle von Zellen (Public Domain, Science Primer (l); CC-SA-4.0, Royroydeb (r) via Wikimedia Commons)

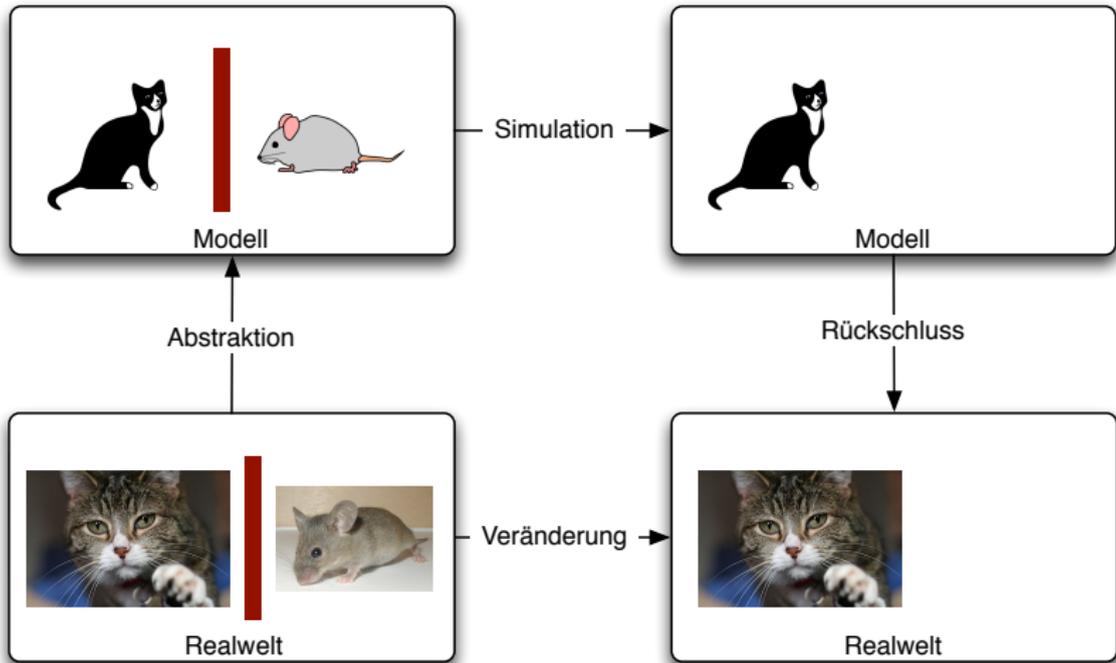
## Definition (Simulation)

Eine Simulation ist eine Imitation des Verhaltens eines Systems in der Realwelt (unter Benutzung eines Modells).

## Beispiele

- Aufprallsimulation mit Hilfe von Dummies
- Flugsimulator
- User-Testing mit Mockup-Prototypen
- Computergestützte Wettersimulationen
- Computergestützte Simulation von Räuber-Beute-Verhalten
- Lernspiele („Ich baue ein Haus“)

# MODELLIERUNG UND SIMULATION



**Abbildung 10:** Modell als Abstraktion der Realwelt (CC-SA 3.0, David Corby (Katze), Roger McLassus (Maus) via Wikimedia Commons)

Sie sollen den neuen Zugfahrplan der Deutschen Bahn hinsichtlich folgender Fragestellung untersuchen:

*Wieviel Verspätung darf ein beliebiger Zug haben, sodass kein anderer Zug dadurch verspätet wird?*

Nehmen Sie an, Sie bekommen von der Deutschen Bahn alle benötigten Informationen.

- Skizzieren Sie ein Modell und die Simulation des Modelles, mit dem die o.g. Fragestellung beantwortet werden kann.

- Die Gaia-Hypothese sagt, dass alles Leben auf der Erde eng miteinander in Beziehung steht.
- Somit muss man das Gesamtsystem untersuchen, um das Gesamtsystem zu verstehen. Eine Untersuchung der Einzelteile reicht nicht, da die Erde ein komplexes System ist.
- Das einfachste Modell ist Daisyworld. Es gibt nur 2 Arten von Lebewesen, schwarze Gänseblumen und weiße Gänseblumen.
- Beide konkurrieren um Platz und Sonnenlicht. Ziel ist, die Temperatur auf Gaia konstant zu halten, die schwarzen Gänseblumen absorbieren mehr Sonnenlicht als die weißen.

Video mit Erklärungen auf

<https://www.youtube.com/watch?v=CU7Keei-C1s> (3:46 min)

# Zusammenfassung

---

- Fast alle in der Natur vorkommenden Systeme sind komplex.
- Komplexität ergibt sich a) aus der Vielzahl von Teilen und b) aus deren Interaktion.
- Auch strukturell einfache Systeme können komplexes Verhalten zeigen (siehe Doppelpendel).
- Complex Systems Engineering hat das Ziel, komplexe Systeme zu modellieren, um sie a) zu verstehen und b) ihr Verhalten vorherzusagen.
- Modelle sind Abstraktionen der Realwelt.

## Wichtige Konzepte

- Modell
- Simulation
- Komplexes System
- Komplexes, adaptives System

## Literatur

---

- [1] Yaneer Bar-Yam. "General Features of Complex Systems". In: *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)* (2002). URL: <http://necsi.edu/projects/yaneer/Paper1.pdf>.
- [2] Herbert Stachowiak. *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer Verlag, 1973.  
URL:  
<https://archive.org/details/Stachowiak1973AllgemeineModelltheorie>.