

10 Kontinuierliche Simulation - Eine Skizze

Erinnerung: Abschnitte 1 + 2

- **System** Menge Objekte,
je mit Attributen,
mit Zusammenhängen / Abhängigkeiten
von Objekten (bzw Attributen)
- **Systemanalytiker** interessiert an
Einfluß von kontrollierbaren + unkontrollierbaren
(Einfluß-)Größen (C + U)
auf beobachtbare (Auswirkungs-)Größen (P)

in Form von Funktion $f: (W_C, W_U) \rightarrow W_P$
oder Relation $f \subseteq W_C \times W_U \times W_P$

als Basis von Beurteilungs- ("Güte"-) Kriterien $V = \{v_i\}$,
welche aus Beobachtungsgrößen errechenbar

$$v_i = g_i(w_P) \quad i=1,2,\dots,n$$

- Verfolgung der Aufgabe ("Technik") mithilfe von
Modell Ersatzsystem
 - einfacher zu handhaben als System
 - Einflüsse \rightarrow Auswirkungen ("f")
reproduzierend
(damit notwendig Zweck/Ziel - abhängig)

- Festlegung: **nicht-materielle** Modellklassen
 - darin
 - closed box (black box) - Modelle:
nur (C,U) P - Zusammenhang
beschreibend
 - open box (white box) - Modelle:
Mechanik / Zustandekommen
des (C,U) P - Zusammenhangs
beschreibend

- weitere Interessenseingrenzung:
dynamische Modelle / Systeme
 - closed box: zeitabhängiger Verlauf von
Einflüssen und Auswirkungen
 - open box: zeitabhängige Mechanik über
Zustand ("variiert über der Zeit")

dabei Charakterisierung
zeit- / zustands- diskreter / kontinuierlicher
Systeme / Modelle
als Betrachtungsentscheidung ("Zweck / Ziel")
s. Bild 10.0.01

- und (exklusive) Konzentration auf:
ereignisorientierte Modelle / Systeme
 - zustandsdiskret oder zustandskontinuierlich
 - zeitkontinuierlich,
aber mit "sprunghaften" Zustandsänderungen
zu Zeit-**Punkten** (in "verschwindender" Zeit)

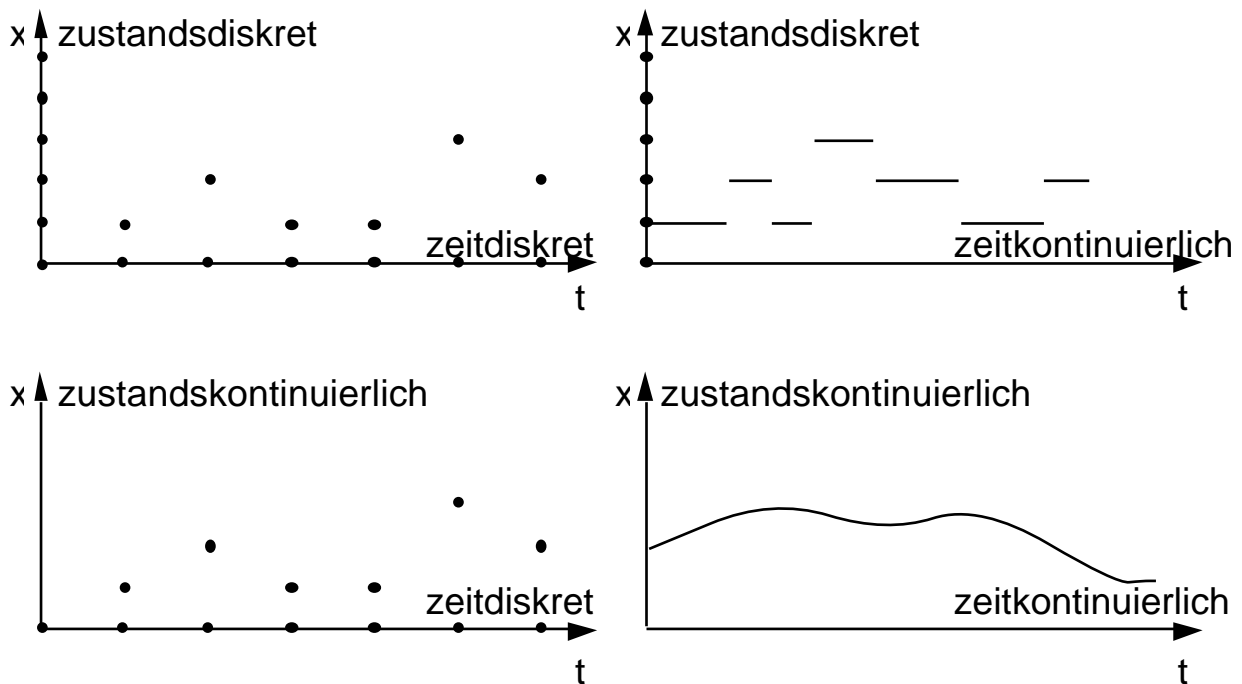


Bild 10.0.01: zeit- / zustands- diskrete / kontinuierliche Trajektorien

Ereignisorientiertheit

- ist (simulations-) effiziente Vorstellung
- trägt auch "ein Stück weit" in Richtung zustands-/zeit-kontinuierlicher Systeme
- versagt aber "im allgemeinen" für letztere

Beispiele von Systemen / Modellen / Analysen (Simulationen)

"am anderen Ende":

Beispiel 10.0.02: Häuser und Klimaanlage

- Annahmen:
Bau / Verkauf von Häusern (in Bereich)
proportional zu
H (=const) Zahl Familien ohne Haus,
mit Hauswunsch
- formale Fassung:
y(t) bis t (seit t=0) gebaute Häuser

