

Der systemtheoretische Modellbegriff der Physik und seine Tragweite

Vom Planetenmodell des Atoms
bis zur Hydrodynamik des Verkehrsflusses

Prof. Dr. Peter C. Hägele, Universität Ulm

`peter.haegele@uni-ulm.de`

`www.uni-ulm.de/~phaegele/`

Ringvorlesung IZKS Bonn

30.10.2007

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

- 1 **Einleitung**
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

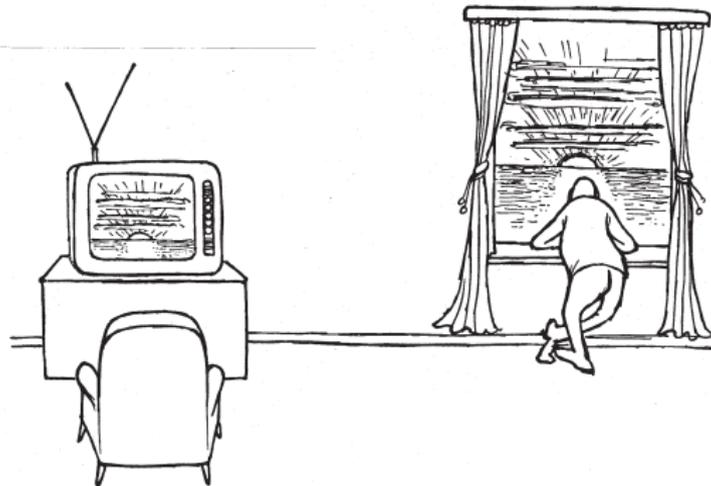
Kleine Modelle . . .



B. BRECHT:

„Der Mensch macht sich von den Dingen, mit denen er in Berührung kommt und auskommen muss, Bilder, kleine Modelle, die ihm verraten, wie sie funktionieren.“

Das modellbildende Wesen



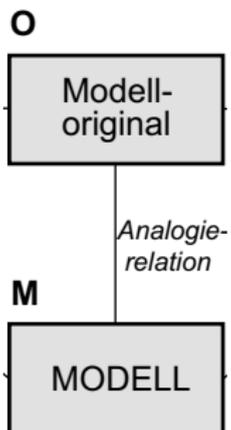
H. STACHOWIAK:

„Zu den Grunderlebnissen des Menschen gehört dasjenige der Dichotomie von Vor-gegebenem und Nach-vollzogenem, von Original und Modell.“

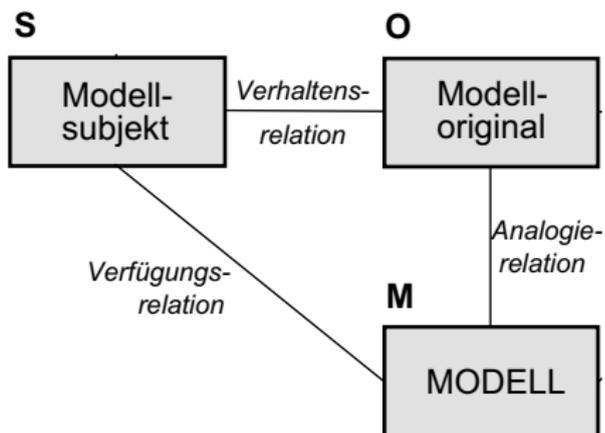
Das modellbildende Wesen

Wir können den Menschen geradezu als das modellbildende Wesen begreifen. Alles was ihm neu- und fremdartig erscheint, sucht er sich im Medium der Modellbildung anschauend, beobachtend, interpretierend, vergewissernd anzueignen. Sein Lernen ist ein Lernen an und mit Modellen, und sein Handeln wesentlich ein Handeln nach Modellen; [...]"

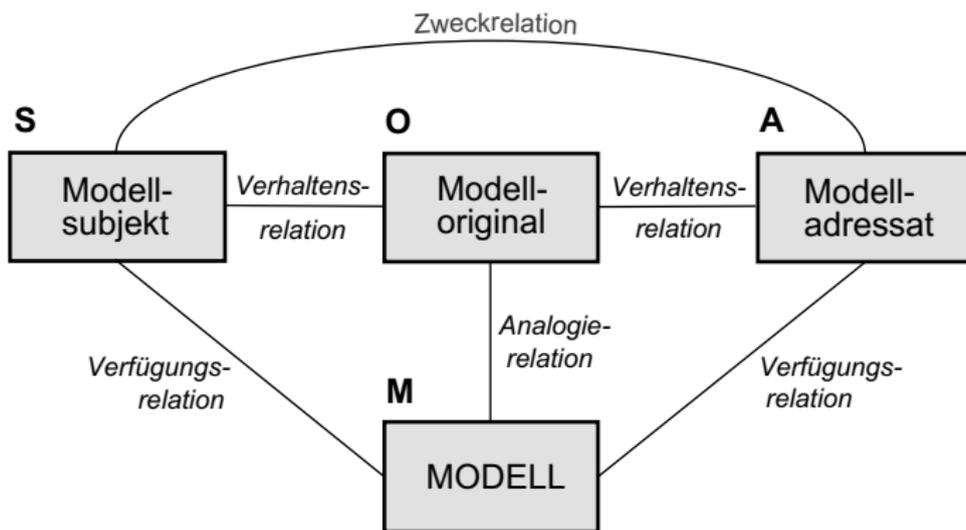
Ein „objektiver“ Modellbegriff?



Ein perspektivischer Modellbegriff

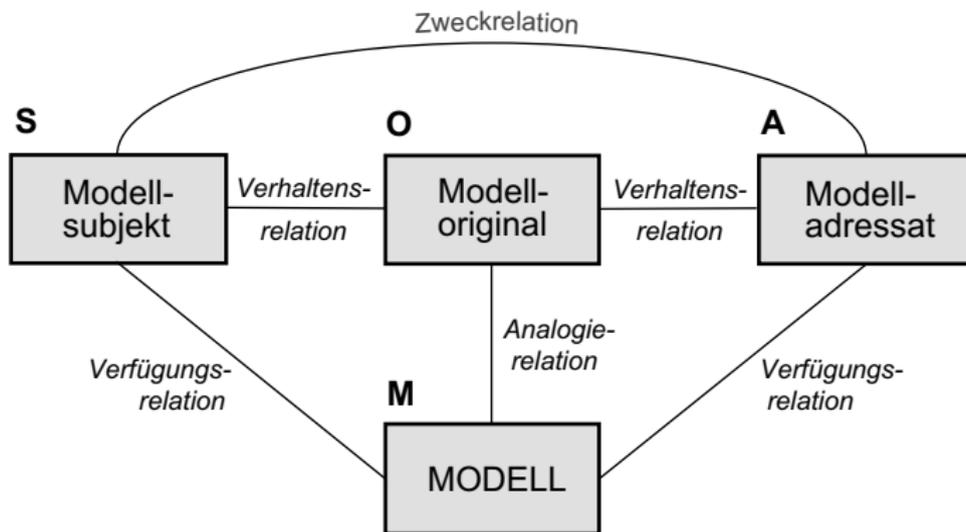


Ein erweiterter perspektivischer Modellbegriff



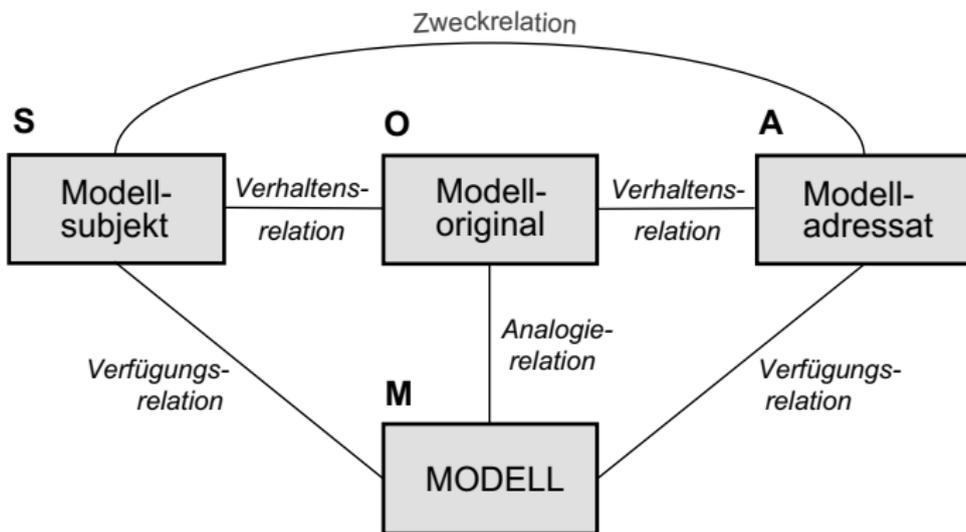
- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)**
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Der allgemeine systemtheoretische Modellbegriff



SOMA-Diagramm: **S**ubjekt – **O**riginal – **M**odell – **A**dressat

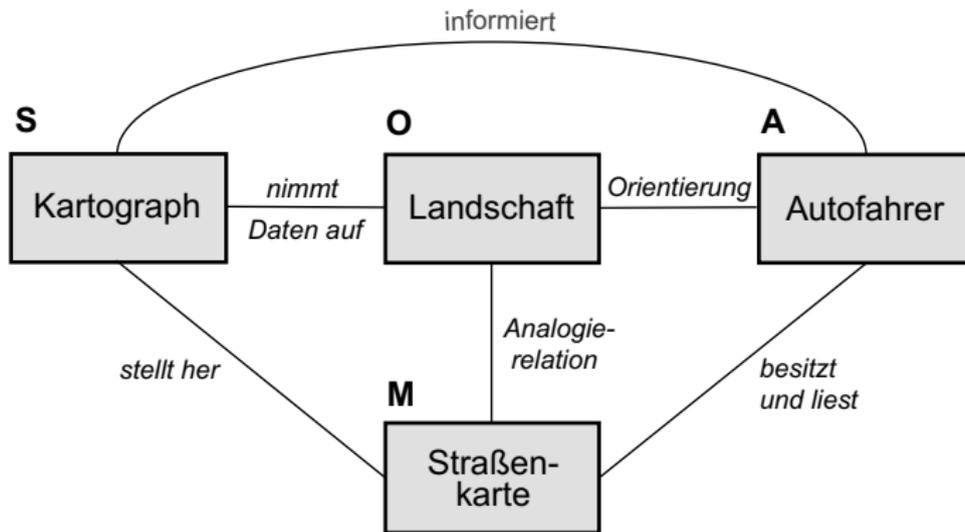
Der allgemeine systemtheoretische Modellbegriff



