Universität Hamburg

Department
Informatik
Arbeitsbereich
Kognitive Systeme (KOGS)

64-350 Multidimensionale und Multimodale Signale

Wintersemester 2014/15

Vorlesung Di 10-12 & Do 12-14 Uhr

Prof. H. Siegfried Stiehl

Übungen Di 8-10 Uhr

Doreen Jirak und Benjamin Seppke

Teile der Vorlesung basieren auf Inhalten der Diplomvorlesung STH

„Theoretische Informatik ist die Suche nach der Mathematik in der Informatik"

(H. Langmaack*, 1996)

*Vortrag im Rahmen des Festkolloquiums
„Informatik: Stand, Trends und Visionen"
anlässlich der Feierlichkeiten zu
„25 Jahre Informatik an der Universität Hamburg",
29. November 1996

Modulbeschreibung:

Master-Wahlpflichtmodul

Modulkennung: WPM5

Studiengang: Bachelorstudiengang Informatik, Masterstudiengang Informatik

Lehrveranstaltungen:

4 SWS Vorlesung Multidimensionale und Multimodale Signale

2 SWS Übungen (Präsenzübungen, Kleingruppen auch im Labor)

Bezüge zu anderen Modulen:

- Im konsekutiven Masterstudiengang: Das Modul vermittelt Grundlagenkenntnisse der System- und Signaltheorie, die in zahlreichen Vertiefungen, insbesondere im Bereich der Intelligenten Systeme, zum Einsatz kommen.
- In anderen Studiengängen: Das Modul eignet sich ebenfalls als Bestandteil von Wirtschafts- und Bioinformatik-Studiengängen. Darüber hinaus ist ein Einbringen als Wahlmodul naturwissenschaftlicher Studiengänge denkbar.

Modulvoraussetzungen im Bachelor-Studiengang Informatik:

- Verbindlich: 72 Leistungspunkte, Softwareentwicklung I, Softwareentwicklung II, Algorithmen und Datenstrukturen, Analysis und Lineare Algebra
- Empfohlen: Rechnerstrukturen, Diskrete Mathematik

Modulvoraussetzungen im Master-Studiengang Informatik: keine

Modulbeschreibung:

Semester, Studienjahr /-phase:

Studienabschnitt: 2 (bzw. 3 bei Master-Studium mit Zulassung im SoSe)

Referenzsemester:

keines

Prüfungsleistungen

Die Zulassung zur Modulprüfung setzt die regelmäßige und erfolgreiche Teilnahme an Übungen/Seminar/Praktikum voraus; die Teilnahme an Übungen/Praktikum gilt grundsätzlich als erfolgreich, wenn alle Aufgaben bearbeitet und mindestens 50% richtig gelöst wurden; die Teilnahme an einem Seminar gilt grundsätzlich als erfolgreich, wenn das zugeordnete Themenfeld verstanden, angemessen präsentiert und ggf. angemessen schriftlich aufgearbeitet wurde; im Falle abweichender Kriterien müssen diese zu Beginn der Veranstaltung bekannt gemacht werden. Gemeinsame Modulprüfung für alle Lehrveranstaltungen des Moduls; mündlich und in der Unterrichtssprache.

Bewertung

Gesamt: 9 Leistungspunkte
(Multidimensionale und multimodale Signale: 5 Leistungspunkte, Übungen/Seminar/Praktikum zu Multidimensionale und multimodale Signale: 4 Leistungspunkte)

Modulbeschreibung:

Periodizität:

Sommersemester, jährlich,

Dauer:

1 Semester

Methodische Aufbereitung und Medienformen:

Vorlesung mit Beamer, Overhead-Folien und Tafel

Vorlesungs- und Übungsmaterial wird online zur Verfügung gestellt

Erwartete Aktivitäten der Studierenden:

Vor- und Nachbereitung der Vorlesungsinhalte, selbständiges Bearbeiten von Übungsaufgaben, aktive Mitarbeit in den Präsenzübungen und Kleingruppen

Stellung im Master-Studienplan:

WS1	Formale Grundlagen der Informatik III (2)		Wahlpflicht	Vertiefung	Wahl Ergänzung / integr. Anwendung
SS1	Semi-nar	Freier Wahl-bereich	Wahlpflicht	Vertiefung	Wahl Ergänzung / integr. Anwendung
WS2	Projekt (3)		Wahlpflicht	Vertiefung	Wahl Ergänzung / integr. Anwendung
SS2	Masterarbeit				

Stellung im Master-Studienplan:

<table>
<tr><td>WS1</td><td colspan="2">Formale Grundlagen der Informatik III (2)</td><td>Wahlpflicht</td><td>Vertiefung</td><td>Wahl
Ergänzung /
integr. Anwendung</td></tr>
<tr><td>SS1</td><td rowspan="2">Semi-
nar

Projekt
(3)</td><td rowspan="2">Freier
Wahl-
bereich</td><td>Wahlpflicht</td><td>Vertiefung</td><td>Wahl
Ergänzung /
integr. Anwendung</td></tr>
<tr><td>WS2</td><td>Wahlpflicht</td><td>Vertiefung</td><td>Wahl
Ergänzung /
integr. Anwendung</td></tr>
<tr><td>SS2</td><td colspan="5">Masterarbeit</td></tr>
</table>

Wahlmöglichkeiten:

- Interactive Visual Computing
- Datenbanken und Informationssysteme
- <u>Multidimensionale und Multimodale Signale</u>
- Verteilte Systeme und Informationssicherheit
- Algorithmik
- Algorithmisches Lernen

Zur Person:

Akademischer Lebenslauf:

1998-2003	Studium Informatik (Diplom) an der Universität Hamburg
2003-2007	Promotionsstudium; wiss. Mitarbeiter am Arbeitsbereich KOGS
2005	4 Monate Forschungsaufenthalt Philadelphia, USA
2007-2010	Vertretungsprofessor Arbeitsbereich KOGS
2010-2011	12 Monate Gastwissenschaftler am ICSI und Uni Berkeley, USA
2011-	Vertretungsprofessor Arbeitsgruppe BV

Lehrveranstaltungen SoSe 2013:

VL Multidimensionale und Multimodale Signale

VL Signalverarbeitung und Robotik in den Nanowissenschaften

Sem. Bildverarbeitung 2

Interessen:

2D/3D Bildverarbeitung, 3D Geometrieverarbeitung

Inhalte der Vorlesung:

18.350 Multidimensionale und Multimodale Signale

Gliederung:

"If you don't know what it is,
call it a system.

If you don't know how it works,
call it a process."

(Anonymous)

Real existierende Systeme

- Periodensystem, Nervensystem, Organsystem, Sehsystem, Gesellschaftssystem, HiFi-System, Zahlensystem, Ozean-Atmosphäre-System, Ökosystem, Planetensystem, Sonnensystem, ...
- Eigenschaften:

Eigenschaften:	verständlich	vs.	unverständlich
	komplex	vs.	simpel
	statisch	vs.	dynamisch
	kausal	vs.	final[1]
	linear	vs.	nichtlinear
	diskret	vs.	kontinuierlich

- System := Struktur + Verhalten

$$\begin{tikzcd}
\text{STRUKTUR} \arrow[rr, bend left, "\text{Dekomposition*}"] & & \text{ELEMENTE} \arrow[ll, bend left, "\text{Komposition*}"]
\end{tikzcd}$$

* bzgl. Element-Eigenschaften
und -Relationen

[1] siehe: Kausalität vs. Finalität (d.h. Bestimmung eines Geschehens nicht durch seine Ursachen, sondern seine Zwecke)

- Denotation[+] von System

Beobachtung: REALITÄT → MODELL

Formalisierung: MODELL → SYSTEM

Simulation des Verhaltens: SYSTEM ⇢ REALITÄT

Systemanalyse	vs.	Systemtheorie
eher: allgemeine EDV-Einsatz-untersuchung in Anwendungs-bereichen; Unternehmensfor-schung ("operations research")		**eher**: Elektro-/Nachrichtentechnik; Kybernetik; Informatik

Gegenstandsbereich (allgemeine Systemtheorie)

etwa: formale Beschreibung beliebiger Systeme

[+] Denotation: die auf den mit dem Wort gemeinten Gegenstand hinweisende Bedeutung (Ggs.: Konnotation)

Eine erste speziellere Definition

„... versucht ..., einen nicht überschaubaren Gesamtkomplex von **Naturerscheinungen** in möglichst **einfache** und zueinander nur in **schwacher Wechselwirkung** stehende Teilkomplexe aufzulösen, deren **mathematische Beschreibung** dann in der Regel keine Mühe macht. ...

Während aber die klassische Physik ... bei diesem Auflösungsprozeß die herauspräparierten Einzelerscheinungen selbst und das konkrete mathematische Gesetz des Zusammenspiels der ihnen entsprechenden Größen zum Gegenstand ... (machten), legt die

Systemtheorie ihr Augenmerk auf die
Struktur (formale Gestalt) des mathematischen
Zusammenhangs dieser physikalischen Größen.“

(aus [2], S. 3)

Historische Wurzeln des allgemeinen Erklärungsanspruchs

- Kybernetik
- Regelungstechnik
- NORBERT WIENER (1894 – 1964): Mitbegründer der Informationstheorie und „Vater“ bzw. Begründer der Kybernetik; Mathematiker
  zur Person: mit 11 J. Eintritt in College; mit 18 J. Promotion (Harvard); 40 Jahre Prof. für Mathematik am MIT; beherrschte 13 Sprachen; bedeutende Beiträge zu Schaltungs-/Rechnerentwurf, Radartechnik, Nachführsysteme; Warner vor Mißbrauch der modernen Wissenschaft und Technik; viele bedeutende Schüler (z.B. Amar G. Bose, Elektroakustiker)

WIENERS Sicht

- frühe Erkenntnis der Notwendigkeit **interdisziplinärer** Teams
- These der „... **Einheit** der Probleme der Nachrichtenübertragung, Regelung und der statistischen Mechanik ..., sowohl bei der **Maschine** wie im lebenden **Gewebe**...“ (ibid; S. 32)
- Erkenntnis der Bedeutung der Rückkopplung in (Regelungs-)Systemen[2], z.B. negative Rückkopplung für Temperaturstabilisierung mit Thermostaten etc.

[2] so z.B. die Hypothese, dass charakteristische Handlungen des zentralen Nervensystems „... nur als Kreisprozesse erklärbar ...“ sind (ibid.; S. 28)

Einiges zur Kybernetik

Allgemeinste Definition (aus [1])

Kybernetik[3] [gr.], die; - :

1. Forschungsrichtung, die vergleichende Betrachtungen über **Gesetzmäßigkeiten** im Ablauf von **Steuerungs**- und **Regelungs**vorgängen in Technik, Biologie und Soziologie anstellt.
2. Lehre von der Kirchen- und Gemeindeleitung (evangel. Religion).