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_1 (H - y(t)) \quad y(0) = 0$$

kurz auch

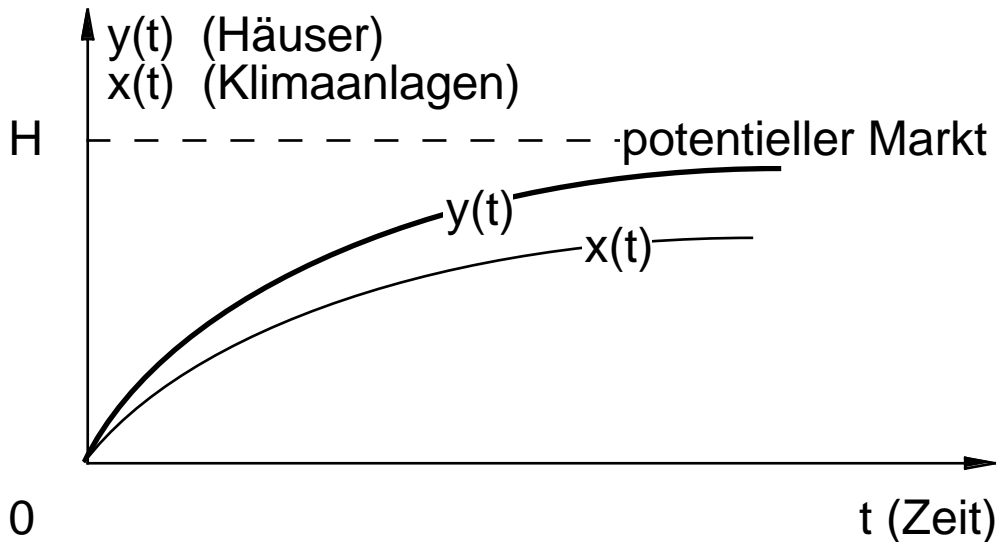
$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= k_1 (H - y(t)) & y(0) &= 0 \\ \dot{y} &= k_1 (H - y) & y &= 0 \text{ für } t = 0 \end{aligned}$$

- weiter angenommen:
Verkauf von Klimaanlage
proportional zu neugebauten Häusern ohne Klimaanlage
(alle alten haben schon, alle neuen wollen)
 - formale Fassung:
x(t) bis t (seit t=0) verkaufte Klimaanlage
- $$\dot{x} = k_2 (y - x) \quad x = 0 \text{ für } t = 0$$

System von **Differentialgleichungen** beschreibt
x(t), y(t)-Verlauf
in diesem Fall explizit lösbar (Funktionen x(t), y(t))

Erahnter Verlauf

(zeit- + zustandskontinuierliche Trajektorien):



Typ der DGI:

- "gewöhnlich": Ableitungen ausschließlich nach einer (der unabhängigen) Variablen "Zeit"
sonst: + partielle Ableitungen, oft: "Raum"
- "linear": unabh.Var + Ableitungen nur 1. Potenz,
keine Produkte (Variablen, Ableitungen)
- "1. Ordnung": (höchste) Ableitungen 1. Ordnung
- "mit konstanten Koeffizienten"
sonst: zeitabhängige Koeffizienten

(hier:) explizite Lösung verfügbar:

$$y(t) = H \left(1 - e^{-k_1 t} \right)$$

In komplexeren Fällen

zB Marktgrenze H nicht konstant
wg Populationswachstum
ökonomischen Bedingungen

zB Proportionalitätskoeffizienten nicht konstant
wg marketing-Kampagnen
Konkurrenzmärkten (Mietwohnungen,...)

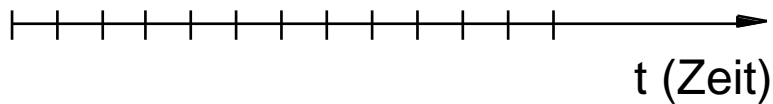
- explizite Lösbarkeit uU nicht gegeben
(auch: Kenntnisproblem!)
- "Simulation" vorstellbar
("nur wenns nicht anders geht"!)

Verfolgung des Zustands über der Zeit,
durch Imitation (zustandsabhängiger) Zustandswechsel,
gemäß "Dynamik" des Systems (D'GI-System !)

- Typische Methode:

(sogar notwendigerweise:
Im Digitalrechner prinzipiell
Zustand + Zeit nur diskret änderbar):

Statt kontinuierlicher Zeit
nun diskrete Zeit betrachtet



diskrete Zeit mit Zeitpunkten

$t_0, t_1, \dots, t_i = t_{i-1} + (\Delta t)_i, \dots$
 wo oft (nicht notwendig)
 $(\Delta t)_i = \Delta t$

und

statt Zuständen zu kontinuierlicher Zeit
 nun Zustände zu diskreten Zeitpunkten

ermittelt (zB)

durch Festhalten (Konstanz)
 der Zustandsänderungs"raten" ("Ableitungen")
 über (t_i, t_{i+1}) -Intervallen

Diskretisierung von **Differentialgleichungssystem**
 zu **Differenzgleichungssystem**

Im Beispiel:

- Veränderung y im Intervall (t_i, t_{i+1})
 $y_i = \text{const}_i \cdot \Delta t$
 mit (zB) Wahl von const_i "wie zu Anfang des Intervalls"
 $\text{const}_i = k_1 \cdot (H - y_i) \cdot \Delta t$
 und folglich
 $y_{i+1} = y_i + \text{const}_i = y_i + k_1 \cdot (H - y_i) \cdot \Delta t$

- (entsprechend:)
Veränderung x im Intervall (t_i, t_{i+1}) gemäß
$$x_{i+1} = x_i + k_2 \cdot (y_i - x_i) \cdot \Delta t$$
- und Simulationsvorgang insgesamt:

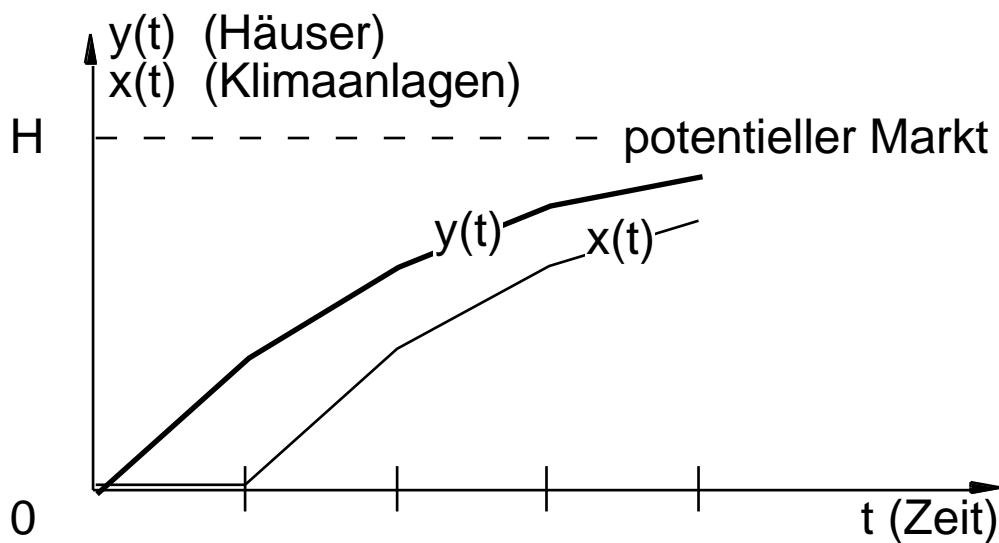
Initialisierung:

$$\begin{array}{ll} y_0 = 0 & y_0 = k_1 \cdot H \cdot \Delta t \\ x_0 = 0 & x_0 = 0 \end{array}$$

Iteration $i=1, 2, \dots$:

$$\begin{array}{ll} y_i = \dots & x_i = \dots \\ y_i = \dots & x_i = \dots \end{array}$$

- und "tatsächlich verfolgte" Trajektorien:



natürlich nur "Approximation" !

Entwickelt: (sehr einfache)
Methode der **numerischen Integration**

Es gibt bessere (genauere) Methoden (s. später)

Beispiel 10.0.03: Rad-Auslenkung (vertikal)

- Annahmen:

Automobil in Bewegung

(bewegungs-)

zeitabhängige Krafteinwirkung auf Rad $E(t)$

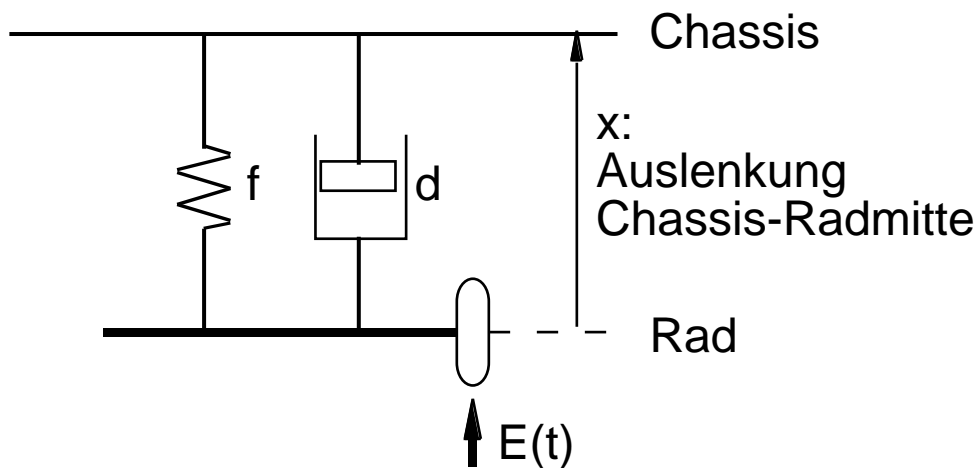
Rad mit Masse m

Radauslenkung vertikal gedämpft durch

Feder, Federkonstante f

Stoßdämpfer, Dämpfungskonstante d

- Skizze



- physikalische mathematische Gesetze

Weg / Geschwindigkeit / Beschleunigung

Kraft = Masse · Beschleunigung

Kräfte

- externe "Störung": $E(t)$
- Federkraft, Annahme:
proportional Auslenkung $-f \cdot x(t)$
- Dämpfung, Annahme:
proportional Geschwindigkeit $-d \cdot \dot{x}(t)$

$$E(t) - f x(t) - d \dot{x}(t) = m \ddot{x}(t)$$

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + f x = E(t)$$

- lineare Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten

ggf, abhängig von $E(t)$, explizit lösbar
Anfangsbedingungen, $x(0)$, $\dot{x}(0)$, erforderlich
 $x(t)$ "gedämpfte Schwingung"

- in komplexeren Fällen:
kontinuierliche Simulation

einfacher Zugang (analog Bsp.10.0.02):

- Einführung "Zustandsgrößen"
(Ableitungen, i.Vgl. zu Vorkapiteln "künstlich")

$$x_0 := x$$

$$x_1 := \dot{x}$$

- liefert DGI-System 1. Ordnung

$$\dot{x}_0 = x_1$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{m} (E(t) - f x_0 - d x_1)$$

welches über der Zeit "schrittweise" vefolgtbar

Beispiel 10.0.04: Elektrischer Schwingkreis

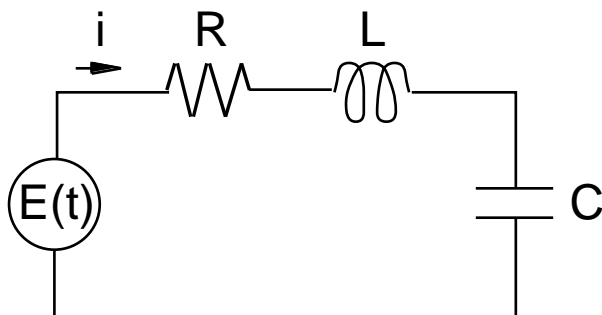
- Annahmen:

Elektrisches Netzwerk, Reihenschaltung aus

- Ohmscher Widerstand R
- Spule Induktivität L
- Kondensator Kapazität C

+ zeitabhängige (Spannungs-)Anregung $E(t)$

- Skizze



- physikalische mathematische Gesetze

Kirchhoffsche Gesetze
Spannung / Strom an Schaltelementen

- mit Ladung des Kondensators $q(t)$
ergibt sich Zusammenhang:

$$LC \ddot{q} + RC \dot{q} + q = E(t)$$

- lineare Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten

ggf, abhängig von $E(t)$, explizit lösbar
Anfangsbedingungen, $q(0)$, $q'(0)$, erforderlich

$q(t)$ "gedämpfte Schwingung"

- in komplexeren Fällen:
kontinuierliche Simulation
- aber auch weiterer Weg zur Lösung aufscheinend:
 - DGI formal identisch zu jener aus Beispiel 10.0.03 !!
 - elektrischer Schaltkreis (auch allgemeinere)
"am Laborplatz" aufbaubar
 betreibbar
 beobachtbar / meßbar
 Lösung $q(t)$ aufzeichnenbar
 - Lösung auf mechanische Problem übertragbar !!

- ehemals breit eingesetzt: **Analogrechner**
entsprechend DGI (-System) zusammengeschaltete
Menge von
(Grund-)Elementen

"analoges Modell"

- Grund-Schaltungs-Elemente Analogrechner
 - Integratoren (Signalintegration über der Zeit)
 - Skalierer (Multiplikation mit Faktor)
 - Addierer (Addition)
 - Inverter (Signalumkehr)
 - ...
- Blockschaltbilder (aus Schaltungselementen) entsprechend DGI (Modell)

Rezept:

- Auflösung DGI (aller DGI eines DGI-Systems) nach (jeweils) höchster Ableitung
- Blockschaltbild zeichnen (abzeichnen)

Analogrechner / Blockdiagramm
auch "für sich" brauchbar
als Beschreibung
siehe 10.1

erreicht Genauigkeiten ca 10^{-3} , $\mu\text{U } 10^{-3}$
(als Hinweis auf erforderliche Präzision
"ungenauer" numerischer Integration)

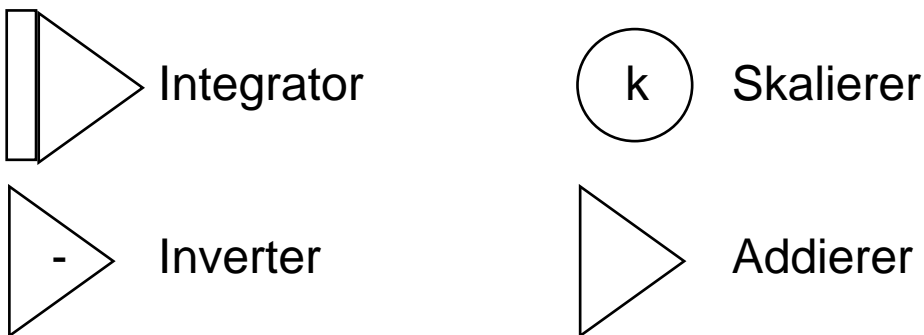
- im Beispiel Radauslenkung wird aus

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + f x = E(t)$$

aufgelöst

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (E(t) - d \dot{x} - f x)$$

Schaltungssymbole (nicht völlig einheitlich)



Schaltung für $\ddot{x} = \frac{1}{m} (E(t) - d \dot{x} - f x)$

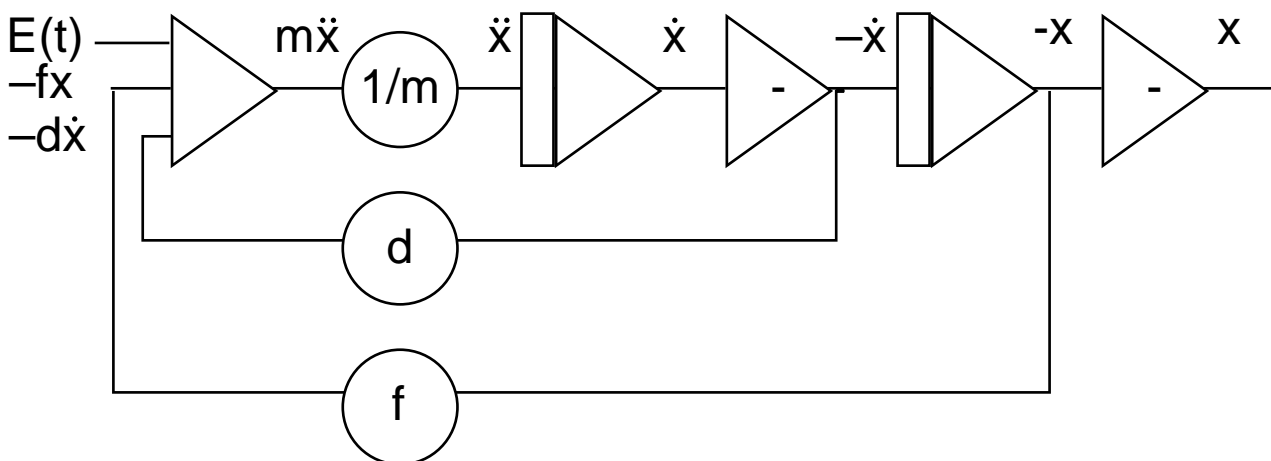


Bild 10.0.05: Schaltung DGI Radauslenkung

Insgesamt genauer zu betrachten

- **Beschreibungsmittel** für Spezifikation kontinuierlicher Simulatoren
- **Lösungsverfahren** bei Diskretisierung und numerischer Integration

10.1 Spezifikation von kontinuierlichen Modellen

Beschreibungsmittel

- allgemein,
an berücksichtigte Gleichungsformen angepaßt:

lineare, nichtlineare, gewöhnliche, partielle, ...
DGI + DGI-Systeme
- an Nutzungsbereich / Benutzerkreis angepaßt
(Erinnerung: "Szenario")

sozio-ökonom., technischer, medizinischer, ... Bereich

Konzentration (hier)

- auf Systeme
 - gewöhnlicher Differentialgleichungen
- auf wenige Nutzungsbereiche
 - nur beispielhaft