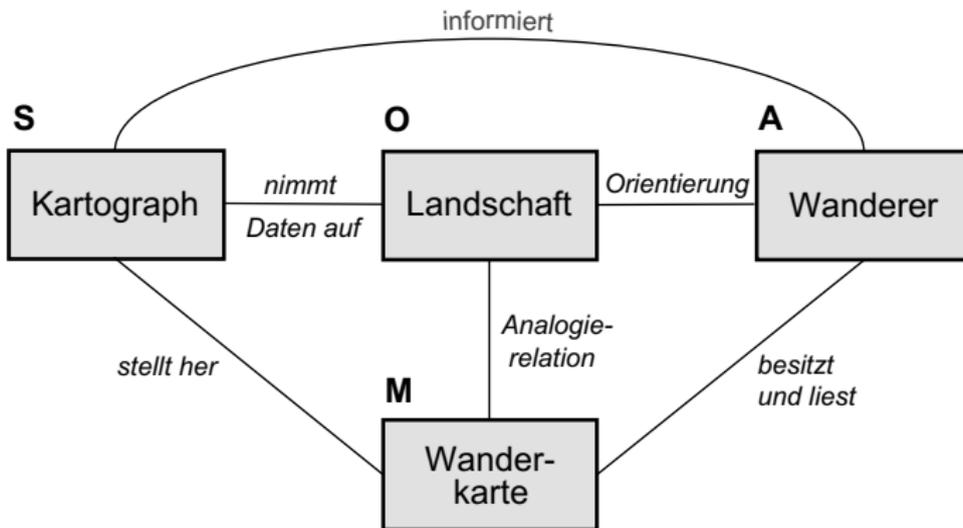
W. STEINMÜLLER:

„Modell ist stets **Modell-wovon-wozu-für wen.**“

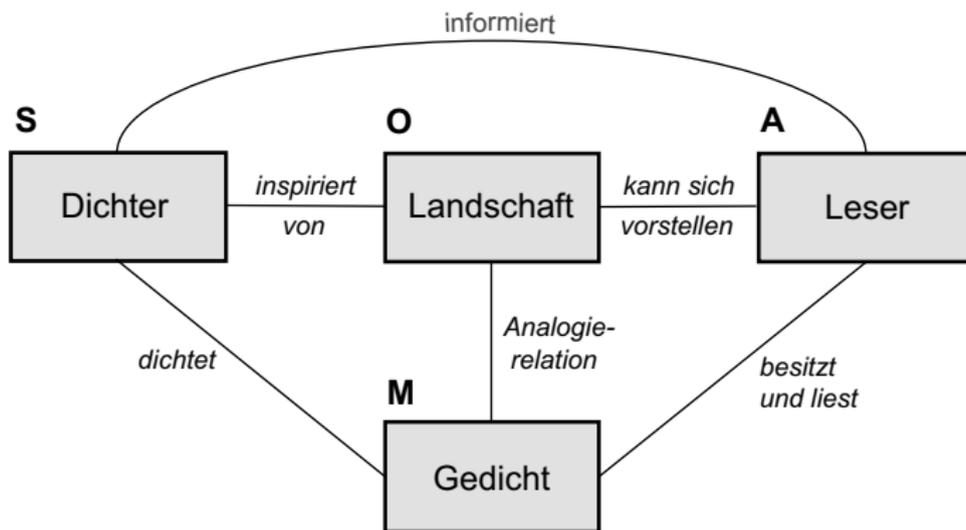
Beispiel: Straßenkarte als Modell



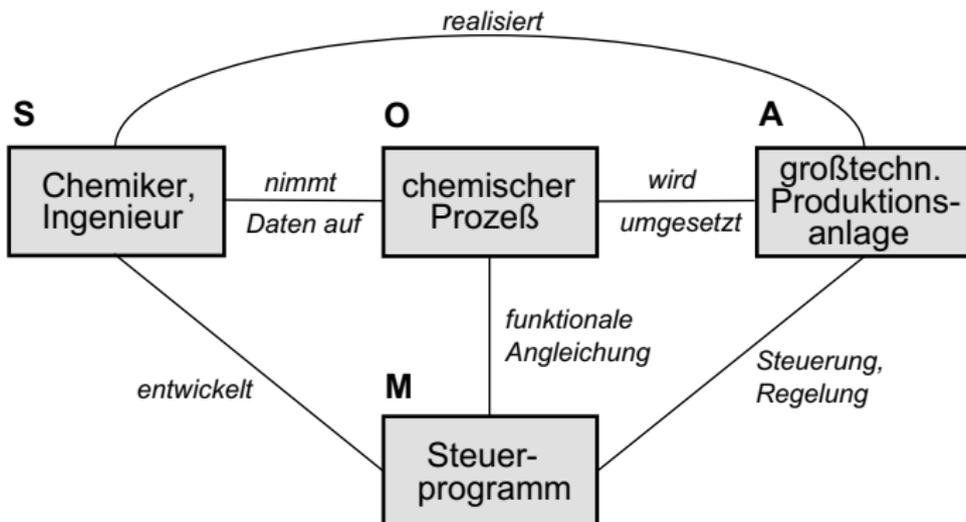
Beispiel: Wanderkarte als Modell



Beispiel: Gedicht als Modell

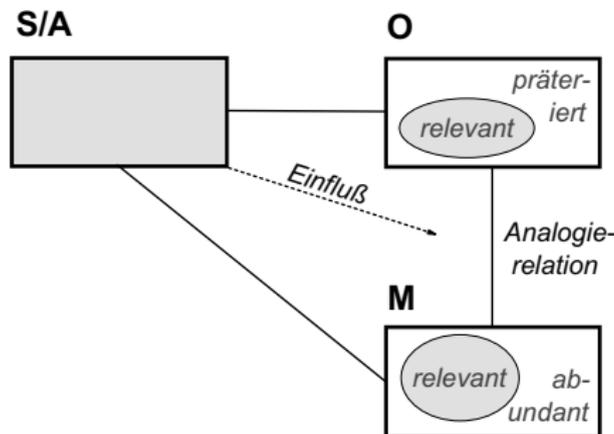


Beispiel: Steuerprogramm als Modell



- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)**
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Die Analogierelation: Allgemeine Merkmale



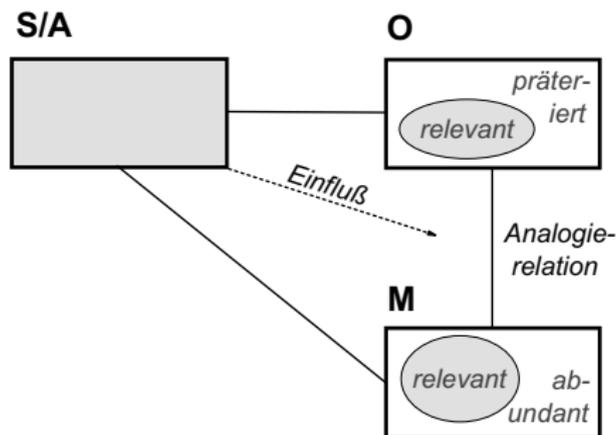
- „Abbildungsmerkmal“ (**STACHOWIAK**):

Einer Anzahl von Elementen und Relationen des Modelloriginals werden Elemente und Relationen des Modells zugeordnet.

O und **M** sind Systeme.

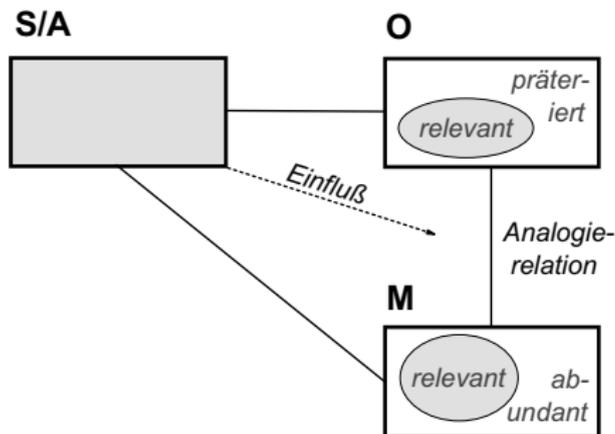
Homomorphe Abbildung *aus* dem Original *in* das Modell

Die Analogierelation: Allgemeine Merkmale



- **„Verkürzungsmerkmal“ (STACHOWIAK):**
Es gibt i.Allg. präterierte (übergangene) Merkmale.
*„Dies ist ja **nur** ein Modell.“*

Die Analogierelation: Allgemeine Merkmale

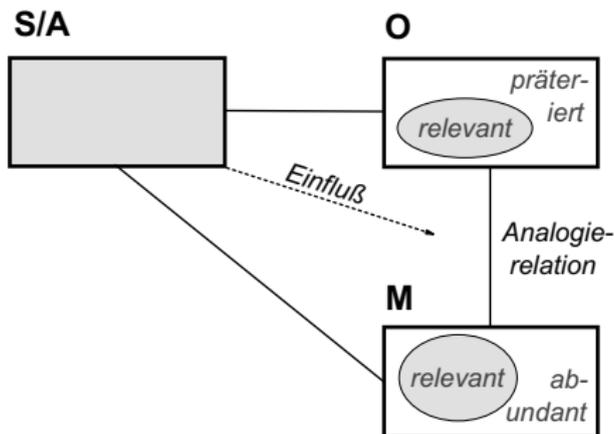


- Die präterierten Elemente und Relationen des Modells nennt man „abundant“.