Themenbereich (vgl. Zeitschrift „Kybernetik", seit 1961)

„Nachrichtenübertragung, Nachrichtenverarbeitung, Steuerung und Regelung"

---

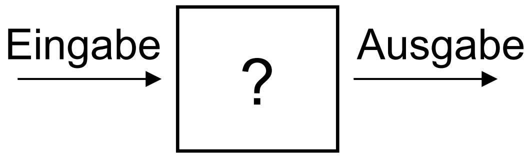
[3] von $\kappa\upsilon\beta\varepsilon\rho\nu\eta\tau\eta\varsigma$ – Steuermann; lat. Verfälschung zu "governor" – Fliehkraftregler (J. Watt, 1788)

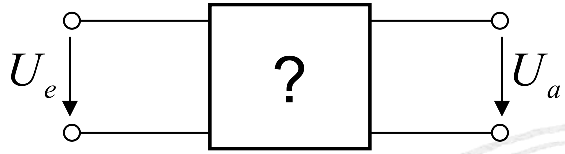
Erklärungsanspruch

„Wir haben beschlossen, das ganze Gebiet der Regelung und Nachrichtentheorie, ob in der Maschine oder im Tier, mit dem Namen «Kybernetik» zu benennen,...“

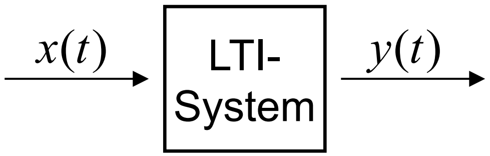
(aus [3], S.32)

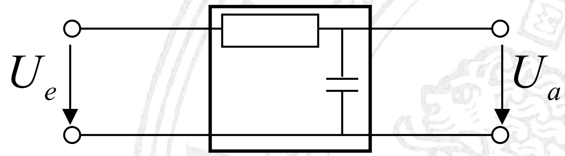
- Denken in "**boxes**"
  - i. "black box": „Apparateteil, der eine bestimmte Operation durchführt, aber für den wir nicht notwendigerweise irgendeine Information über die **Struktur** besitzen...“ (ibid., S. 13)





  - ii. "white box": mit bekannter Struktur, „übereinstimmend mit einem bestimmten Bauplan, um eine vorher bestimmte Eingangs-Ausgangs-Beziehung zu sichern...“ (dto.)





RC-Zweitor (Tiefpass)

- Skizze des **Problems** (I): formale Analyse

Eingang: Funktion f der Zeit t: $f(t), \; -\infty < t < \infty$

Ausgang: Funktion g der Zeit t mit fester Verzögerung τ: $g(t) = \int_0^{\infty} a(\tau) f(t-\tau) d\tau$

Eigenschaften:

- Kausalitätsprinzip, d.h. g ist ein „echter Operator auf $f(t)$, der eindeutig durch seine Vergangenheit bestimmt ist...“ (ibid., S. 129)
- Translationsinvarianz

$$g(t) = \int_0^{+\infty} a(\tau) f(t-\tau) d\tau$$

$$g(t+\sigma) = \int_0^{+\infty} a(\tau) f(t+\sigma-\tau) d\tau, \quad \sigma \geq 0$$

- Linearität

$$f(t) = A \cdot f_1(t) + B \cdot f_2(t)$$

$$g(t) = \int_0^{+\infty} a(\tau) f(t-\tau) d\tau$$

$$= A \int_0^{+\infty} a(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + B \int_0^{+\infty} a(\tau) f_2(t-\tau) d\tau$$

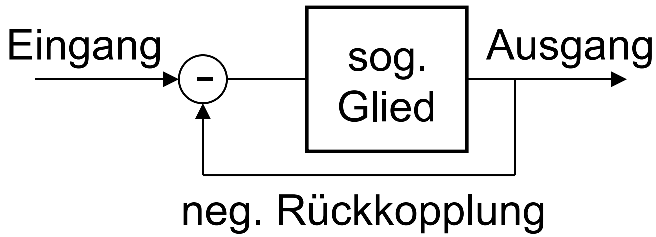
Frequenzdarstellung von $a(t)$

$$A(z) = \int_0^{+\infty} a(\tau) e^{-z\tau} d\tau, \qquad z = x + iy,\ z \in \mathbb{C},\ x, y \in \mathbb{R}$$

$$A(z) = \int_0^{+\infty} a(\tau) e^{-(x+iy)\tau} d\tau$$

$$A(z) = \int_0^{+\infty} a(\tau) e^{-x\tau} \cdot e^{-iy\tau} d\tau$$

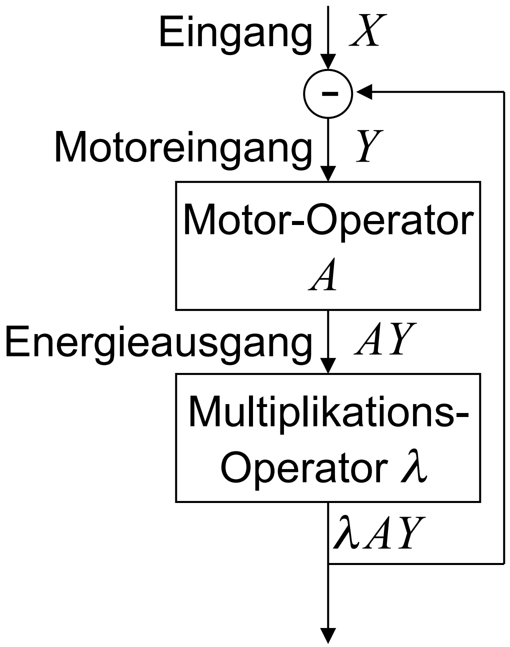
- WIENERS **Theorie** der linearen Regelsysteme (ibid.; S. 127)



→ Ziel ist die Analyse „... speziell seines fehlerhaften **Verhaltens** und seines in Schwingung-Geratens, wenn er falsch behandelt oder übersteuert wird...“ (ibid.; S. 127 → lineares **Schwingungssystem**)

→ Analogiebetrachtung Ruderregelung – Intentionstremor: Bedeutung für natürliche Systeme

Skizze des Problems (II): Analyse des Verhaltens



Verhalten, z.B. Stabilität?

$$Y = X - \lambda A Y = \frac{X}{1+\lambda A}$$

$$AY = X \underbrace{\frac{A}{1+\lambda A}} \rightarrow \infty, \text{für } A = -\frac{1}{\lambda}$$

→ durch den Regelkreis-Mechanismus erzeugter Regelkreis-Operator

- **Anwendungs**bereiche (→ Interdisziplinarität)

  Bio-, Neuro-, Öko-, Sozio-, Ökonomo-, Technokybernetik

  „Es sind diese Grenzgebiete der Wissenschaft, die dem qualifizierten Forscher die reichsten Möglichkeiten bieten. Sie sind aber gleichzeitig die widerspenstigsten gegen die eingefahrenen Techniken der Breitenarbeit und der Arbeitsteilung.“ (ibid.; S. 21/22)

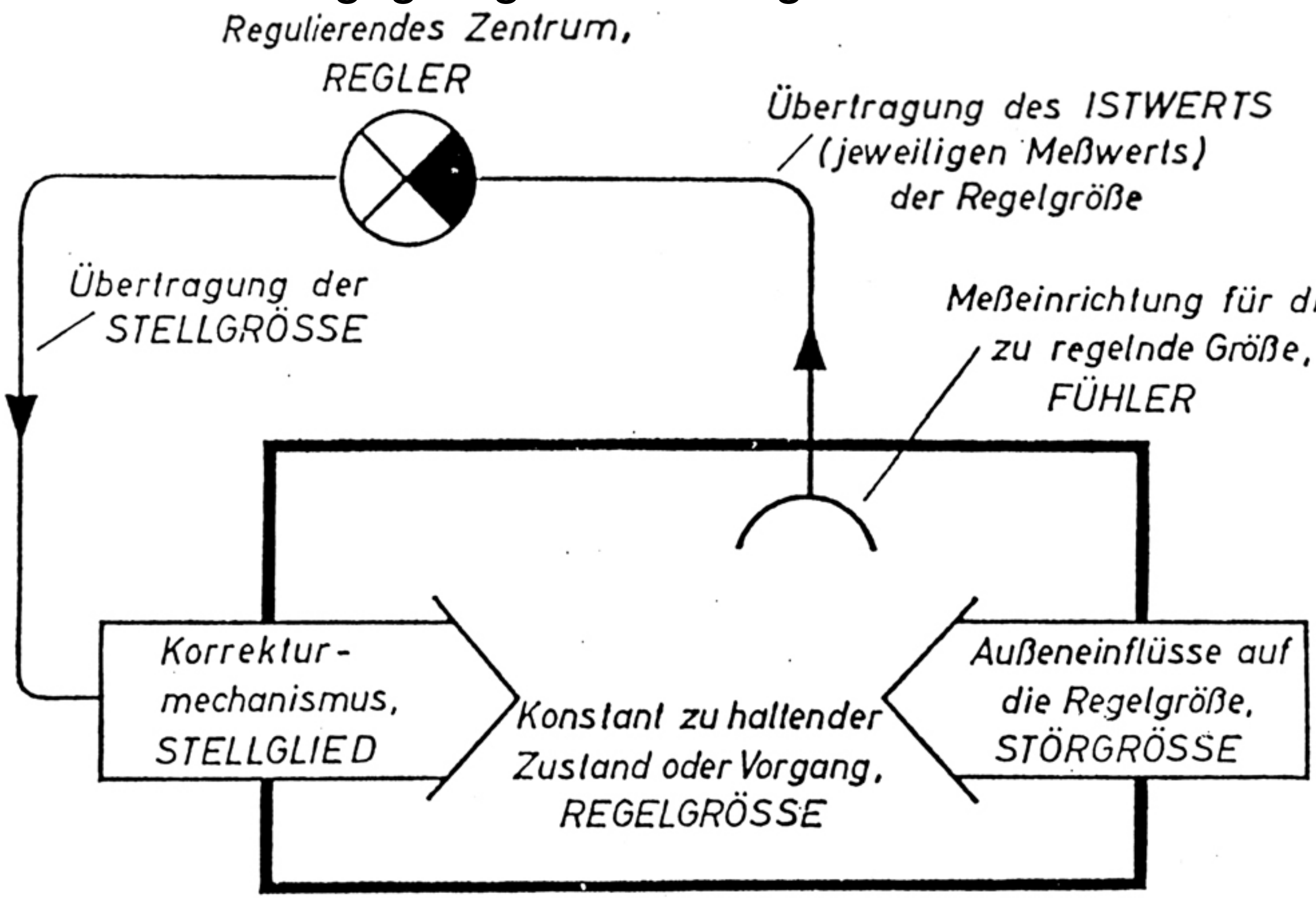
- **Credo** der Kybernetik

  „... eine der grundlegenden Programme der Wissenschaftsrichtung der Kybernetik, sich nicht mit einem ... Aufweisen von funktionellen Verwandtschaften und Analogien zu begnügen ..., sondern **neutrale Begriffe** zu verwenden und, falls nötig, neu zu schaffen, die das **funktionelle Gemeinsame** bezeichnen. ...
  Durch in diesem Sinne „abstrakten“, d.h. von Einzelheiten abstrahierten und infolgedessen **allgemeingültigen Begriffen** soll eine gemeinsame **geistige Plattform** geschaffen werden, auf der sich Biologen, Techniker und andere Fachleute ohne die Gefahr des Mißverstehens verständigen können.“ (aus [3], S. 45)

- **wissenschaftliche Schule** der Kybernetik
  - Kybernetik 2. Ordnung, Systemforschung, Kognitionswissenschaft, Konstruktionismus
  - herausragendste Vertreter: ROSS W. ASHBY, WARREN MCCULLOCH, MARGARET MEAD, JOHN V. NEUMANN, STAFFORD BEER, GREGORY BATESON, HEINZ V. FOERSTER, ...