Im Gegensatz zu ereignisorientierten Systemen
bietet klassische Mathematik (Analysis)

für zeit-/zustands-kontinuierliche Systeme

- ausgearbeitete Beschreibungstechniken
- ausgefeilte Lösungs-Kalküle
(ggf hinsichtlich expliziter Lösungen versagend:
Ausweg: Simulation)

Modellformulierung "startet" daher

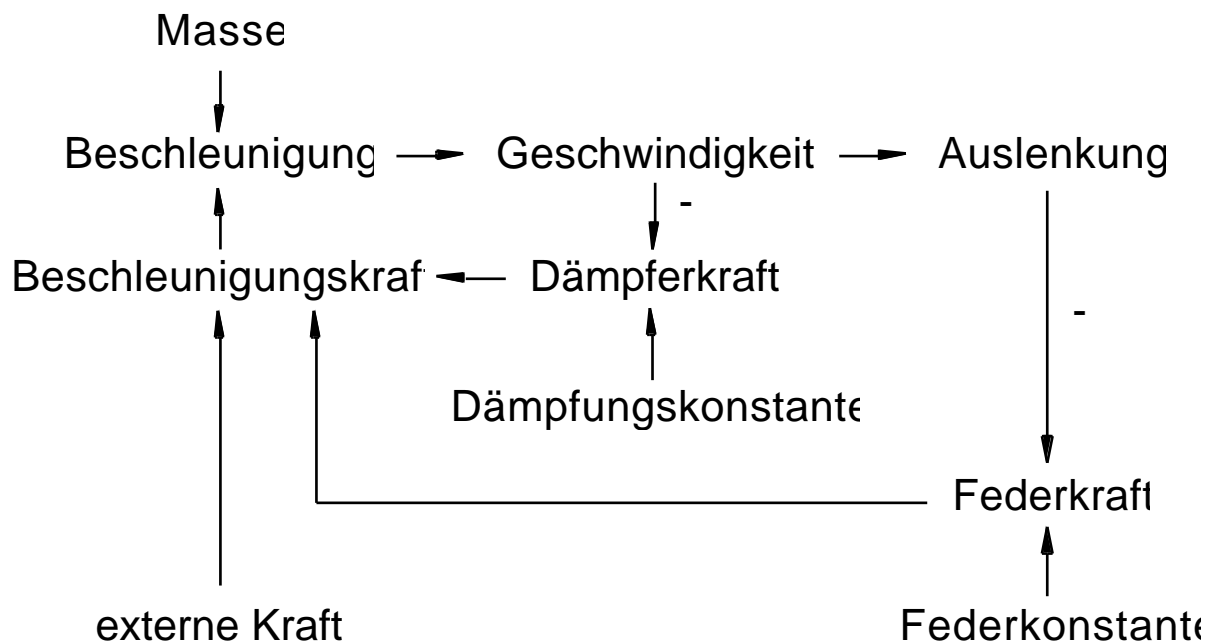
- typischerweise bei mathematischer Formulierung
- welche notwendigerweise auf "technischem" Verständnis zu analysierenden Systems beruht (zB Mechanik, Regelungstechnik, ..., BWL)

Verschiedene initiale Modell"formen",
(soweit vollständig formalisiert:)
untereinander gleichwertig

Es gibt (teilformalisierte) "Vorstufen", zB

- **Wirkungsdiagramme**
stellen prinzipielle Anhängigkeiten / Einflüsse dar

im Bsp 10.0.03 (hier bis auf weiteres genutzt)



voll formalisierte Formen

- gewöhnliche lineare DGI n.Ordnung ("wie gehabt", nicht immer erreichbar)

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + f x = E(t)$$

- System linearer DGI 1.Ordnung ("allgemein", für Analyse sehr angenehm)

über Einführung von "Zustandsvariablen",
entsprechend spezifischen Bezeichnungen

- für "eigentliche" abhängige Variablen
- für deren Ableitungen nach der Zeit

im Bsp:

- 1 abh. Variable, Ordnung 2
- 2 Zustandsvariable x_0, x_1

$$x_0 := x$$

$$x_1 := \dot{x}$$

- System von DGI 1.Ordnung

$$\dot{x}_0 = x_1$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{m} (E(t) - d x_1 - f x_0)$$

erste Gleichung(en) per def
letzte Gleichung gemäß DGI n.Ordnung

- System von Integralgleichungen
("allgemein", Entsprechung Blockdiagramm)

durch formale Integration des DGI-Systems 1. Ordnung

$$\dot{x}_0 := x_1$$

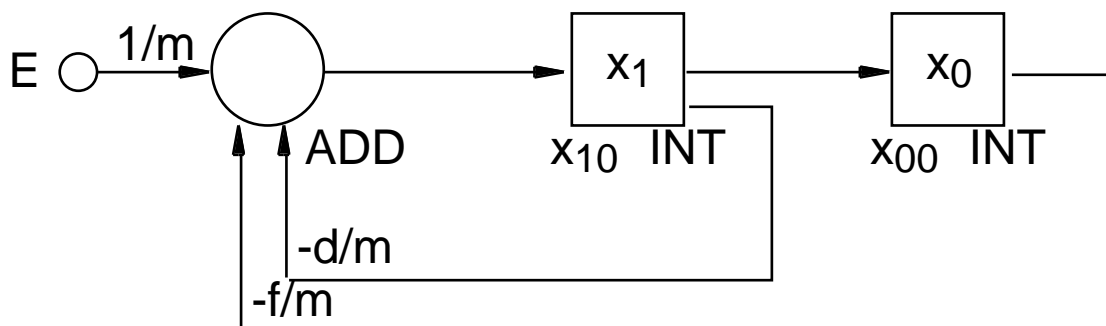
$$\dot{x}_1 := \frac{1}{m} (E(t) - d x_1 - f x_0)$$

$$x_0 = \int_0^t x_1 dt$$

$$x_1 = \frac{1}{m} \int_0^t E(t) dt - \frac{d}{m} \int_0^t x_1 dt - \frac{f}{m} \int_0^t x_0 dt$$