Brennbarkeit von Landkartenpapier; Metrik von U-Bahn-Plänen

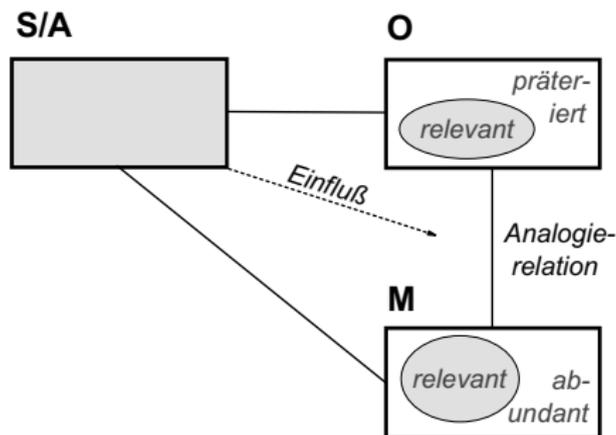
abundante Attribute weisen auf das Modellsubjekt hin:
„Implizite Selbstbeschreibung“

Die Analogierelation: Allgemeine Merkmale



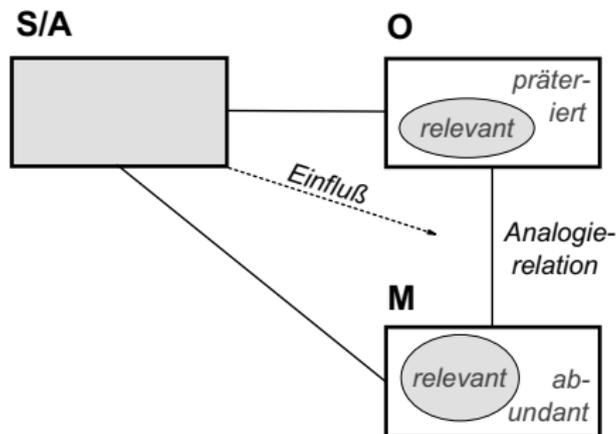
- Nicht nur (Struktur)verkürzung, sondern auch „**Strukturamplifikation**“ (STEINMÜLLER)
Eigengesetzlichkeit des Modellsubstrats

Die Analogierelation: Allgemeine Merkmale



- **„Pragmatisches Merkmal“ (STACHOWIAK):**
Das Modellsubjekt wählt die relevanten Attribute für bestimmte Zwecke und bestimmte Zeitabschnitte aus.
Straßenkarte, Wanderkarte, Wetterkarte

Die Analogierelation: Allgemeine Merkmale



- **Konstruktiver Aspekt**

„Das Abbild ist in Wirklichkeit ein Produkt.“

„Umbild“ (STEINMÜLLER)

Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte

- **Grad der strukturellen Angleichung**

Wie weitgehend wird die Struktur abgebildet? –
unabhängig von der Art der materiellen Realisierung?

Landkarte

Klassenspiegel

- **Grad der qualitativen Angleichung**

Wie weitgehend werden Elemente und Relationen in ihrer
konkreten Beschaffenheit (Qualität) abgebildet?

Muss codiert werden?

*Landkarte: horizontale Abstände nicht codiert
vertikale Abstände codert
(Farben, Höhenlinienscharen)*

Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte

- **Grad der strukturellen Angleichung**

Wie weitgehend wird die Struktur abgebildet? –
unabhängig von der Art der materiellen Realisierung?

Landkarte

Klassenspiegel

- **Grad der qualitativen Angleichung**

Wie weitgehend werden Elemente und Relationen in ihrer
konkreten Beschaffenheit (Qualität) abgebildet?

Muss codiert werden?

Landkarte: horizontale Abstände nicht codiert

vertikale Abstände codiert

(Farben, Höhenlinienscharen)

Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte

- **Grad der funktionalen Angleichung**

Wie weitgehend wird die Funktion abgebildet? –
unabhängig von der Art der strukturellen Realisierung?

künstliche Niere

Demonstrationsmodell einer Niere

Black-Box-Methode

- **Grad der Kontrastierung**

Wie weitgehend werden Elemente und Relationen
überproportional, überdeutlich abgebildet?

Landkarte: überbreite Straßen und Flüsse

Karikaturen

„Schwarz-Weiß-Malerei“

Mach'sche Streifen (laterale Inhibition)

Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte

- **Grad der funktionalen Angleichung**

Wie weitgehend wird die Funktion abgebildet? –
unabhängig von der Art der strukturellen Realisierung?

künstliche Niere

Demonstrationsmodell einer Niere

Black-Box-Methode

- **Grad der Kontrastierung**

Wie weitgehend werden Elemente und Relationen
überproportional, überdeutlich abgebildet?

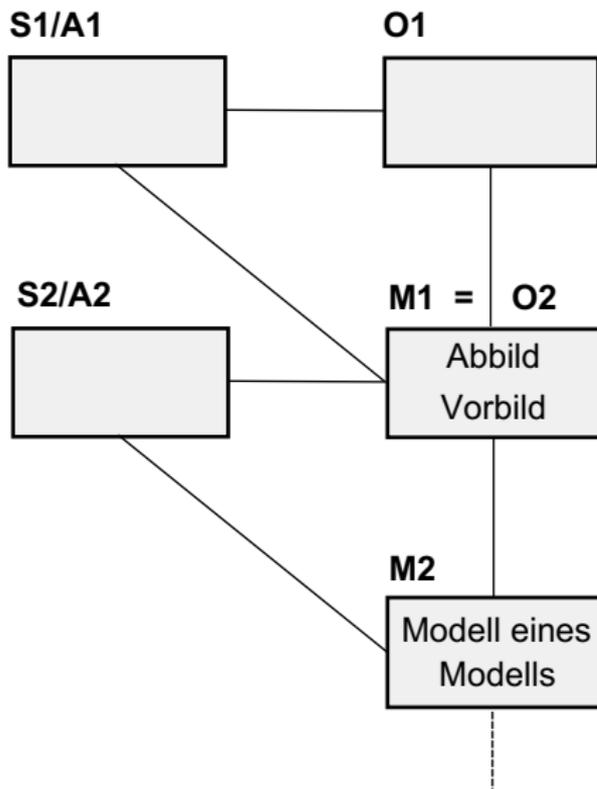
Landkarte: überbreite Straßen und Flüsse

Karikaturen

„Schwarz-Weiß-Malerei“

Mach'sche Streifen (laterale Inhibition)

Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte

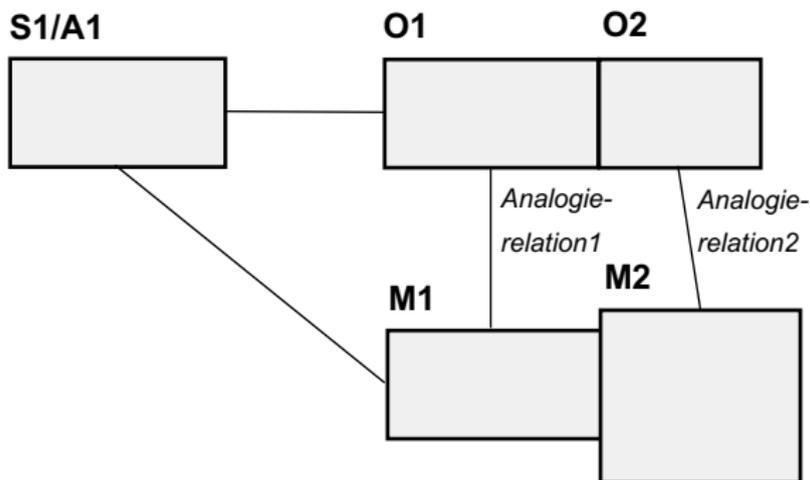


Iteration von Modellen:

Modelle
von Modellen
von Modellen ...

Problem: Ist M2 noch Modell
von O1, wenn die
Abbildungsgesichtspunkte
wechseln?

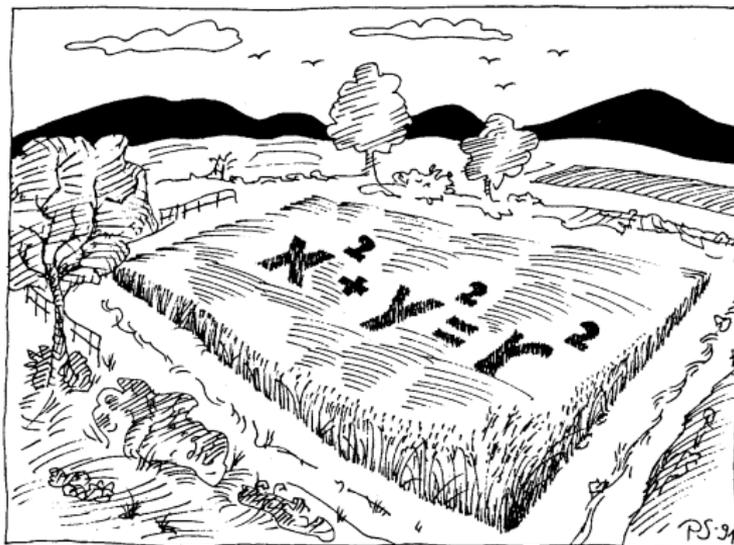
Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte



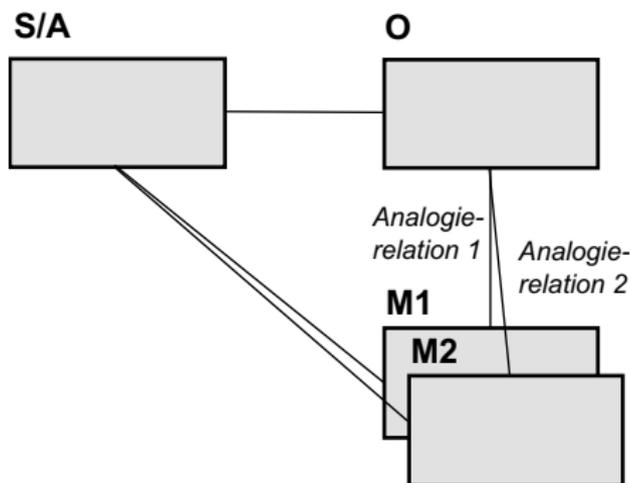
Zusammensetzung von Teilmodellen / Zerlegung in Teilmodelle

Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte

Problem: Inkonsistenzen bei Wechsel der Abbildungsgesichtspunkte



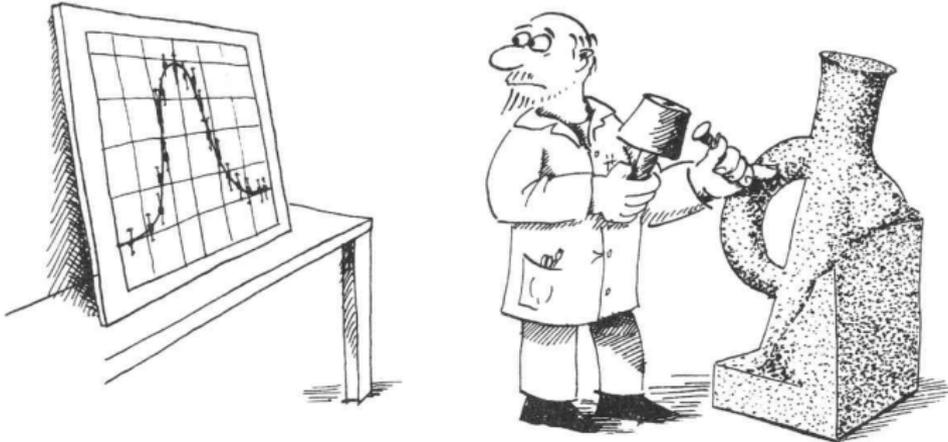
Die Analogierelation: Spezielle Abbildungsgesichtspunkte