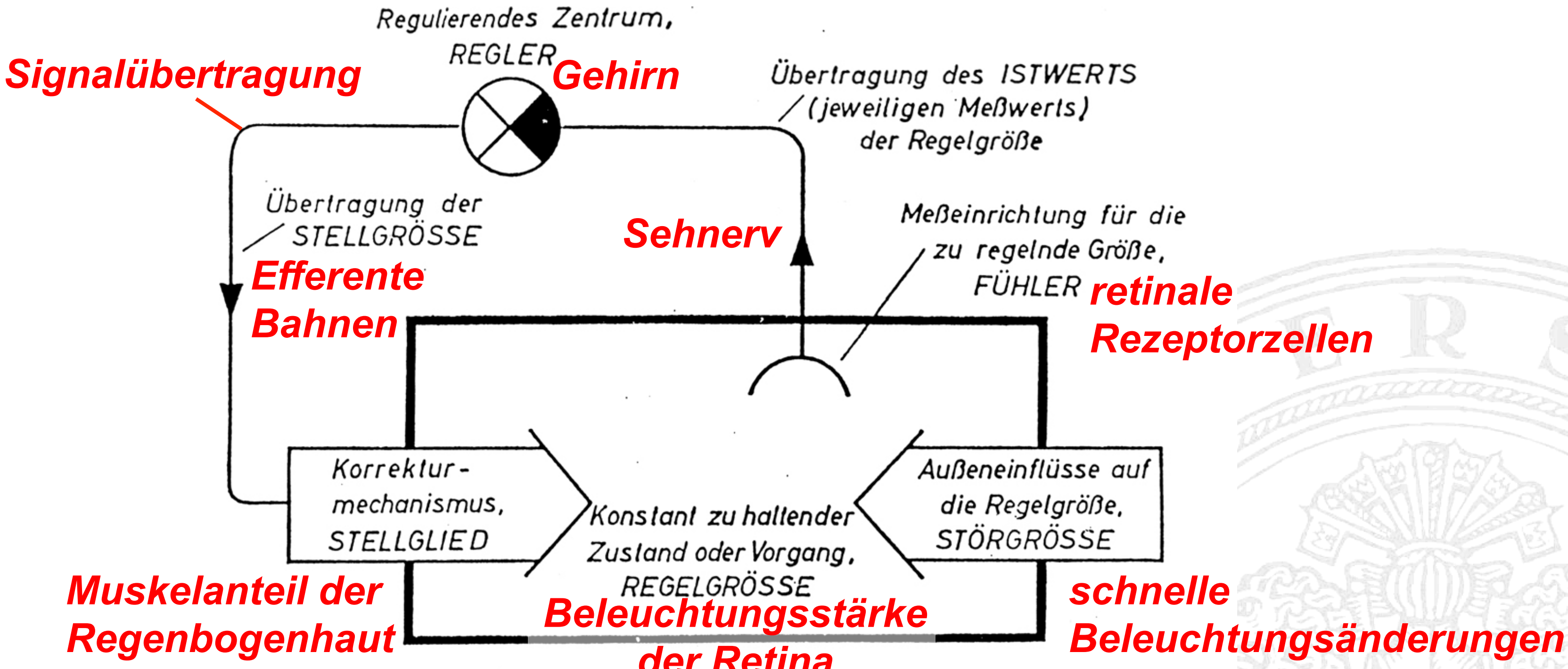
Fallbeispiel: Biokybernetik

Allgemeines Wirkungsgefüge eines Regelkreismechanismus (aus [3])



45,1. Allgemeines Wirkungsgefüge eines Regelmechanismus. Die in großen Buchstaben geschriebenen Wörter sind die genormten Fachausdrücke der Regelungstechnik.

- unstetige Regler: Zweipunktregler à la Thermostat
- stetige Regler: etwa
  - Pupillenreaktion (Beleuchtungsstärke der Netzhaut)
  - Blutumlauf durch Herztätigkeit
  - Atmung
  - Körpertemperatur bei Warmblütern



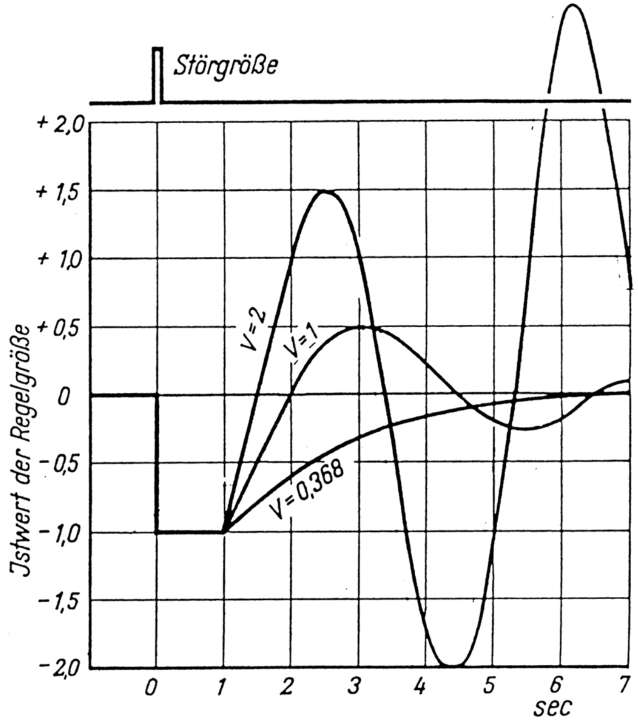
45,1. Allgemeines Wirkungsgefüge eines Regelmechanismus. Die in großen Buchstaben geschriebenen Wörter sind die genormten Fachausdrücke der Regelungstechnik.

Problem der Instabilität

(Schwingungen der Regelgröße bis hin zur „Reglerkatastrophe“)

- Totzeit: „... Zeitintervall, das nach einer Änderung der Regelgröße verstreicht, bis das Stellglied auf die Änderung zu reagieren beginnt.“ (ibid.; S.50)
- Verstärkung: (pos.) Gewichtung der Stellgrößen-Reaktion

51,1. Verhalten eines Regelkreises mit einer im Regler liegenden *Totzeit* von 1 sec bei drei verschiedenen Verstärkungen (V). Eine kurzdauernde *Störung* erzwingt zur Zeit t = 0 eine Regelabweichung von −1. Nach Ablauf der Totzeit beginnt die Tätigkeit des Stellglieds. Bei einer Verstärkung vom Betrag V = 1 kehrt die Regelgröße in Schwingungen abnehmender Schwingungsweite zum Sollwert (Regelgröße = 0) zurück. Die Verstärkung V = 2 läßt den Regelkreis instabil werden. V = 0,368 stellt den *aperiodischen Grenzfall* und damit den „idealen“ Regelkreis dar.
Zum Teil nach KÜPFMÜLLER und POKLEKOWSKI 1956, verändert.



⇒ „Reglerkatstrophe“

für $V = 2,\ T_t = 1\ s$

ebenso wie

für $V = 1,\ T_t = 2\ s$

ergo: Stabilität durch Bestimmung von $V = k \cdot T_t$

(k : Kennzahl der Reaktionsstärke des Stellgliedes)

Selbstexperiment

- künstlich erzeugte Instabilität des Pupillen-Regelkreises
- Hilfsmittel: mehrere Objektträger mit jeweils aufgeklebter kleiner Kreisscheibe ($D = 2{,}5\ ...\ 6{,}0\ mm$) aus schwarzem matten Papier

  Ort: mäßig beleuchteter Raum mit Blick auf helle Fläche

  Vorgehen: ein Auge abdecken; dann „Anpassung“ einer Kreisscheibe (durch Fixation) an Pupillengröße des freien Auges

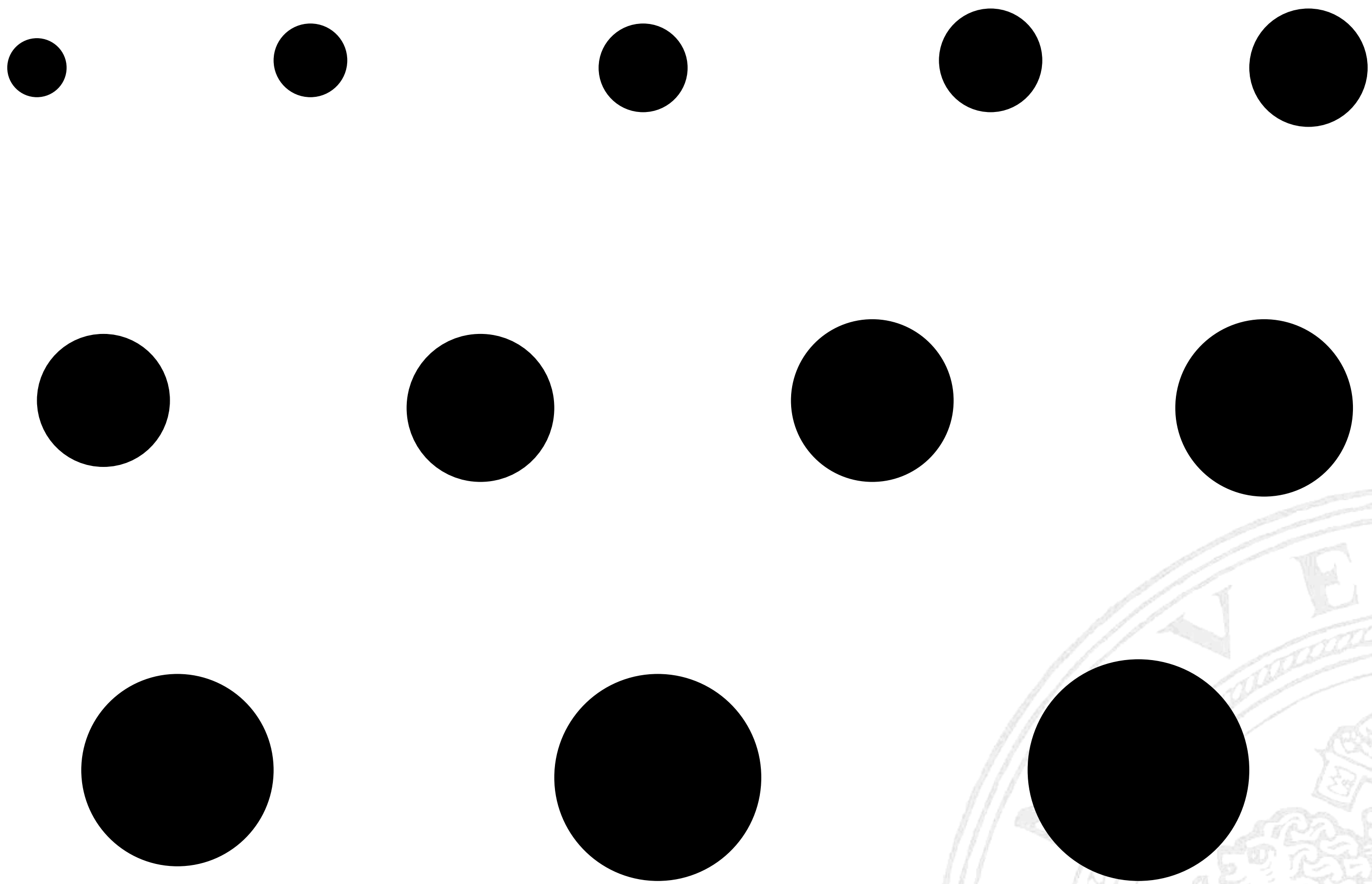
  Beobachtung: Pulsation mit ca. $1 - 2\ Hz$ bei „passender“ Scheibe