- Blockdiagramm
(verschiedene Ausprägungen)

dem Integralgleichungssystem
(bzw System DGI 1.Ordnung) entsprechend,
oft "direkt" formuliert



vgl auch Bild 10.0.05

- Programmsprache

(eine Möglichkeit natürlich:
in beliebiger HLL ausprogrammieren,
incl expliziter Programmierung Lösungsverfahren)

diverse Ansätze von Sprachen:

- deklarativ als Differenzgleichungssystem,
- uU incl Lösungsverfahren,
- direkt vom DGI-System

```
beschl = (E - d*geschw - f*auslenk)/masse
geschw = geschw + DELTA*beschl
auslenk = auslenk + DELTA*geschw
```

"Reihenfolge" der Anweisungen wesentlich

"problemangepaßte" Formulierungen
lehnen sich an "passende" obiger Alternativen an

große Szenario-Bereiche

- sozio-ökonomische Probleme
(vgl Beispiel DYNAMO)
- technische Probleme
(vgl Beispiel CSMP)
- biologisch / medizinische Probleme
(vgl Beispiele)
- ...

BEISPIEL DYNAMO

entwickelt im Zusammenspiel mit Forrester's
System / Industrial / Urban / World Dynamics

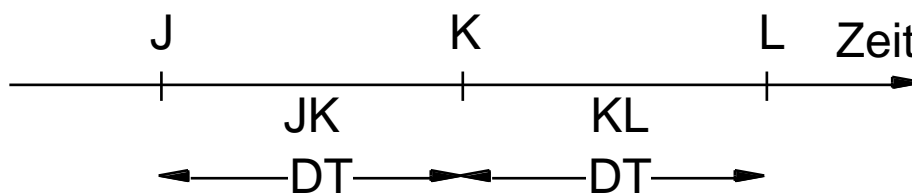
aufgrund breit diskutierter (Welt-)Modelle
mit beträchtlicher Bekanntheit
"Club of Rome"

Fähigkeiten / Modelltypen (im Vergleich)
eher begrenzt: Systeme linearer DGI 1. Ordnung
aber Schwergewicht (beabsichtigterweise)
eher bei Prinzip von Wechselwirkungen
als bei quantitativen Zusammenhängen

Modellspezifikation auf 2 Ebenen

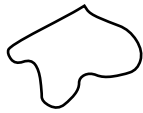
- spezielle blockorientierte Graphik
nicht voll formalisiert: à la Wirkungsdiagramme
- führte zur hohen Attraktivität des "x " Dynamics Ansatzes
- sprachliche Notation, FORTRAN-basiert,
deklarativ,
mit speziellen Notationshilfen für Differenzen-GI-Systeme

Zeit strukturiert in 3 Zeitpunkte (+ 2 Zeitintervalle)
vorher: J jetzt: K nachher: L
dazwischen: JK bzw KL



DT konstant, Nutzer-gesetzt

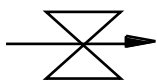
- Symbole der DYNAMO-Diagramme:



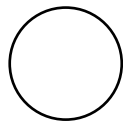
Quelle bzw Senke



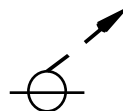
level (Niveau):Zustandsvariable



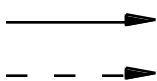
rate (Veränderungsrate)



auxiliary (Hilfsvariable)



constant (Konstante)



flow (Veränderungsfluß)



cause-and-effect (Einwirkung)

siehe Beispiel

- Syntaxprinzip DYNAMO-Programme:

$$L \quad y.K = y.J + (DT)(yrate.JK)$$

$$R \quad yrate.KL = (k1)(H-y.K)$$

Kennung Gleichungstyp (L: level, R: rate)

bei level Bezug auf Zeitpunkt

bei rate Bezug auf Zeitintervall (Sortierungsproblem
beseitigt)

siehe Beispiel

- Verwendungsbeispiel
am Beispiel 10.0.02: Häuser: $y(t)$
+ Klimaanlage: $x(t)$

DGI-System war

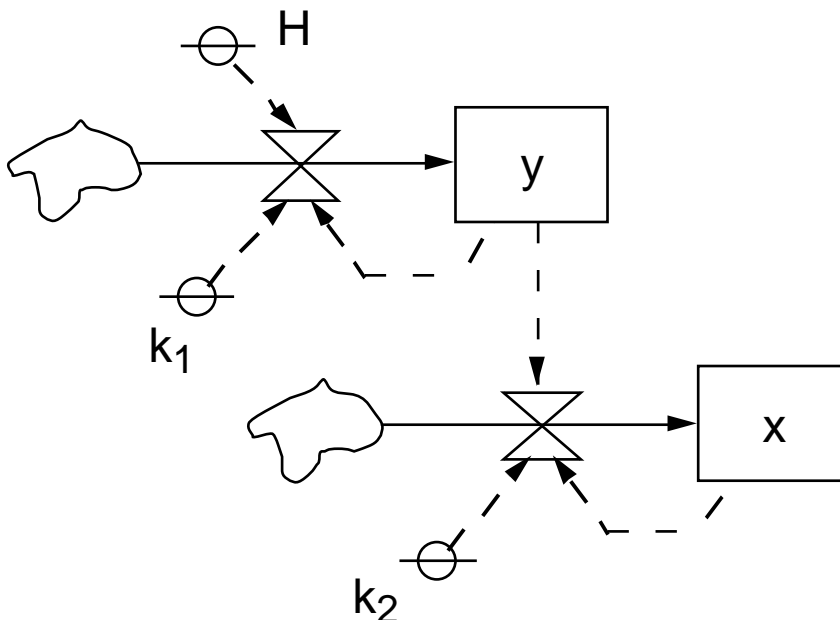
$$\dot{y} = k_1 (H - y)$$

$$y = 0 \text{ für } t = 0$$

$$\dot{x} = k_2 (y - x)$$

$$x = 0 \text{ für } t = 0$$

- zugehöriges DYNAMO-Diagramm



- zugehöriger Ausschnitt aus DYNAMO-Programm:

```
L y.K = y.J + (DT)(yrate.JK)
```

```
L x.K = x.J + (DT)(xrate.JK)
```

```
R yrate.KL = (k1)(H-y.K)
```

```
R xrate.KL = (k2)(y.K-x.K)
```