Sonderfall: Komplementäre Modelle

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik**
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Modelle – Glück des Physikers

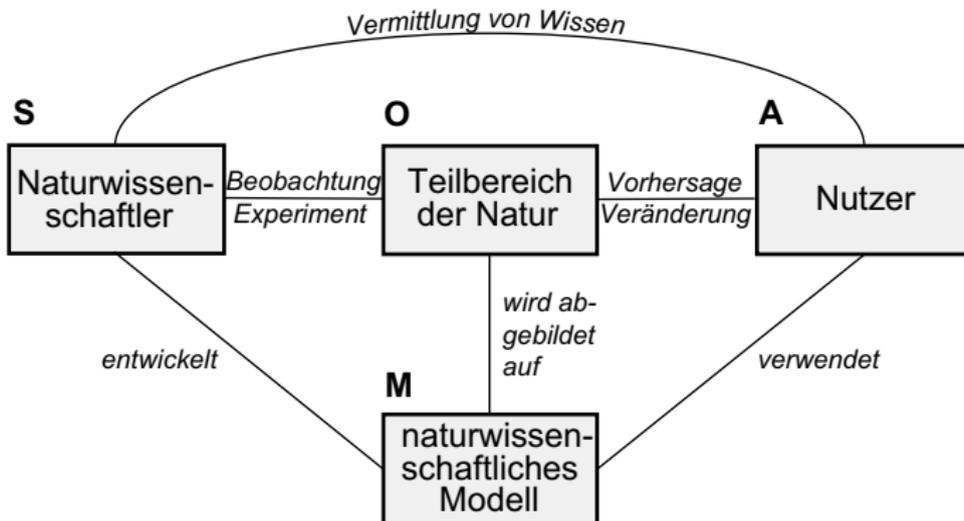


Zur Hand ist der Physiker schnelle,
entwirft sich gern neue Modelle.

Wenn Daten dann passen,
kann's Glück er kaum fassen:

Erkenntnis schöpft er aus der Quelle.

Modellbildung in der Naturwissenschaft



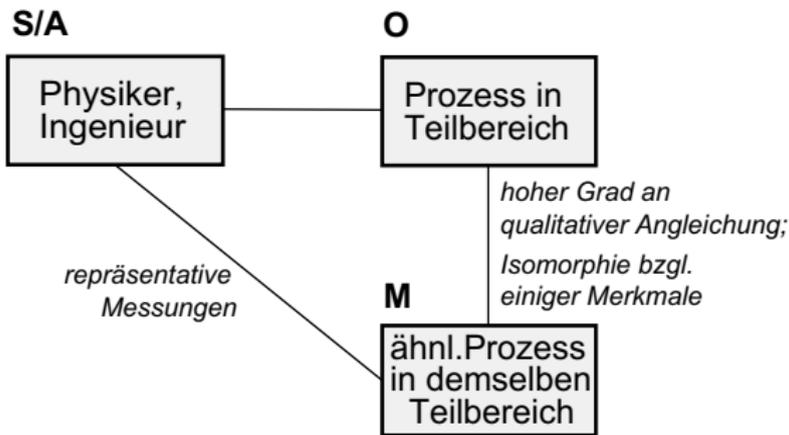
Der naturwissenschaftliche Modellbegriff

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik**
 - **Varianten physikalischer Modelle**
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Varianten physikalischer Modelle

- Modell: skaliertes Abbild eines Prozesses
- Modell: Analogie zwischen einem bekannten und einem unbekanntem Naturbereich
- Modell: Theorie, die einen großen Erfahrungsbereich beschreibt
- Modell: Vorstufe / Idealisierung einer allgemeinen Theorie
- Modell: Gedankenexperiment
- Modell: Physikalische Interpretation einer mathematischen Struktur

Modell: skaliertes Abbild eines Prozesses



Modell als verkleinertes / vergrößertes Abbild („handlich“)
aero- und hydrodynamische Modelle (Flugzeug-, Schiffsmodelle)

Modell: skaliertes Abbild eines Prozesses

Verallgemeinerung der geometrischen Ähnlichkeit (invariante Kennzahlen):

Strömungsgleichungen von NAVIER und STOKES:

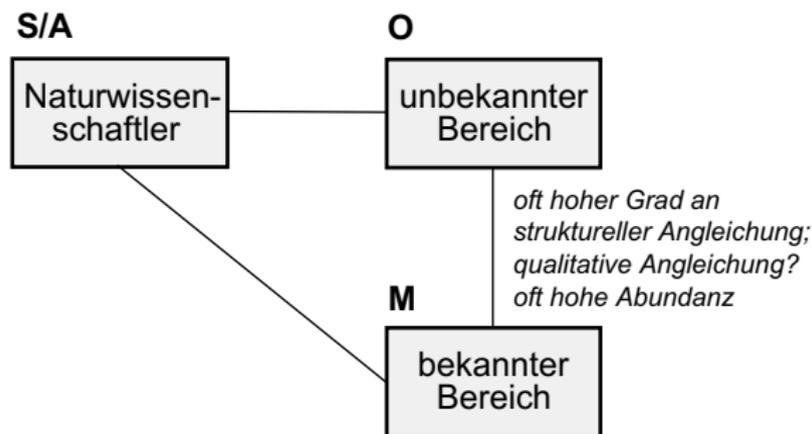
$$\rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + \rho \vec{g}$$

Einführung von dimensionslosen Größen

$$t' = t/t^* \quad l' = l/l^* \quad \vec{v}' = \vec{v}/v^* \quad \nabla' = l^* \nabla \quad \rho' = \rho/\rho^* \quad \text{usw. :}$$

$$\rho' \vec{v}' \cdot \nabla' \vec{v}' + \rho' \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t'} = - \underbrace{\frac{\rho^*}{\rho^* v^{*2}} \nabla' p'}_{\text{EULER}} + \underbrace{\frac{\eta^*}{\rho^* l^* v^*}}_{1/\text{REYNOLDS}} \eta' \Delta' \vec{v}' + \underbrace{\frac{l^* \vec{g}}{v^{*2}}}_{1/\text{FROUDE}} \rho'$$

Modell: Analogie zwischen einem bekannten und einem unbekanntem Naturbereich



Unbekanntes wird auf Bekanntes zurückgeführt und so „verstanden“.
„Schluss vom Besonderen auf Besonderes“ (W.KUHN)

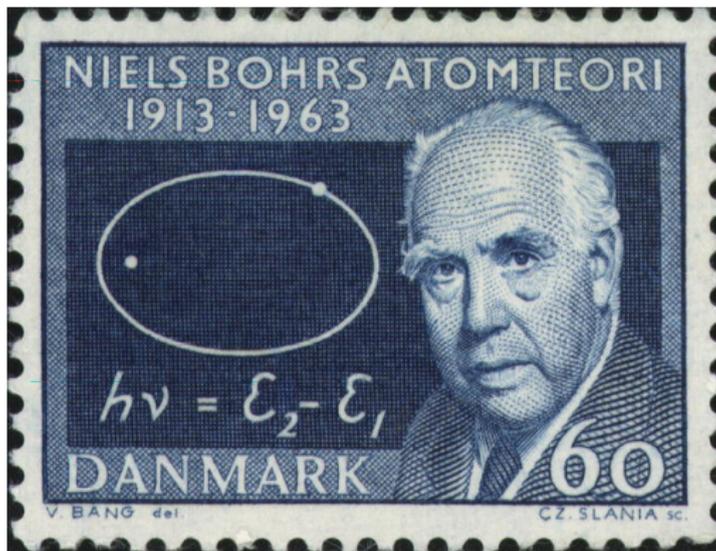
Modell: Analogie zwischen einem bekannten und einem unbekanntem Naturbereich

| Bekannter Bereich | Unbekannter Bereich |
|-----------------------------|----------------------------|
| Galilei'sche Jupitermonde | Sonnensystem |
| Bohr'sches Planetenmodell | Atombau |
| Tröpfchen-, Schalenmodell | Atomkern |
| Gas freier Elektronen | elektr. Eig. von Metallen |
| kinet. Gastheorie (Billard) | Thermodynamik der Gase |
| elektron. Netzwerke | neuronale Netzwerke |

„Ganz besonders liebe ich die Analogien als meine zuverlässigsten Lehrmeister, die um alle Geheimnisse der Natur wissen.“

(J. KEPLER)

Modell: Analogie zwischen einem bekannten und einem unbekanntem Naturbereich



BOHR'sches Atommodell

Modell: Analogie zwischen einem bekannten und einem unbekanntem Naturbereich

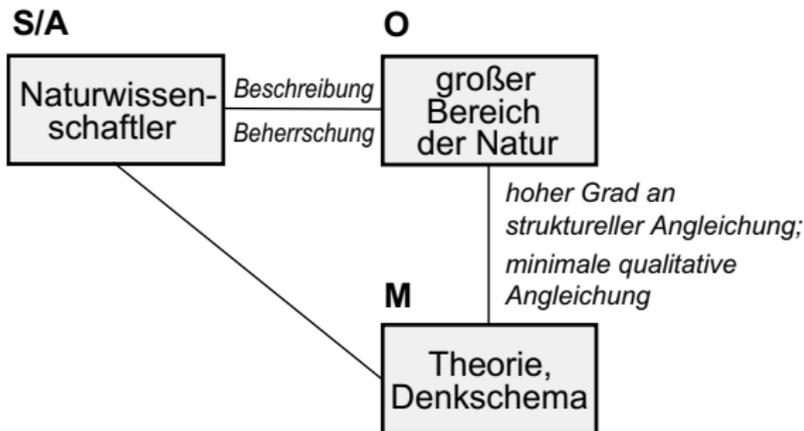
Probleme:

- Analogieschlüsse nie logisch zwingend
- Analogieschlüsse oft suggestiv; Reichweite?
- Grad der qualitativen Angleichung oft gering

Grenzen des BOHR'schen Atommodells (instabil; eben)
mechanisches Wellenmodell – Träger der elektromagnet. Wellen?
mechanisches Wellenmodell – Natur der Materiewellen?
Modell Mikroevolution – Makroevolution (gleiche Mechanismen?)