Wissenschaftliche Aussagen der Kybernetik

„Unter diesen oder jenen Voraussetzungen verhält sich ein System bestimmter Art folgendermaßen...“

hier: „Bei zunehmender innerer Verstärkung wird ein Regelkreis, anstatt die Regelgröße konstant zu halten, instabil und erzeugt Schwingungen zunehmender Schwingungsweite.“ (ibid.; S. 123)

allg.: „Gemeinsames aus Technik und Biologie mit Hilfe neutraler Begriffe wissenschaftlich zu erfassen.“ (ibid.; S. 133)



Dreiteilung der Aufgaben der Systemtheorie/Kybernetik

„1. Untersuchung der **Prozesse** der Aufnahme, der Übertragung, der Speicherung und der Verarbeitung von **Informationen** in realen Systemen

technischer
organischer oder
organisatorischer Natur,

abstrahiert von der Art ihrer speziellen Realisierung

2. **Untersuchung** der unter 1. gewonnenen **Strukturen** und ihre Erweiterung ohne Frage nach ihrer Realität, mit dem Ziel, allgemeine **Einsichten in die Verhaltensweise** kybernetischer Systeme zu gewinnen.

3. Anwendung der unter 2. gewonnenen allgemeinen **wissenschaftlichen Erkennt-nisse** über

Strukturen und Verhaltensweisen,

sei es mit dem **Ziel**, auf diese Weise im Sinne von

Modellvorstellungen und Hypothesen

zum **besseren Verständnis** existierender Organismen oder organisatorischer Systeme zu gelangen, sei es, um technische Systeme oder organisatorische Formen mit **gewünschten Eigenschaften schaffen zu können**."

(aus: [5], S. 11)

i.S.v. keiner exakten Beschreibung der Wirklichkeit selbst, sondern exakter **Modellierung** (siehe auch: → Modellbegriff)

Begriff des Systems (dto.)

- System als formales **Modell** eines real existierenden oder gedachten Systems
- Gesamtheit von **Elementen**, zwischen denen **Beziehungen** bestehen
- Vielfalt von Beziehungsarten/**Relationen**: strukturell, kausal, deterministisch etc.
- Gesichtspunkt gewisser **Gemeinsamkeiten** der Elemente
- **Hierarchisierung/Heterarchisierung**: Elemente eines Systems als Teilsysteme etc.
- **Kommunikation**, d.h. Austausch von Mitteilungen, gebunden an energetische Prozesse

  - Eigenschaften/Attribute der Welt, z.B. Farbe, Form, Potential etc.
  - Attribut: formales Objekt mit Belegung, dem eine Bedeutung zugeordnet wird (oder Sinn bzw. Semantik)

Messung physikalischer Ereignisse

↓ i.w.S. mathematisches Modell einer physikalischen Erscheinung

Signal

↓ Kodierung bzw. Umkodierung bei Trägerwechsel

Zeichen/Symbol

↓ Mitwirkung eines Bewusstsein besitzenden Individuums

Nachricht

↓ Reduktion von Unbestimmtheit/ Unsicherheit nach Erhalt

Information

Träger von Information: Signal, Zeichen/Symbol, Nachricht

Beschreibung eines formalen Systems

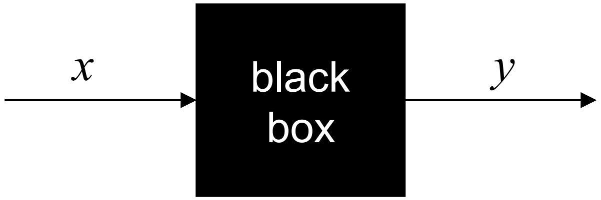
- **Beobachtung** des Phänomens, Auswahl von **Attributen** $A_1, A_2, ..., A_n$ mit Wertebereichen V_i
- Experimente zur Gewinnung der **Werte** von Attributen
- formales System $S \subset V_1 \times V_2 \times ... \times V_n$

  mit Dynamik falls $\exists\, V_i\colon \{v_i | v_i = f_i(t);\ t \in T\}$

  und $T = \{t | t_{min} \leq t \leq t_{max}\}$
- konstruktive **Beschreibung**: Input-Output-System

  z.B. $$\underbrace{\frac{dx_1}{dt}}_{\text{Ausgabegröße}} = \underbrace{k_1\left(k_2 x_2 + x_4 - x_3 - x_5\right)}_{\text{Eingabegrößen mit Konstanten}}$$
- System**zustände**: Eigenschaft (von „speichernder Natur“) des Systems, deren Belegung das System auf Grund der Vorgeschichte annimmt

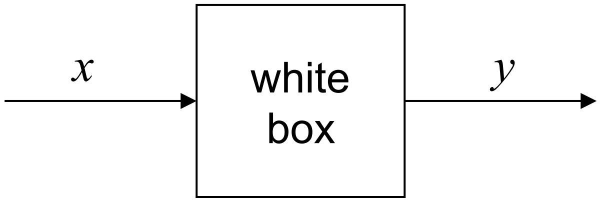
- **Verhaltensmodell**



Eingabe x, Ausgabe y
primärer und sekundärer Zustand

z.B. für diskrete Werte: abstrakter Automat
KLEENEsches Ereigniskalkül

- **Strukturmodell**



innere Elemente/ Attribute } a priori bekannt

! zur **Erklärung**/zum Verständnis der Verhaltensweise aus Struktur und bekanntem Verhalten z.B. der Elemente

z.B. binäre Systeme: RS - und JK -Flipflop
kontinuierliche Systeme: RC-Zweitor
etc.

Der einfach(st)e Fall: Lineare zeitinvariante[5] Systeme

Grundbegriffe

(aus [7], S. 13ff)

Linerares (Übertragungs-) Glied } LTI-System

Eingangssignal $x_e = x(t)$ $\xrightarrow{\text{EINGABE}}$ **black box** $\xrightarrow{\text{AUSGABE}}$ Ausgangssignal $x_a = y(t)$

URSACHE $\xrightarrow[\text{(WIRKUNGSWEG)}]{\text{RICHTUNG DER WIRKUNG}}$ WIRKUNG (oder: Reaktion, Antwort)

Änderung von physikal. Größen $\xrightarrow{\text{KAUSALITÄT (-SPRINZIP)}}$ zeitlich verzögerte Änderung von physikal. Größen

SIGNALÜBERTRAGUNG

(Beschreibung durch mathematisches Modell)

---

[5] "**l**inear **t**ime-**i**nvariant" oder LTI

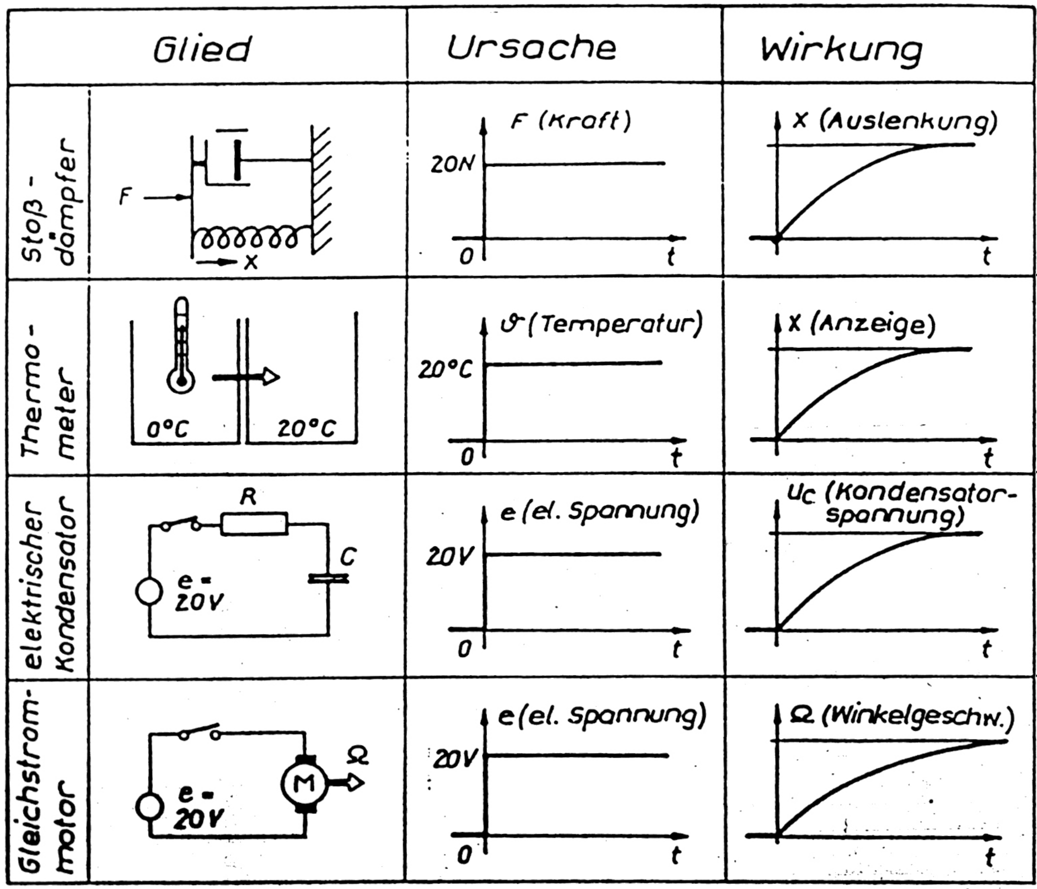


Bild 1.1. Bei verschiedenen Objekten können gleiche Ursachen (qualitativ) gleiche Wirkungen erzeugen.

$$F = \underbrace{f \cdot x}_{\text{Federkraft}} + \underbrace{d\frac{dx}{dt}}_{\text{Dämpfungskraft}}$$

Wärmekapazität

$$C\frac{dx}{dt} + \alpha x = \alpha\vartheta$$

Wärmeübergangskoeff.

$$RC\frac{dU_c}{dt} + U_c = e$$

Ausgangsspannung

Drehmoment

$$M = J\frac{d\Omega}{dt} + \underbrace{d\Omega}_{\text{induz. Gegenmoment}}$$

Trägheitsmoment

Beschleunigungsmoment

(aus [7], S. 14)

⇒ allgemeine Form: $T\frac{dx_\alpha}{dt} + x_\alpha = K \cdot x_e$ [6]

[6] Die o.g. Gleichungen aus ibid., S. 19-21, gelten nicht ohne Einschränkungen.