BEISPIEL CSMP

- eine von vielen
Continuous System Simulation Languages (CSSLs)
des technischen Bereichs
diese idR deutlich mächtiger als (zB) DYNAMO
- historisch bedeutsam,
hier wegen "typischen" Ansatzes skizziert,
FORTRAN-geprägt
- folgt den Ideen
 - Nutzung von Zustandsvariablen
in Standard-Notation: x, \dot{x}, \ddot{x}
 - in deklarativer Formulierung
auf Basis Integralgleichungssystem
mit Notation: $x = \text{INTGRL}(\text{init}, \dot{x})$
 - unter interner Setzung Lösungsverfahren

CSMP unterscheidet "statement"-Typen

- strukturelle statements
definieren "eigentliches" Modell
- Daten-statements
setzen Werte für Parameter, Konstanten, init-Bedingungen
- Steuerungs-statements
bestimmen Übersetzung, Ausführung, Ausgaben

CSMP-Fassung Bsp 10.0.03 (mit Kommentaren {...} nicht in CSMP-Syntax)

```

title radauslenkung
*
param d = (5.61,11.82,...) {Liste Werte}
*
  x2dot = (1.0/m) * (e - d*xdot - f*x)
  xdot = INTGRL(0.0,x2dot) {Initialwert 0}
  x = INTGRL(0.0,xdot)      {Initialwert 0}
*
const m=2.0,e=1.0,f=400.0 {ext. Kraft const}
timer delt=0.005,fintim=1.5,...
                        {Diskretisierung, Abbruch,...}
print x,xdot,x2dot      {Ausgaben}
...                      {Ausgabenformat}
end

```

heute gebräuchliche Spezifikationen

- rein sprachliche: recht ähnlich CSMP
(zB ACSL, DARE, DESIRE, ...)
- Betonung Blockdiagrammdenken
(dann: problemangepaßte Blocktypen
häufig Regelungstechnik
zB SIMULINK, ...)
- auch in direkter Übersetzung aus Graphik
- widmen sich vermehrt der Modellstrukturierung
(vgl analoge Überlegungen bei ereignisorient. Simulation)

vgl Spezialliteratur

BEISPIELBEREICH ÖKOSYSTEME

Beispiel "Wirte - Parasiten"

Wirkungsschema (Wirkungsdiagramm)

parasitäre Insekte legen Eier in Larven von Wirten

Parasiten , Wirte

Parasiten , Wirte

...

mit

W: Zahl Wirte

P: Zahl Parasiten

G: Geburtenüberschuß Wirte (bei normaler Sterberate)

B: Befallskoeffizient Wirte

S: Sterbequote Parasiten

ergibt sich "erstes" Modell

$$\dot{W} = W (G - B P)$$

$$\dot{P} = P (B W - S)$$

BEISPIELBEREICH BIOMECHANIK

mit sehr unterschiedlichen "Verzweigungen":

Prothetik

Roboter

BEISPIELBEREICH MEDIZIN

ua "Pharmakakinetik"
(Dynamik der Arzneimittelverteilung)

mit typischen Kompartiments-Modellen
(Organismus in "Kompartimente" aufgeteilt)

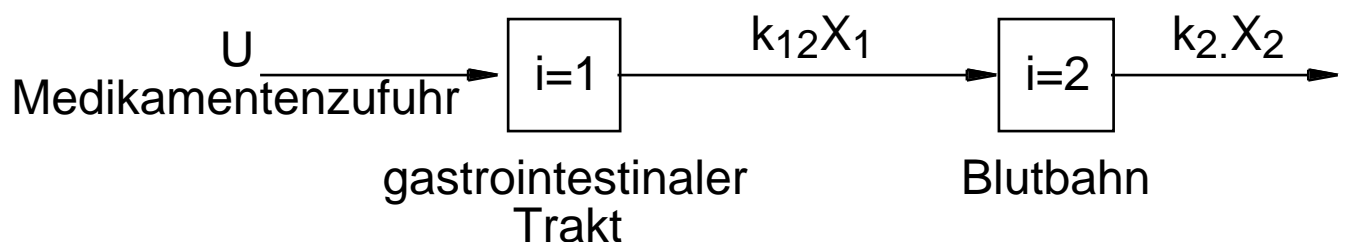
je Kompartiment Gleichung des Typs
Konzentrationsveränderung = Zufuhr - Abgabe
Abgabe proportional Konzentration

für Kompartiment i:

$$\dot{X}_i = Z_i - k \cdot X_i$$

+ Kopplung der Gleichungen
"gemäß Struktur Organismus"
DGI-System

Ausschnitt:



nochmals:

Blockdiagramme / Graphiken
offensichtlich an Anwendungsbereich anzulehnen !

10.2 Numerische Integrationsmethoden "angerissen"

Zu lösen sei zB:

$$dy/dx = f(x,y) \quad \text{mit Anfangsbedingungen} \\ x = x_0, y = y_0$$

für uns immer $x = t$

dh zu lösen (implizite Gleichung):

$$y = y_0 + \int_{x_0}^x f(t,y) dt$$

Unsere Lösungs-Ahnung ("numerische Integration") war

- unabhängige Variable diskretisieren
 $t_n = t_0 + n \cdot \Delta t \quad n=1,2,\dots$
- Teilintegrale bilden pro Δt -Intervall
auf Basis konstanter Steigung ("Rate")
unter Verwendung der Anfangssteigung

ist bekannt als **Euler-Integration**
("wir waren nicht die ersten")

ist "Einschrittverfahren",
(Mehrschrittverfahren: "predictor-corrector"
versuchen Verbesserung)

ist Runge-Kutta-Verfahren 1.Ordnung
(RK höherer Ordnung ua versuchen Verbesserung)