Modell: Theorie,

die einen großen Erfahrungsbereich beschreibt



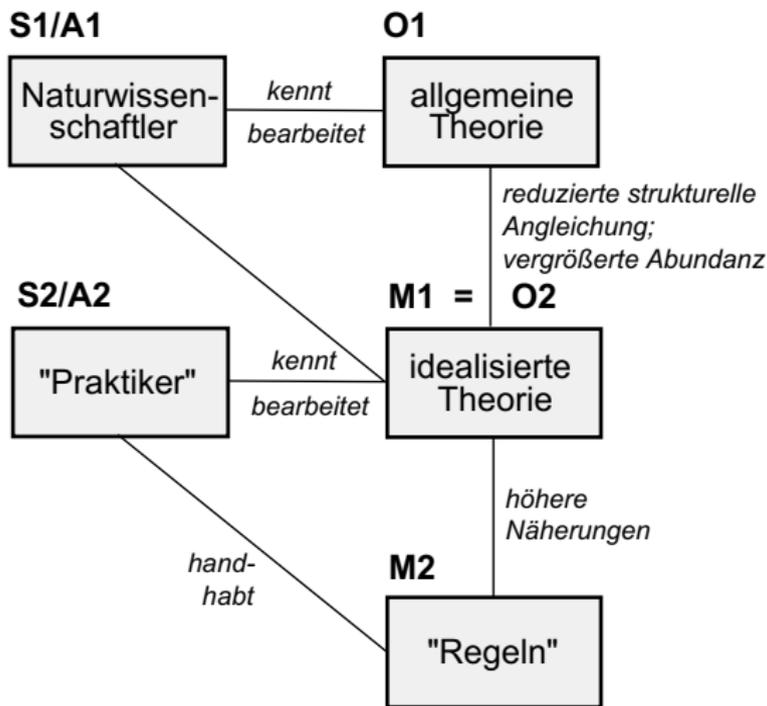
Eine Theorie ist „*innerhalb der Begrenzung ihres Anwendungsbereichs*“ ein „*Modell der Wirklichkeit*“. (M. PLANCK)

Modell: Theorie, die einen großen Erfahrungsbereich beschreibt

| Mathematische Struktur | Gegenstand der Naturwissenschaft |
|--|---|
| Geometrie reelle Zahlen, Funktionen Analysis, Lineare Algebra Differentialgleichungen Vektoranalysis lineare, selbstadj. Operatoren Symmetriegruppen | Anordnung der Gegenstände im Raum („physikal. Geometrie“) Kinematik (Raum-Zeit) Dynamik Schwingungen, Wellen Felder (z.B. elektromagnet. Feld) Quantenmechanik Elementarteilchen |

Beispiele für die Anwendung mathematischer Strukturen in der Physik

Modell: Vorstufe / Idealisierung einer allgemeinen Theorie



Modell: Vorstufe / Idealisierung einer allgemeinen Theorie

- Vorstufe:** „Schluss vom Besonderen aufs Allgemeine“ (Induktion)
Wegweiser („Pointer“ HESSE) für allgemeine Theorien
- Idealisierung:** gewollte Reduzierung der Elemente und Relationen
Weglassen von Untypischem

| Idealisierung | Allgemeine Theorie |
|-------------------------|--------------------------------|
| Massenpunkt | klassische Mechanik |
| starrer Körper | klassische Mechanik |
| harmonischer Oszillator | bel. schwingungsfähige Systeme |
| Idealkristall | Festkörperphysik |
| Strahlenoptik | Wellenoptik (Elektrodynamik) |
| Tröpfchenmodell | Kernphysik |
| Ising-Modell | Theorie der Phasenübergänge |
| Knäuel-, Mäandermodell | Polymerphysik |

Modell: Vorstufe / Idealisierung einer allgemeinen Theorie

- Vereinfachung der mathematischen Struktur:
„theoriefähige Idealisierung“ (W. KUHN)

Linearisierung, Reduzierung der Dimension, ...

- Eine Theorie wird oft erst nachprüfbar anhand von Modellen.
„Konstitution der empirischen Signifikanz“ (FERTIG)

kosmolog. Modelle als spez. Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

- Eine Theorie wird oft erst anschaulich, populär durch
idealisierende Modelle

Planetarium, Demonstrationsmodelle

Züge, Bahnsteige, Blitze (Spezielle Relativitätstheorie)

Modell: Vorstufe / Idealisierung einer allgemeinen Theorie

- Vereinfachung der mathematischen Struktur:
„theoriefähige Idealisierung“ (W. KUHN)

Linearisierung, Reduzierung der Dimension, ...

- Eine Theorie wird oft erst nachprüfbar anhand von Modellen.
„Konstitution der empirischen Signifikanz“ (FERTIG)

kosmolog. Modelle als spez. Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

- Eine Theorie wird oft erst anschaulich, populär durch idealisierende Modelle

Planetarium, Demonstrationsmodelle

Züge, Bahnsteige, Blitze (Spezielle Relativitätstheorie)

Modell: Vorstufe / Idealisierung einer allgemeinen Theorie

- Vereinfachung der mathematischen Struktur:
„theoriefähige Idealisierung“ (W. KUHN)

Linearisierung, Reduzierung der Dimension, ...

- Eine Theorie wird oft erst nachprüfbar anhand von Modellen.
„Konstitution der empirischen Signifikanz“ (FERTIG)

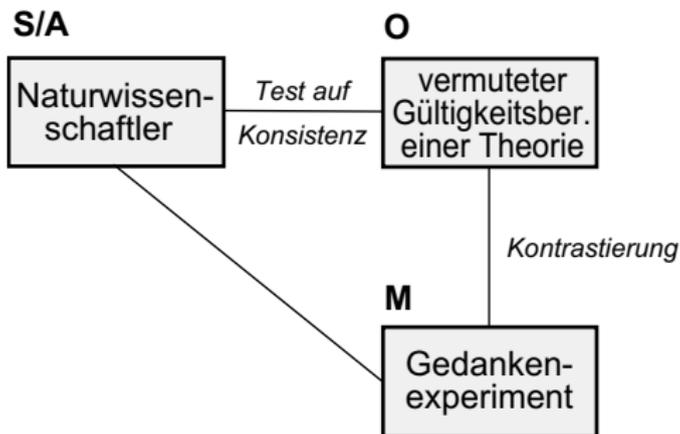
kosmolog. Modelle als spez. Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

- Eine Theorie wird oft erst anschaulich, populär durch idealisierende Modelle

Planetarium, Demonstrationsmodelle

Züge, Bahnsteige, Blitze (Spezielle Relativitätstheorie)

Modell: Gedankenexperiment

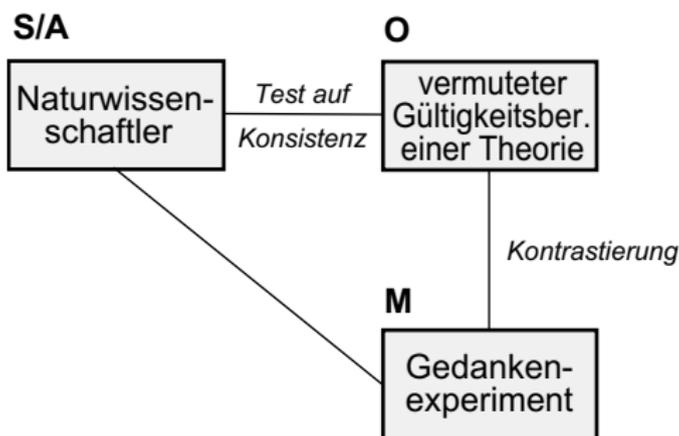


Fiktive Situation, um

- Gültigkeitsbereich
- Widerspruchsfreiheit (Konsistenz)

einer Theorie zu testen.

Modell: Gedankenexperiment



LAPLACE'scher Dämon

MAXWELL'scher Dämon

Zwillingsparadoxon

EINSTEIN-BOHR-Debatte

SCHRÖDINGER'sche Katze

Klass. Mechanik; Determinismus

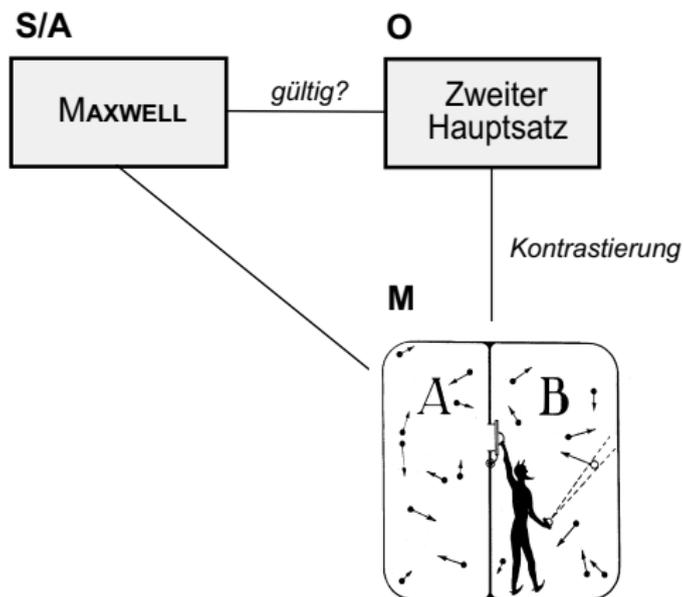
Zweiter Hauptsatz (Entropiesatz)

Spezielle Relativitätstheorie

Quantenmechanik (gültig?)

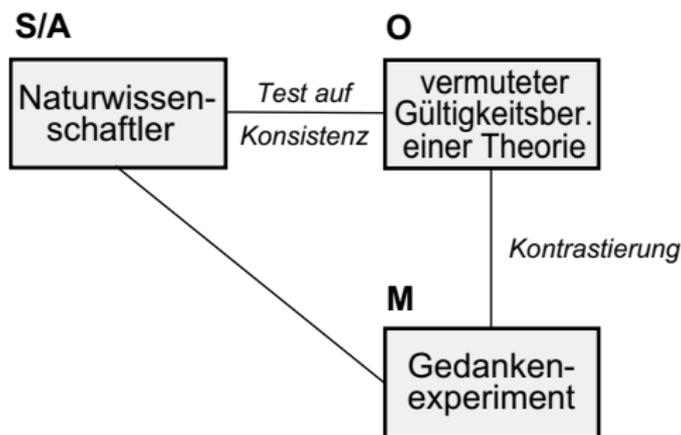
Quantenmechanik (Messprozess?)

Modell: Gedankenexperiment



Gilt der Zweite Hauptsatz (Entropiesatz) auch bei Beobachtern?

Modell: Gedankenexperiment



Vertieftes Verständnis durch Variation der Theorie:

Was wäre, wenn ... ?