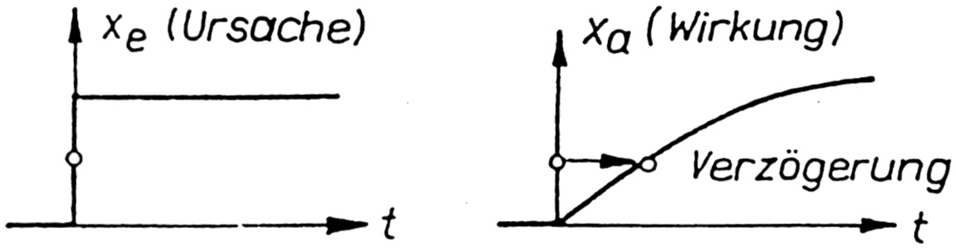


Bild 1.2. Besonders interessant ist die Verzögerung zwischen Ursachen und Wirkung (aus [7], S. 14)

Folgerungen:
- i) **Ähnlichkeit** der Beobachtungen
- ii) weitgehende **Unabhängigkeit** der Beobachtungen von der Natur der umgesetzten physikalischen Größen/Energien
- iii) Forderungen nach **Abstraktion** und allgemeingültiger Untersuchung

Der allgemein(st)e Systembegriff

„System ist eine Gesamtheit von Gliedern, die bei der Wirkungsübertragung durch Kopplungen miteinander verbunden sind. ...
Durch diese Kopplungen bekommt das System eine bestimmte Struktur, die dem System typische Eigenschaften verleiht. Das System kann ganz **andere**[7] Eigenschaften haben als seine Glieder.“ (ibid. S. 15)

- formale Darstellung über Notationen der mathematischen Modellbildung
- symbolische Darstellung als Signalflussbild (Blockschaltbild)

[7] siehe dazu: Pupillenreaktion als auch Modellbildung des Sehsystems à la Grossberg & Mingolla („Emergenzprinzip“)

Untersuchungsgegenstand: Signalübertragung (aus: [8])

d.h. „... Verhalten eines Signals bei der Übertragung über ein System...“ (ibid.; S. 2)

hier: determinierte Signale, d.h. „... deren Verlauf zumindest im Prinzip durch einen geschlossenen Ausdruck vollständig beschrieben werden kann.“ (ibid.; S. 1)

bzw. (normierte)[8] **Elementar**signale mit besonders einfacher Form der Beschreibung (ibid.; S. 1/2)

z.B. Sinussignal $s(t) = \sin(2\pi t)$ Gaußsignal $g(t) = \exp(-\pi \cdot t^2)$

Rechteckimpuls $\Pi_\tau(t) = \begin{cases} \frac{1}{\tau}: & |t| < \frac{\tau}{2} \\ 0: & |t| \geq \frac{\tau}{2} \end{cases}$ Dreieckimpuls $\Lambda(t) = \begin{cases} 1-|t|: & |t| \leq 1 \\ 0: & |t| > 1 \end{cases}$

Sprungfunktion $\varepsilon(t) = \begin{cases} 0: & t < 0 \\ 1: & t \geq 0 \end{cases}$ Diracstoß $\delta(t) = \lim_{\tau \to 0} \Pi_\tau(t)$

siehe Abb. 1.1. bis 1.5. aus [8]

als auch zeitlich **gedehnte** und/oder **verschobene** Signale über Ersetzung von

t durch t/T, T: Dehnungsfaktor mit $|T| \neq 1$, Zeitspiegelung für $T < 0$

bzw. t durch $t - t_0$, t_0: Zeitverzögerung für $t_0 > 0$

[8] „In der Signal- und Systemtheorie ist es üblich, mit dimensionslosen Größen zu rechnen, also z.B. Zeitgrößen auf $1s$ und Spannungsgrößen auf $1V$ zu normieren.“ (ibid., S. 2)

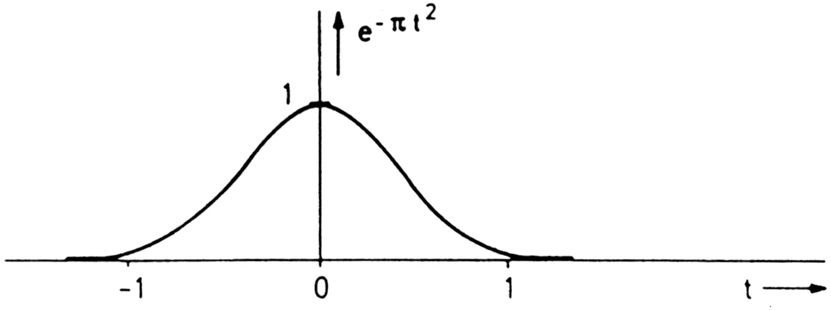


Abb. 1.1. Gauß-Signal

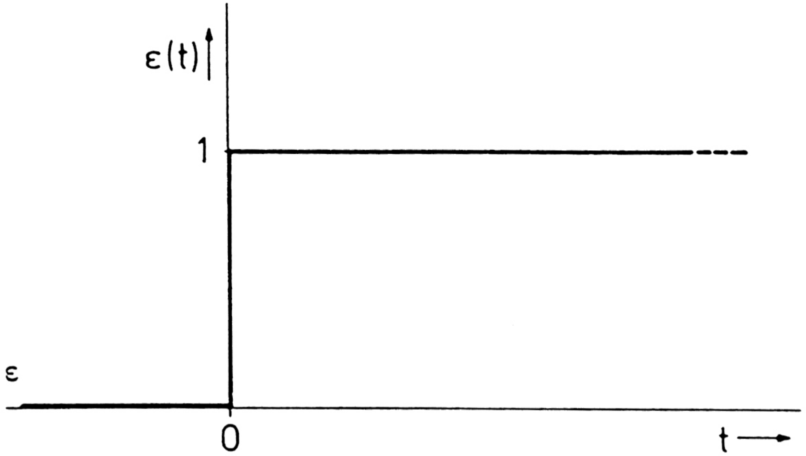


Abb. 1.2. Sprungfunktion $\varepsilon(t)$

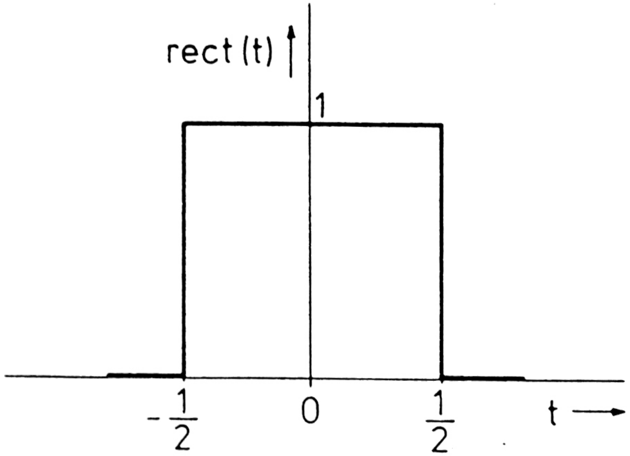


Abb. 1.3. Rechteckimpuls $\mathrm{rect}(t) = \Pi_1(t)$

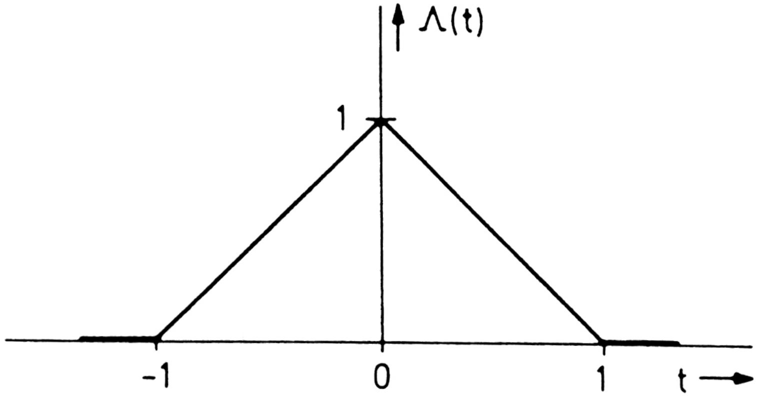


Abb. 1.4. Dreieckimpuls $\Lambda(t)$

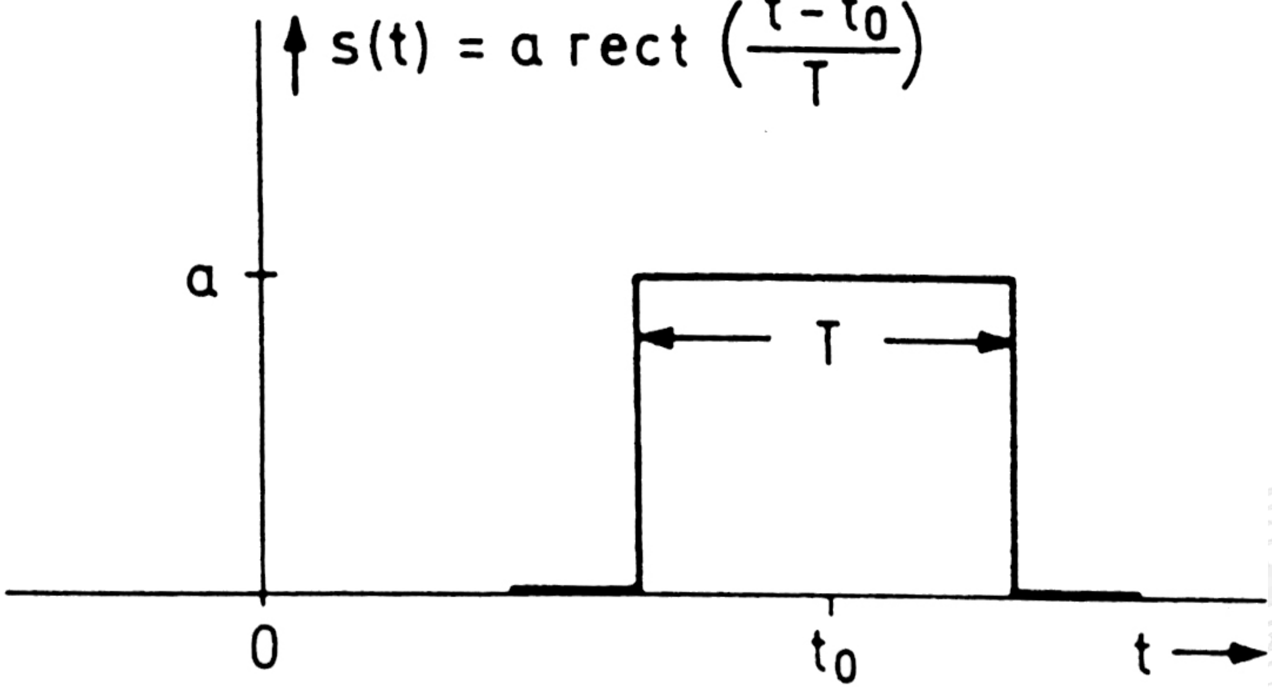


Abb. 1.5. Verzögerter Rechteckimpuls der Dauer T

Signalverläufe

(aus: [7], S. 39/31)

Begriffspaare	analog	–	diskret
	kontinuierlich	–	diskontinuierlich

- $\underbrace{\text{analoges Signal}}$ → analoges Glied

  sämtliche Werte des Wertebereichs (**wertkontinuierlich**)

- $\underbrace{\text{diskretes Signal}}$ → diskretes Glied

  abzählbare Mengen von Werten des Wertebereichs (**wertdiskret**)
  (siehe auch: Quantisierung/Analog-Digital-Wandlung)

- $\underbrace{\text{kontinuierliches Signal}}$ → kontinuierliches Glied

  Signalerfassung/-änderung zu jedem Zeitpunkt (**zeitkontinuierlich**)

- $\underbrace{\text{diskontinuierliches Signal}}$ → diskontinuierliches Glied

  Signalerfassung/-änderung zu bestimmten Zeitpunkten (**zeitdiskret**)
  (siehe auch: Abtastung oder "sampling")

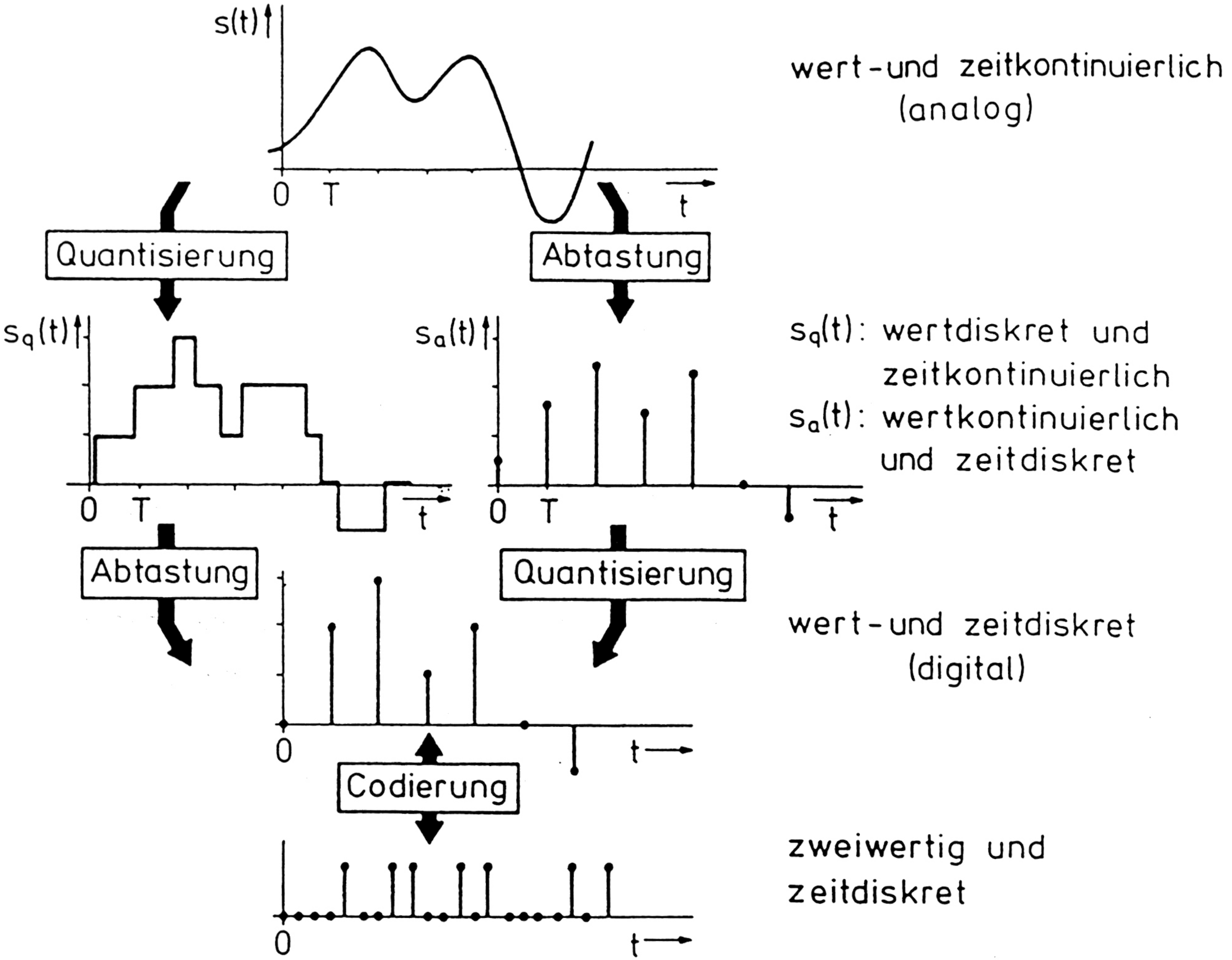


Abb. 3.1. Klassifizierung von Signalen

(aus [8], S. 50)

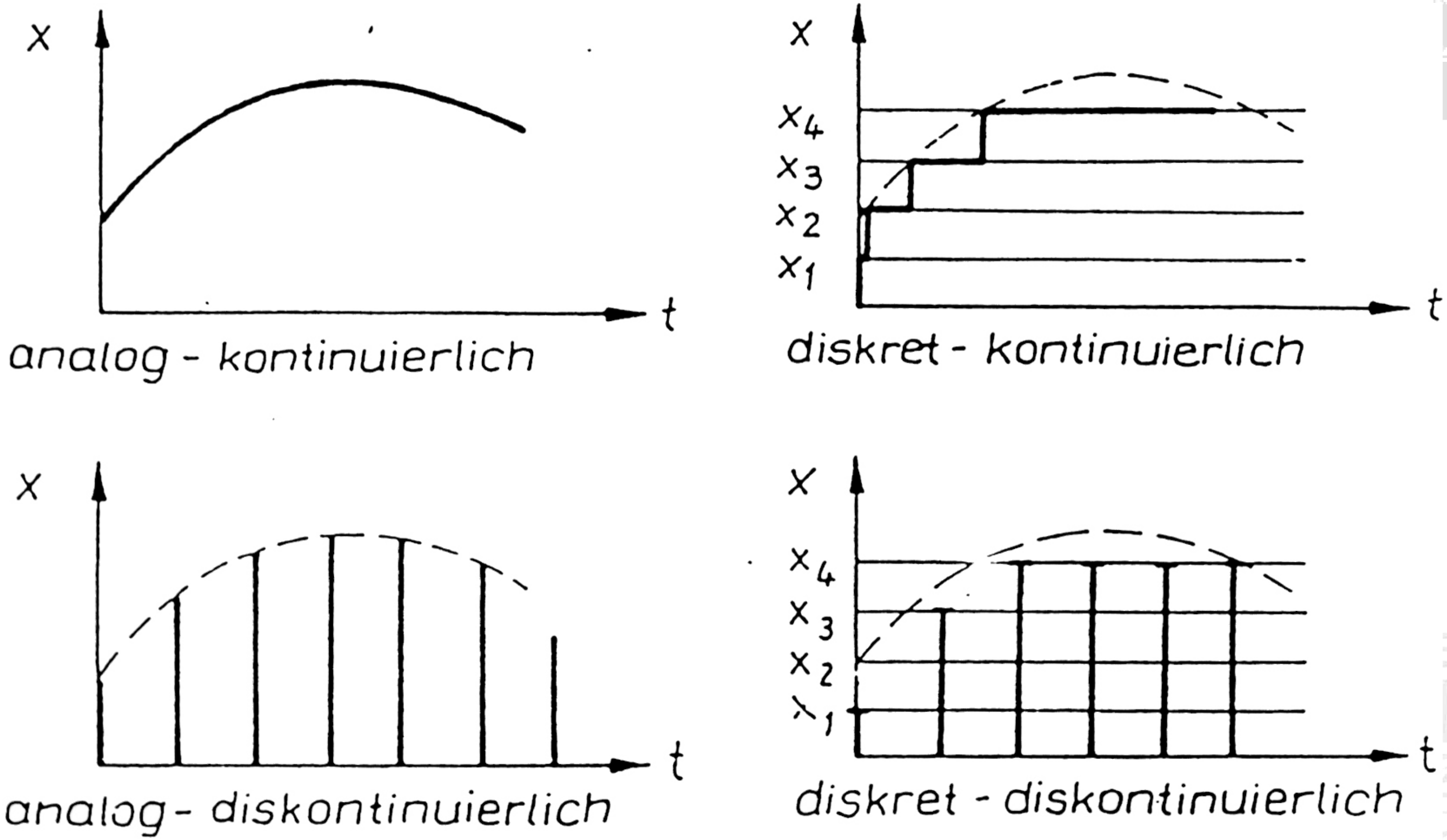


Bild 1.14. Typische Signalverläufe (aus [7], S. 31)

→ der einfach(st)e theoretische Fall: analoge, kontinuierliche, lineare und zeitinvariante[9] Glieder

[9] „Von Natur aus sind **alle** Glieder nichtlinear, ...“ (GÖLDNER (1987), S. 30; siehe auch: Linearisierung)