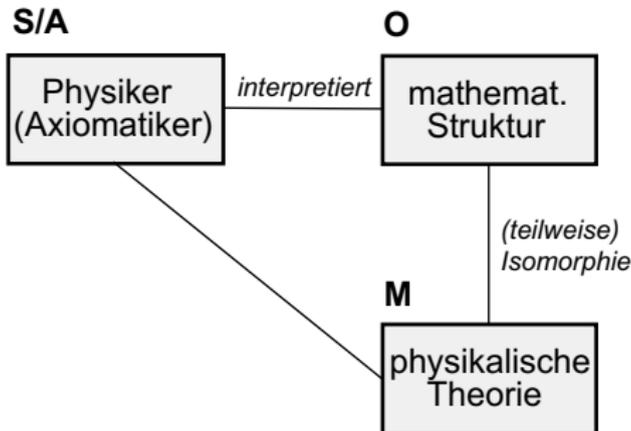
Was wäre, wenn Raum und Zeit andere Dimensionen hätten?

Was wäre, wenn die Naturkonstanten andere Werte hätten?

(Anthropisches Prinzip)

Science fiction als Stimulans künftiger Technik

Modell: Physikalische Interpretation einer mathematischen Struktur

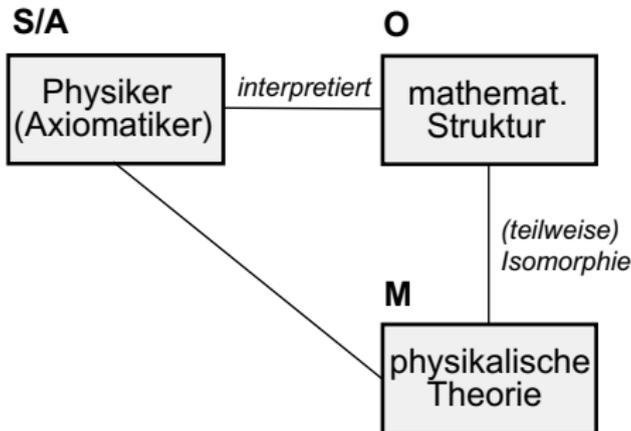


Eine mathematische Struktur wird physikalisch interpretiert.
Nähe zum mathematischen Modellbegriff

skalare Funktion einer Variablen
Vektoranalysis

zeitveränderlicher Ort $x(t)$
Elektrodynamik

Modell: Physikalische Interpretation einer mathematischen Struktur



Mathematische Strukturen haben oft mehrere Modelle:

Dgln. 2. Ordnung mit konst. Koeff. mechanische, elektr. Schwingungen

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)**
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Was ist ein System?

„System“ umgangssprachlich:

Ganzheit . . .

- aus miteinander verknüpften Teilen
„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“ (ARISTOTELES)
- „vom Rest der Welt“ abgegrenzt

Denken in Systemen: Berücksichtigung der Verknüpfungen der Teile

Problem:

Es existieren unterschiedliche Systemtheorien
(Biologie, Elektrotechnik, Soziologie)

hier: **Allgemeine Systemtheorie** (ROPOHL 1978)

Was ist ein System?

„System“ umgangssprachlich:

Ganzheit . . .

- aus miteinander verknüpften Teilen
„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“ (ARISTOTELES)
- „vom Rest der Welt“ abgegrenzt

Denken in Systemen: Berücksichtigung der Verknüpfungen der Teile

Problem:

Es existieren unterschiedliche Systemtheorien
(Biologie, Elektrotechnik, Soziologie)

hier: **Allgemeine Systemtheorie** (ROPOHL 1978)

„Gibt es“ Systeme?

Materialistische Erkenntnistheorie:

„Systeme existieren als geordnete ganzheitliche Gebilde objektiv.“

Üblicher Sprachgebrauch:

Sonnensystem, Ökosystem, politisches System.

Gegenposition der **Allgemeinen Systemtheorie** (ROPOHL):

„Systeme [. . .] sind kognitive Organisationsinstrumente, keine Wesenheiten. Im strengen Sinne ‚ist‘ ein System nach dieser Auffassung nicht mehr und nicht weniger als die systemtheoretische Darstellung des Gegenstandes; ein System ist ein Modell, das sich der Mensch von der Realität macht.“

KORNWACHS: *„Jedes System hat einen Autor.“* (Perspektivität der Systembeschreibung)

„Gibt es“ Systeme?

Materialistische Erkenntnistheorie:

„Systeme existieren als geordnete ganzheitliche Gebilde objektiv.“

Üblicher Sprachgebrauch:

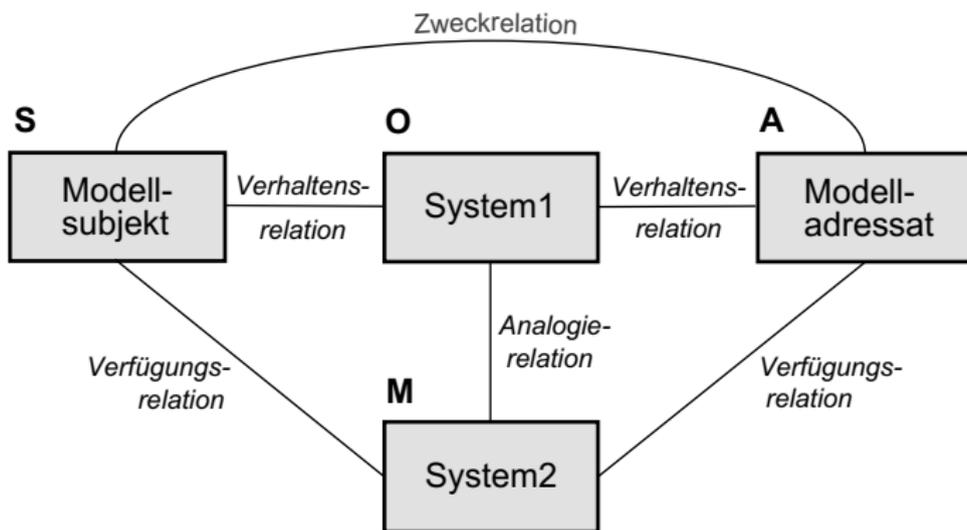
Sonnensystem, Ökosystem, politisches System.

Gegenposition der **Allgemeinen Systemtheorie** (ROPOHL):

„Systeme [. . .] sind kognitive Organisationsinstrumente, keine Wesenheiten. Im strengen Sinne ‚ist‘ ein System nach dieser Auffassung nicht mehr und nicht weniger als die systemtheoretische Darstellung des Gegenstandes; ein System ist ein Modell, das sich der Mensch von der Realität macht.“

KORNWACHS: *„Jedes System hat einen Autor.“* (Perspektivität der Systembeschreibung)

Modell und System



Modell (im engeren Sinn) *ist* ein System.
 Modell (im weiteren Sinn) *verknüpft zwei* Systeme

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)**
 - Systemkonzepte**
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Der mathematische Systembegriff

S. C. KLEENE (1909-1994):

„Ein System ist eine Menge von Objekten, zwischen denen gewisse Relationen bestehen.“

Präziser:

Relativ (oder Relationengebilde).

Dies ist eine Menge M , in der eine endliche Folge von Relationen gegeben ist: $(M; R_1, R_2, \dots, R_n)$.

R_n ist eine n -stellige Relation:

Untermenge der Menge der geordneten n -Tupel (a_1, a_2, \dots, a_n)
mit $a_i \in M$.

Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)

S. C. KLEENE (1909-1994):

„Ein System ist eine Menge von **Objekten**, zwischen denen gewisse **Relationen** bestehen.“

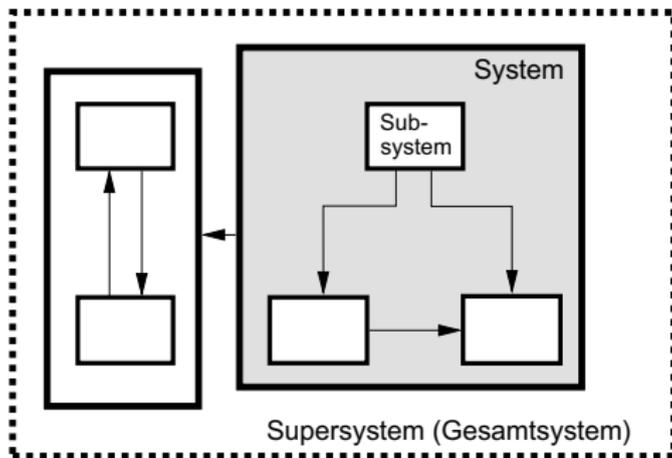
Daraus ergeben sich durch *partielle Interpretation* drei Konzepte:

| | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| mathemat. Systembegriff | struktureles Systemkonzept | hierarchisches Systemkonzept | funktionales Systemkonzept |
| Objekt | Element (strukturlos) | Subsystem (Elem. u. Rel.) | Attribute: Input, Output, Zustand |
| Relation | Relation | Relation | mathem. Funktion |

Struktureles Systemkonzept

- Entspricht dem mathematischen Systemkonzept
- Die Elemente werden als strukturlos angesehen.
Sie haben keine innere Struktur
bzw. ihre innere Struktur interessiert nicht.
- Ansatz für „unphysikalische“ Objekte
Wechselwirkung von Atomen → „*Wechselwirkung*“ von PKWs

Hierarchisches Systemkonzept



Beispiele:

- *Makrozustand – Mikrozustand (Thermodynamik)*
- *Metasprache – Objektsprache*
- *Volkswirtschaft – Betrieb – Betriebsrat*

Hierarchisches Systemkonzept

Wahl der **Hierarchie-Ebene** nach Interesse und Zweckmäßigkeit:

- Messgenauigkeit beim Experiment
- welche makroskopischen Variablen?
- welche zeitlichen und räumlichen Skalen?

Bei welcher Ebene gewinnt man am meisten Verständnis
(bei vertretbarem Aufwand)?

Probleme:

Gibt es oberste / unterste Ebene?

Reduktionismus oder Beliebigkeit der Ebene?

Hierarchisches Systemkonzept

Wahl der **Hierarchie-Ebene** nach Interesse und Zweckmäßigkeit:

- Messgenauigkeit beim Experiment
- welche makroskopischen Variablen?
- welche zeitlichen und räumlichen Skalen?