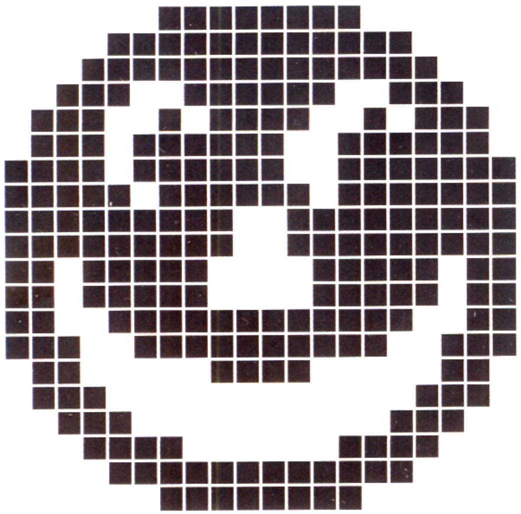


Abb. 1-3 Smiley aus 20 × 20 Pixel in gröberer Matrix

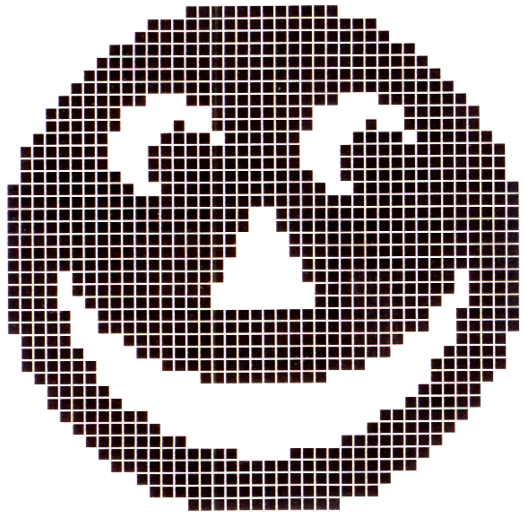


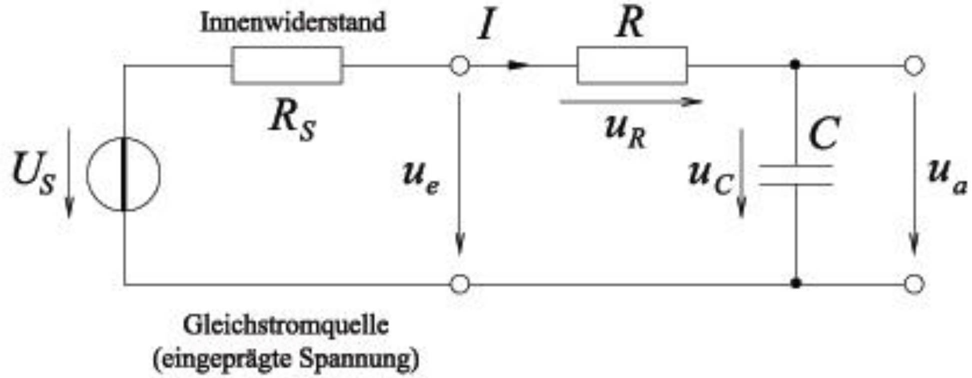
Abb. 1-4 Smiley aus 40 × 40 Pixel

Abb. 1-5 Foto aus 40 × 40 Pixel

(aus [10], S. 4)

Klassische (Teil-)Systeme: Nachrichtentechnische Übertragungssysteme

- Beispiel ***RC*-Zweitor**, tiefes Verständnis ("white box„ ≙ Strukturmodell) mit Hilfe der **Netzwerkanalyse** (Zweig der Netzwerktheorie)
  i. sinusförmige Erregung → Wechselstromrechnung
  ii. Gleichstromkreis, z.B. Erregung durch Sprungfunktion bzw. Elementarsignale



$$U_R = R \cdot I$$

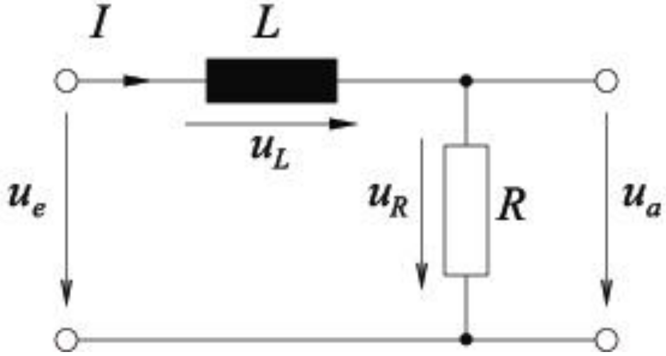
$$U_C = \frac{1}{C} \cdot \int I \, dt = U_a \quad \Leftrightarrow \quad I = C \frac{dU_a}{dt}$$

$$U_e = U_R + U_a$$ (aus 2. KIRCHHOFFschem Satz)

$$U_e = R \cdot I + U_a = RC \frac{dU_a}{dt} + U_a \quad = \quad \underbrace{RC}_{\text{Zeitkonstante } \tau} \dot{U}_a + U_a$$: DGL 1. Ordnung

Exkurs (für InformatikerInnen): "Don't be afraid of ... differential equations!"

- *RL*-Zweitor:



$$U_L = L\frac{dI}{dt} \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{1}{L}\int U_L\,dt$$

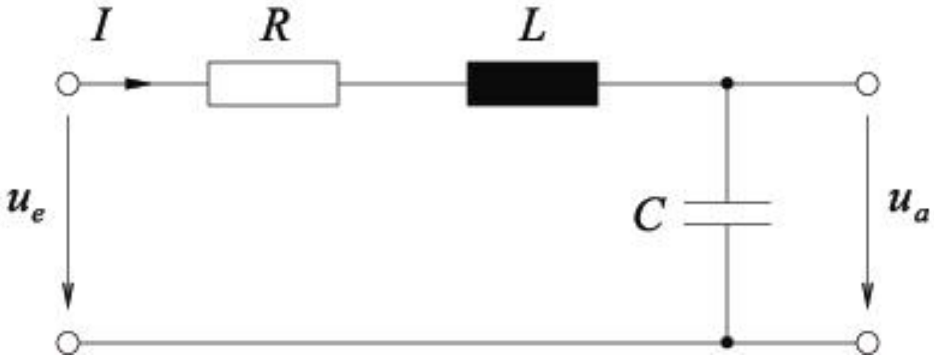
$$U_a = R \cdot I$$

$$U_e = L\frac{dI}{dt} + R \cdot I$$

$$U_e = L \cdot \dot{I} + R \cdot I$$

: DGL 1. Ordnung

- *RLC*-Zweitor:



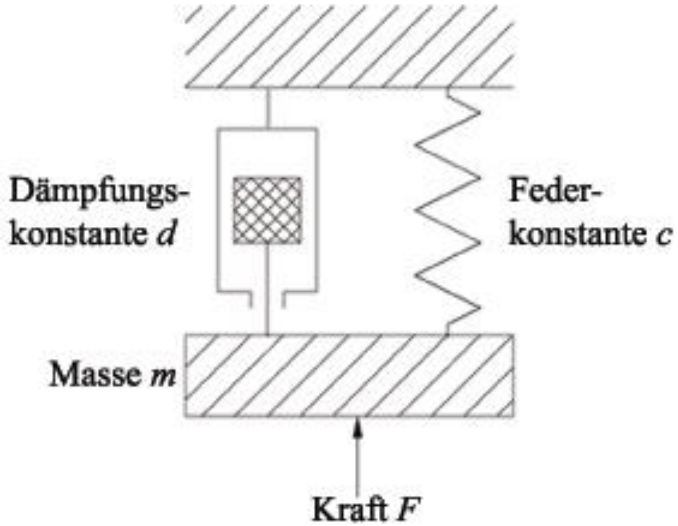
$$U_e = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + U_a$$

mit $I = C\frac{dU_a}{dt}$:

$$U_e = RC\frac{dU_a}{dt} + LC\frac{d^2U_a}{dt^2} + U_a$$

$$\underbrace{U_e = LC \cdot \ddot{U}_a + RC \cdot \dot{U}_a + U_a}_{\text{DGL 2. Ordnung}}$$

- Analogie Feder-Masse-System (Linearbewegung)



$$F = F_m + F_d + F_c; \quad \sum_i F_i = 0$$

$$= m \cdot a + d \cdot v + c \cdot x$$

$$= m\frac{dv}{dt} + d\frac{dx}{dt} + c \cdot x$$

$$= m\frac{d^2x}{dt^2} + d\frac{dx}{dt} + c \cdot x$$

$$= \underbrace{m}\cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + c \cdot x$$

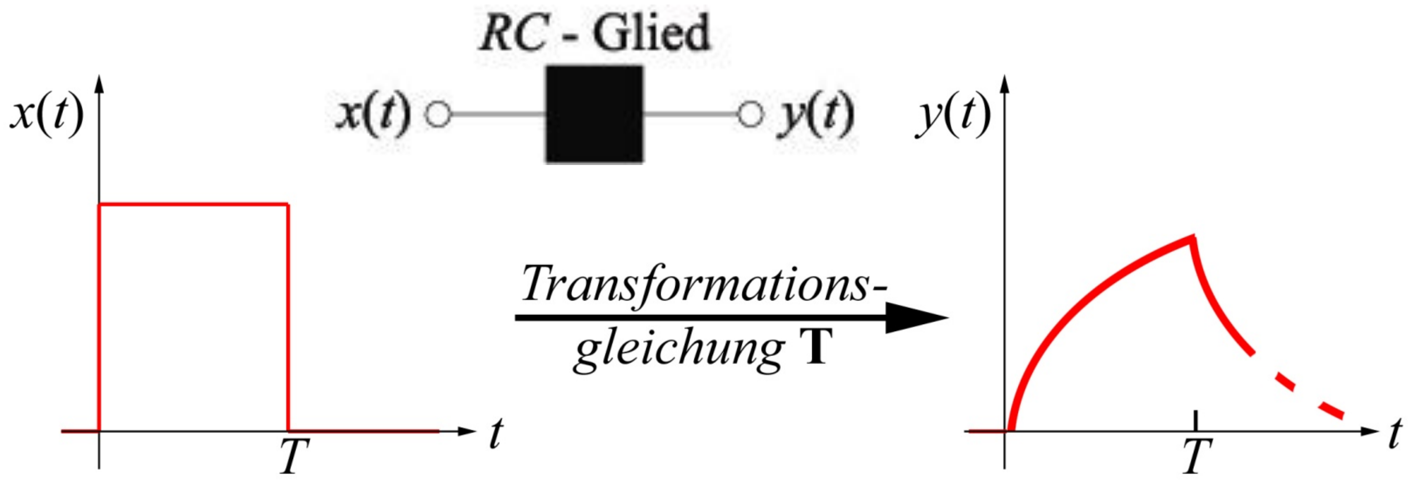
F_m: Trägheitskraft,
F_d: Dämpfungskraft,
F_c: Rückstellkraft,

Grundgleichung der Dynamik aus 2. NEWTONschen Axiom!

- $\underbrace{\text{Verhalten des Zweitors } RC\text{-Glied}}_{\triangleq U_a}$

  bei Erregung durch Sprungfunktion (bzw. beliebige Elementarsignale),

  d.h. Reaktion ≙ idealisiertes Ausgangssignal $y(t)$
  auf idealisiertes Eingangssignal $x(t)$



„Die Bedeutung dieser systemtheoretischen Betrachtungsweise liegt also darin, die Vielfalt der Eigenschaften realer Systeme anhand der gut übersehbaren Eigenschaften idealisierter Systeme einfacher überschauen zu können." ([8], S. 4)

Klasse der LTI-Systeme (aus: [8], S. 4ff und [7], S. 52ff)

- Klasse vieler technischer Systeme mit einfacher Transformationsgleichung, d.h. konkret

  allgemeine Beschreibung durch eine **lineare Differentialgleichung** (mit oder ohne Laufzeit = Totzeit) mit konstanten, d.h. zeitinvarianten Koeffizienten

- **Eigenschaften**

  I. Zeitinvarianzprinzip

  $T\left\{x\left(t-t_0\right)\right\}=y\left(t-t_0\right),\ T$: Transformationsgleichung

  II. Homogenitätsprinzip (siehe auch III.)

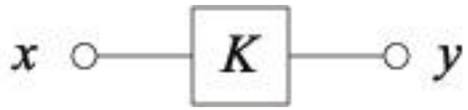
  $T\left\{a\cdot x\left(t\right)\right\}=a\cdot y\left(t\right),\ a$: Konstante

  III. Superpositionsprinzip (→ Linearität)

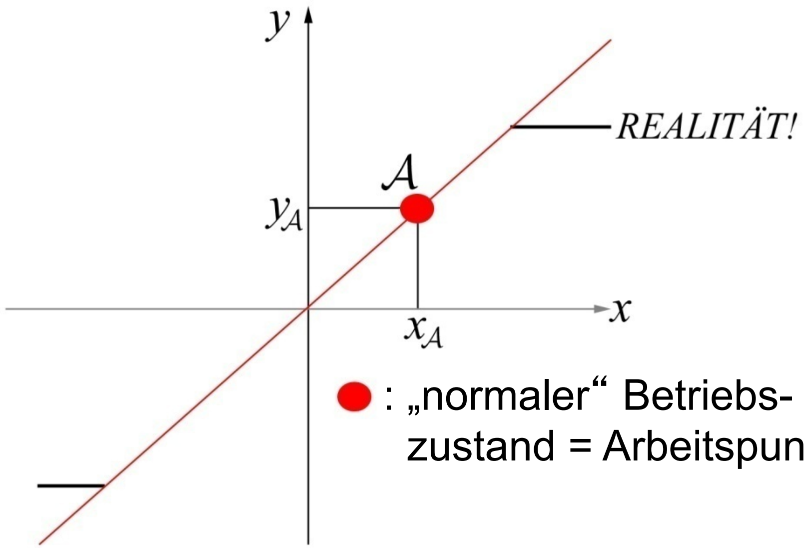
  $T\left\{\sum_i a_i x_i\left(t\right)\right\}=\sum_i a_i T\left\{x_i\left(t\right)\right\}=\sum_i a_i y_i\left(t\right),\ a_i$: beliebige Konstanten

IV. Prinzip des freien Arbeitspunktes

i. lineares Glied $y = Kx$ (statisches P-Glied) mit konstantem Übertragungsfaktor K



und mit (statischer) linearer Kennlinie[10]

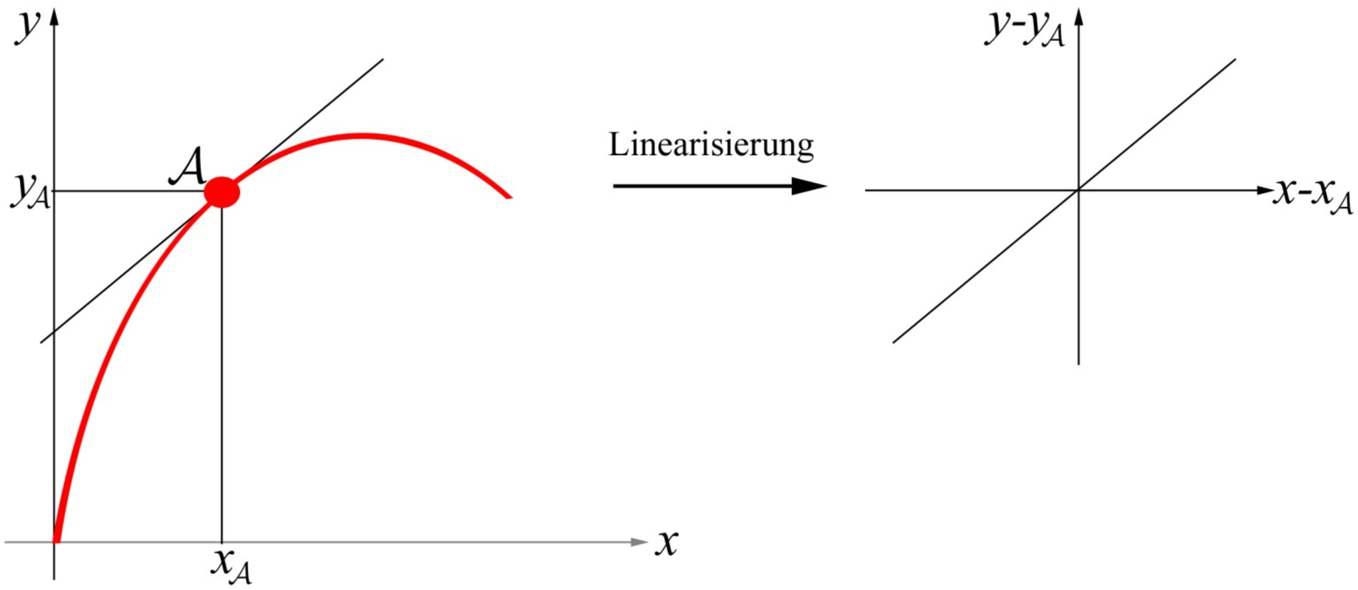


: „normaler" Betriebszustand = Arbeitspunkt A

→ Einschränkungen (für lineare Gleichungen):
1. beschränkter Wertebereich
2. beschränkte Beobachtungszeit

[10] ohne Absolutterm, d.h. $x(0) = y(0) = 0$, für Geradengleichung

ii. nichtlineares Glied mit nichtlinearer Kennlinie



Tangentenlinearisierung in der Umgebung des Arbeitspunktes A
(→ linearer Anteil der Taylorschen Reihenentwicklung)

! Es gilt nun: Modelle linearer Glieder und die Werte ihrer Parameter (Gleichungs-Koeffizienten) sind vom Arbeitspunkt unabhängig (sofern dieser sinnvoll ist).

- Modelle für lineare Glieder ([7], S. 48ff)[11]

i. **proportional** wirkende Glieder (P-Glieder)

P-Glied (statisch)	$x = Ky$	K: Übertragungsfaktor
PT_1-Glied	$T\frac{dx}{dt} + x = Ky$	T: Zeitkonstante
PT_2-Glied	$T^2\frac{d^2x}{dt^2} + 2DT\frac{dx}{dt} + x = Ky$	D: Dämpfungsfaktor
	$\vdots$	
PT_n-Glied	$a_n\frac{d^nx}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}x}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1\frac{dx}{dt} + x = Ky$	

ii. **integrierende** Glieder (I-Glieder)

I-Glied	$x = K\int y\,dt$
	$\frac{dx}{dt} = Ky$ (erfordert keine Integrationsgrenzen)
IT_1-Glied	$T\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = Ky$
	$\vdots$
IT_n-Glied	$a_n\frac{d^{n+1}x}{dt^{n+1}} + a_{n-1}\frac{d^nx}{dt^n} + \ldots + \frac{dx}{dt} = Ky$

[11] **Achtung: GÖLDNERsche Notation mit x: Eingangssignal und y: Ausgangssignal!**

iii. differenzierende Glieder (D-Glieder)

D-Glied $\quad x = K\,\frac{dy}{dt}$

DT_1-Glied $\quad T\,\frac{dx}{dt} + x = K\,\frac{dy}{dt}$

$\vdots$

DT_n-Glied $\quad a_n\,\frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1}\,\frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1\,\frac{dx}{dt} + x = K\,\frac{dy}{dt}$

iv. Laufzeitglied (T_L: Laufzeit)

$$x(t) = y(t - T_L)$$

v. Kombinationsformen (nicht alle realisierbar!)

I_2T_1-Glied (doppelter Integrator) $\quad T\,\frac{dx}{dt} + x = K\iint y\,dt^2$

$$T\,\frac{d^3x}{dt^3} + \frac{d^2x}{dt^2} = Ky$$

PT_1-Glied mit Laufzeit ($x \equiv x(t)$) $\quad T\,\frac{dx}{dt} + x = Ky(t - T_L)$

PIT_1-Glied $\quad T\,\frac{dx}{dt} + x = \underbrace{K_1 y}_{P\text{-Anteil}} + \underbrace{K_2\int y\,dt}_{I\text{-Anteil}}$

PDT_1-Glied $\quad T\,\frac{dx}{dt} + x = \underbrace{K_1}_{P\text{-Anteil}} y + \underbrace{K_2}_{D\text{-Anteil}}\frac{dy}{dt}$ usw.

Literatur

[1] DUDEN – Das Fremdwörterbuch. 4. Auflage, Bibliograph. Institut, Mannheim, 1982

[2] G. WUNSCH (1977) Zellulare Systeme. WTB Band 194, Akademie-Verlag, Berlin (DDR)

[3] N. WIENER (1968) Kybernetik-Regelung und Maschine. rde 294, Rowohlt (1. Auflage 1963, Econ-Verlag; engl. Original: "Cybernetics or control and communication in the animal and the machine", 1. Auflage 1948, 2. Auflage 1961)

[4] B. HASSENSTEIN (1972) Biologische Kybernetik – Eine elementare Einführung. VEB G. Fischer Verlag, Jena (DDR) (3. Auflage 1969; 1. Auflage 1965; 2. Auflage 1966)

[5] W. KÄMMERER (1977) Kybernetik – Eine Einführung auf naturwissenschaftlicher Grundlage. WTB 155, Akademie-Verlag, Berlin (DDR)

[6] D. N. P. MURPHY, N. W. PAGE, E. Y. RODIN (1990) Mathematical Modelling – A Tool for Problem Solving in Engineering, Physical, Biological and Social Sciences. Pergamon Press

[7] GÖLDNER (1987) Mathematische Grundlagen der Systemanalyse – Band 1: Elementare Verfahren zur Analyse linearer Systeme der Kybernetik (2. Auflage). VEB Fachbuchverlag, Leipzig (DDR)

[8] H. D. LÜKE (1990) Signalübertragung – Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme (4. Auflage). Springer-Verlag

[9] B. JÄGER (1990) Regelungstechnik. in: W. BEITZ, K.-H. KUTTNER (Hrsg.) Taschenbuch für den Maschinenbau (17. Auflage). Springer-Verlag, S. X-1 – X-18

[10] T. WALDRAFF (2004) Digitale Bildauflösung. Springer Verlag

„Der Beginn der Wissenschaften
ist das Erstaunen,
dass die Dinge so sind, wie sie sind.“

(Aristoteles, 384 - 322)