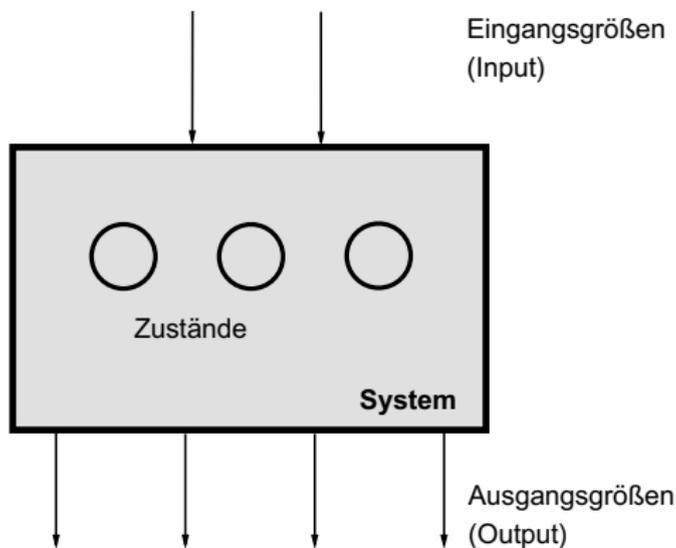
Bei welcher Ebene gewinnt man am meisten Verständnis
(bei vertretbarem Aufwand)?

Probleme:

Gibt es oberste / unterste Ebene?

Reduktionismus oder Beliebigkeit der Ebene?

Funktionales Systemkonzept



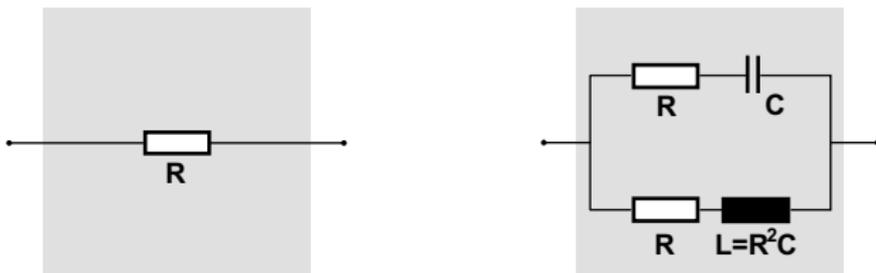
Beispiele:

- Getränkeautomat
- Verkehrsampel
- phänomenologische Thermodynamik

Funktionales Systemkonzept

Problem: Wie hängen Struktur und Funktion zusammen?

Beispiel:



Elektrische Zweipole mit unterschiedlicher Struktur
aber gleicher Funktion bzgl. Wechselstrom

Funktionales Systemkonzept

Beispiel: Phänomenologische Thermodynamik

Materie allein durch makroskopische Zustandsgrößen und Austausch mit Umgebung charakterisiert.

| Benennung des thermodynamischen Systems | alleiniger Austausch von | | |
|---|--------------------------|-------|------------|
| | Arbeit | Wärme | Stoffmenge |
| isoliert (<i>abgeschlossen</i>) | - | - | - |
| wärmeisoliert (<i>adiabat</i>) | ● | - | - |
| arbeitsisoliert | - | ● | - |
| geschlossen (<i>masseisoliert</i>) | ● | ● | - |
| offen | ● | ● | ● |
| offen, arbeitsisoliert | - | ● | ● |

Komplexe Systeme

Komplizierte Systeme: viele verschiedene Elemente

Komplexe Systeme:

- **Wechselwirkung** der Elemente wesentlich; oft nichtlinear; nicht reduzierbar auf Eigenschaften der Elemente
- dennoch häufig: einfache Algorithmen beschreiben komplexes Verhalten
- **Emergenz:** Auftauchen überraschender Eigenschaften auf einer Beschreibungsebene durch Wechselwirkung auf einer anderen („tieferen“) Ebene
- oft: **Offene Systeme**, nicht im Gleichgewicht

Komplexe Systeme

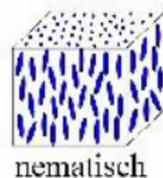
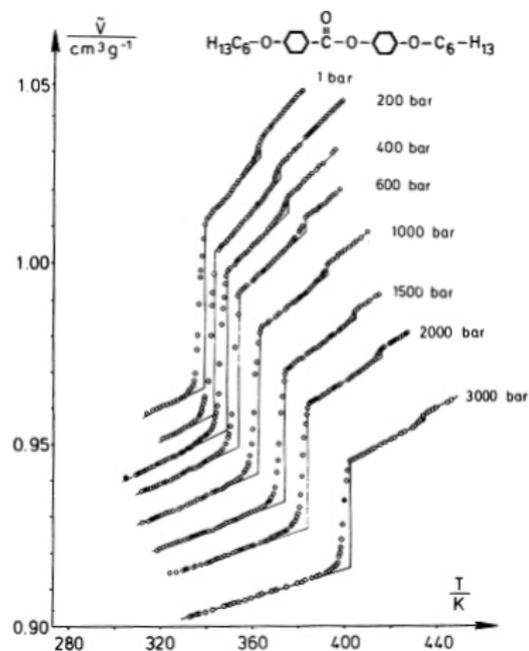
Komplizierte Systeme: viele verschiedene Elemente

Komplexe Systeme:

- oft: **Selbstorganisation, Homöostase, adaptives Verhalten**
- manchmal **empfindlich auf Anfangsbedingungen (Chaos);**
- manchmal **Attraktoren**
- falls **veränderlicher Komplexitätsgrad:**
u.U. nicht mehr vollständig deterministisch beschreibbar
(KORNWACHS 1984)

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)**
 - Systemkonzepte
 - Beispiele**
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung

Beispiel: Phasenübergang in Flüssigkristallen



Phasenum-
 wandlung

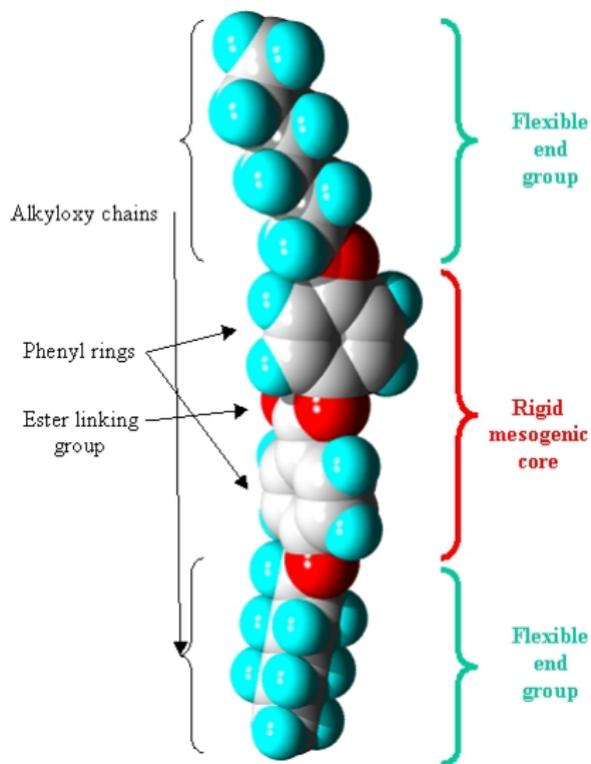
← Klärpunkt →



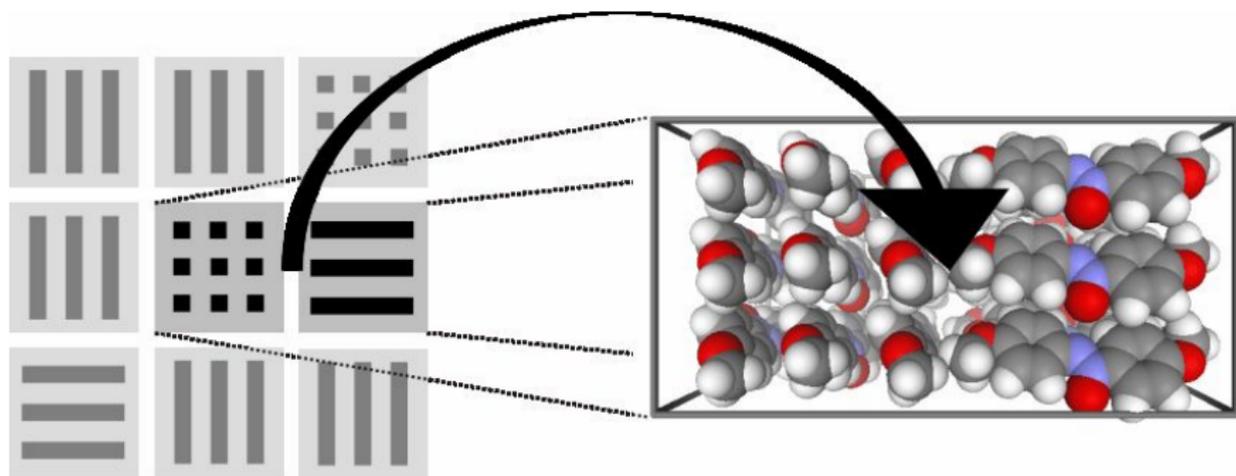
(nach: AG Schneider, Univ. Siegen)

(Angew. Physik, Univ. Ulm)

Beispiel: Phasenübergang in Flüssigkristallen



Beispiel: Phasenübergang in Flüssigkristallen



Atome als Elemente:

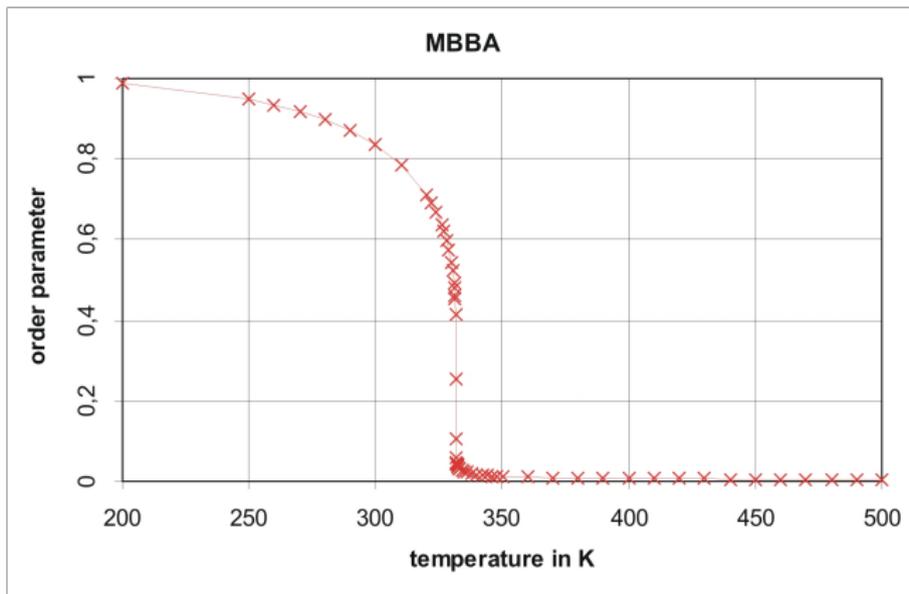
Berechnung von Grenzflächenenergien

Cluster als Elemente:

Statistische Mechanik

wechselwirkender, rotierender Cluster (3d-IsING)

Beispiel: Phasenübergang in Flüssigkristallen



Nematisch-isotroper Phasenübergang in MBBA
(anisotropes 3d-ISING-Modell; Monte-Carlo-Simulation)

Beispiel: Verkehrsfluss

Makroskopisches Modell:

Hydrodynamische Modellierung (LWR-Modell)

Fahrzeugdichte $\rho(x, t)$; durchschnittliche Geschwindigkeit $v(x, t)$

Problem: zeigt keine spontane Staubildung (Gleichgewichtsmodell)

Mikroskopisches Modell:

Zellularautomat: diskret in Raum, Zeit und den Zustandsvariablen

besonders geeignet für Computersimulationen

Das NAGEL-SCHRECKENBERG-Modell (NaSch-Modell) zeigt spontane Staubildung.

Beispiel: Verkehrsfluss

Makroskopisches Modell:

Hydrodynamische Modellierung (LWR-Modell)

Fahrzeugdichte $\rho(x, t)$; durchschnittliche Geschwindigkeit $v(x, t)$

Problem: zeigt keine spontane Staubildung (Gleichgewichtsmodell)

Mikroskopisches Modell:

Zellularautomat: diskret in Raum, Zeit und den Zustandsvariablen

besonders geeignet für Computersimulationen

Das NAGEL-SCHRECKENBERG-Modell (NaSch-Modell) zeigt spontane Staubildung.

Beispiel: Verkehrsfluss

Konfiguration zur Zeit t :



Schritt (1) - Beschleunigen ($v_{\max} = 5$):



Schritt (2) - Bremsen:



Schritt (3) - Trödeln ($p = 1/3$):

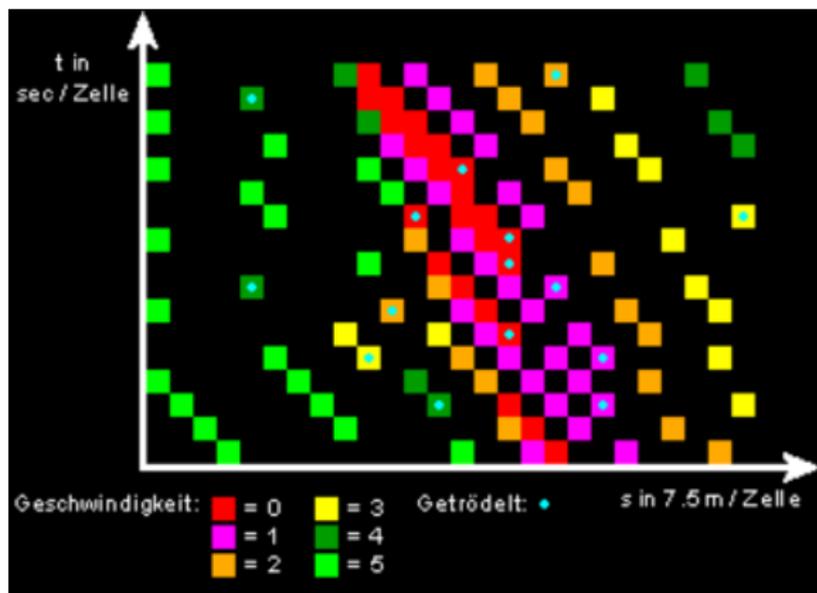


Schritt (4) - Fahren (= Konfiguration zur Zeit $t + 1$):



Zellularautomat (NAGEL und SCHRECKENBERG 1992)

Beispiel: Verkehrsfluss

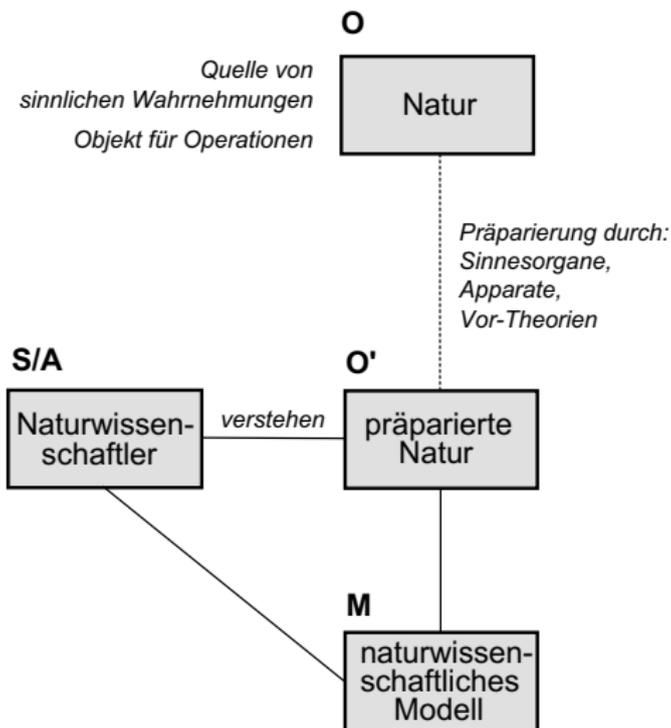


Staubildung (NAGEL und SCHRECKENBERG 1992)

- 1 Einleitung
- 2 Allgemeine Modelltheorie (STACHOWIAK, KLAUS, STEINMÜLLER)
 - Elemente und Relationen des Modellbegriffs
- 3 Modelle in der Physik
 - Varianten physikalischer Modelle
- 4 Allgemeine Systemtheorie (ROPOHL)
 - Systemkonzepte
 - Beispiele
- 5 Grenzen der physikalischer Modellbildung**

Grenzen der physikalischen Modellbildung

Modellbildung: Präparierte Natur



Grenzen der Modellbildung

relative Grenzen – veränderlich mit der Zeit

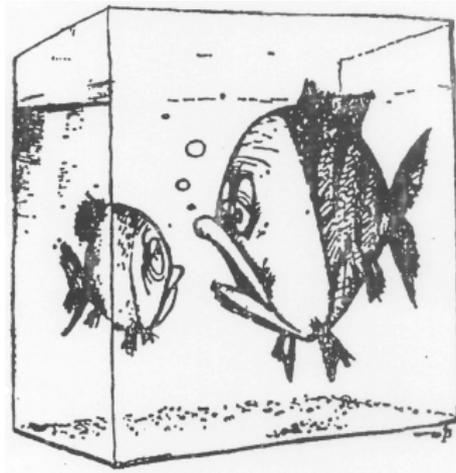
absolute Grenzen – unveränderlich (methodenbedingt)

Relative Grenzen

- Stand der Technik
 - Rechenleistung von Computern
 - Präzision der Geräte
 - ...
- Grenzen des Wissens
 - Strings
 - Quantengravitation
 - dunkle Materie
 - dunkle Energie
 - Multiversum
 - Telekinese
 - ...

Absolute Grenzen

Alle Modelle haben einen prinzipiell hypothetischen Charakter.
(W. STEGMÜLLER)



„Die Welt, mein Sohn, ist ein großer Kasten voller Wasser.“

Absolute Grenzen

- Die Verwendung der Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:
 - Beschränkung auf Gesetze (Gegensatz: Geschichtswissenschaft)
Notwendigkeit – Zufall Kontingenz?
 - Typisierung; Ausblendung des Individuellen, Personalen
 - Präparierung des Funktionsaspektes
Wie . . . in Raum und Zeit?

Absolute Grenzen

- Die Verwendung der Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:
 - Beschränkung auf Gesetze (Gegensatz: Geschichtswissenschaft)
Notwendigkeit – Zufall Kontingenz?
 - Typisierung; Ausblendung des Individuellen, Personalen
 - Präparierung des Funktionsaspektes
Wie . . . in Raum und Zeit?

Absolute Grenzen

- Die Verwendung der Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:
 - Beschränkung auf Gesetze (Gegensatz: Geschichtswissenschaft)
Notwendigkeit – Zufall Kontingenz?
 - Typisierung; Ausblendung des Individuellen, Personalen
 - Präparierung des Funktionsaspektes
Wie . . . in Raum und Zeit?

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

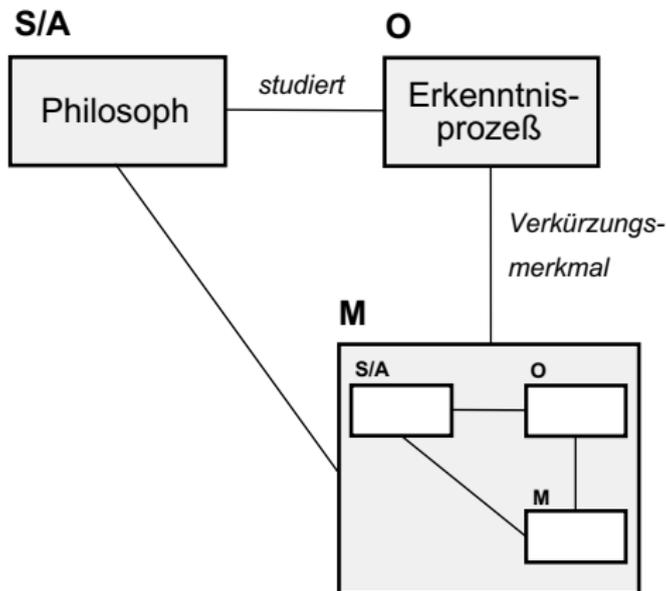
Absolute Grenzen

- Die Strukturwissenschaft *Mathematik* bedingt:

Blindheit für ...

- Qualitäten (*„rot“ ist mehr als eine Frequenz*)
- ästhetische Fragen (*Warum ist das schön?*)
- Werte (H. STAUDINGER)
keine Werturteile über Objekte der Untersuchung
aber eigene Werte: Wahrheitsanspruch
- ethische Fragen (*Darf man ... , ist es gut ... ?*)
- Zwecke, Absichten (*Wozu ist dieses Gerät da?*)
- Wesensfragen (*Was ist eigentlich ... ?*)
- Sinn- und Zielfragen (*Wozu, wohin, warum ... ?*)

Absolute Grenzen



STACHOWIAK:

Die Modelltheorie „ist selbst nur ein Modell, ein Erkenntnisgebilde, für das lediglich modellistische und damit pragmatische Rechtfertigungsgründe geltend gemacht werden können.“

Danke!