- **Euler-Integration** algorithmisch für "Anfangswertproblem"
 $dy/dt = f(t,y)$ Anfangsbedingungen $t=t_0, y=y_0$

- betrachtete Zeitpunkte

$$t_n = t_0 + n \cdot \Delta t \quad n=1,2,\dots$$

- Initialisierung

$$t=t_0$$

$$y=y_0$$

$$y_0' = f(t_0, y_0)$$

- 1. Schritt

$$t_1 = t_0 + \Delta t$$

$$y_1 = y_0 + \Delta t \cdot y_0' = \Delta t \cdot f(t_0, y_0)$$

$$y_1' = f(t_1, y_1)$$

- 2. Schritt

$$t_2 = t_1 + \Delta t$$

$$y_2 = y_1 + \Delta t \cdot y_1' = \Delta t \cdot f(t_1, y_1)$$

$$y_2' = f(t_2, y_2)$$

- ...

Idee von Verfahren steigender Genauigkeit

(ua Runge-Kutta) liegt

in Taylor-Reihen-Entwicklung von $y(t)$

an Stützpunkten t_n

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta t \dot{y}(t) + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{y}(t) + \dots + \frac{1}{n!} \Delta t^n y^{(n)}(t) + O(\Delta t^{n+1})$$

und Ermittlung der "nächsten" Veränderung y so daß

$$y_{n+1} = y_n + \Delta y$$

falls $y^{(1)}(t), y^{(2)}(t), \dots, y^{(n)}(t)$ bekannt,
liegt unmittelbar Approximationsverfahren "n. Ordnung" vor

falls Ableitungen nicht / nur für niedrige Ordnungen bekannt,
müssen höhere Ableitungen numerisch ermittelt werden
(im vorliegenden Fall nur 1. Ableitung exakt bekannt)

zwangsläufig erforderlich:

- bei Verfahren n. Ordnung
- mit $k < n$ exakt bekannten Ableitungen
- $n-k$ zusätzliche Funktionsberechnungen $f(t,y)$
für numerische Ableitungsberechnung
(im vorliegenden Fall für Verfahren 2. Ordnung 1 Berechnung)

zusätzliche Punkte + Verwendung derart daß
n erste Glieder Taylor-Entwicklung exakt reproduziert
(falls vorliegendes Problem Polynom n. Ordnung,
dann ist Verfahren exakt)

Viele Verfahren !
Skizze vgl später

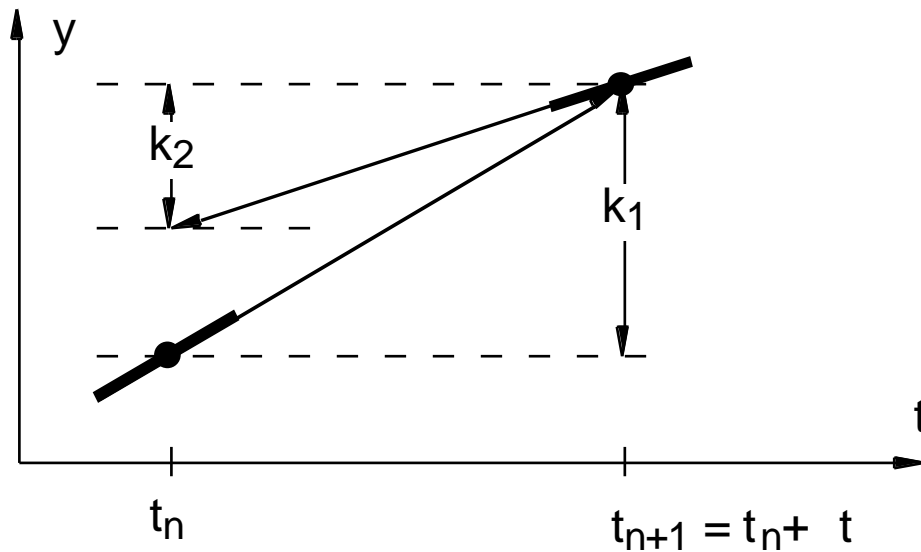
Vergleichspunkte

- Stabilität
- Genauigkeit
- Effizienz

breite Literatur

bei zu verwendenden Paletten / tools
auf Spektrum implementierter Verfahren achten

Beispiel Runge-Kutta 2.Ordnung (Euler-Cauchy / Heun)



Verfahren

- bei vollem Euler-Schritt ergäbe sich
 $(y) k_1 = t \cdot y_n' = t \cdot f(t_n, y_n)$
- Steigung im erreichten Punkt
 $f(t_n + t, y_n + k_1)$
- bei dieser Steigung ergäbe sich
 $(y) k_2 = t \cdot f(t_n + t, y_n + k_1)$
- verwendet wird
 $y = 1/2 \cdot (k_1 + k_2)$
 dh
 $y_{n+1} = y_n + 1/2 \cdot (k_1 + k_2)$

Konstruktion Runge-Kutta-Verfahren höherer Ordnung

- aufwendig
- mit jeweils mehreren Lösungen / Ergebnissen

viel gebraucht Runge-Kutta 4. Ordnung

häufigste Varianten
sind

$$y_{n+1} = y_n + k_1/6 + k_2/3 + k_3/3 + k_4/6$$

$$k_1 = \Delta t f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = \Delta t f(t_n + \Delta t/2, y_n + k_1/2)$$

$$k_3 = \Delta t f(t_n + \Delta t/2, y_n + k_2/2)$$

$$k_4 = \Delta t f(t_n + \Delta t, y_n + k_3)$$

und

$$y_{n+1} = y_n + k_1/8 + 3k_2/8 + 3k_3/8 + k_4/8$$

$$k_1 = \Delta t f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = \Delta t f(t_n + \Delta t/3, y_n + k_1/3)$$

$$k_3 = \Delta t f(t_n + 2\Delta t/3, y_n + k_2 - k_1/3)$$

$$k_4 = \Delta t f(t_n + \Delta t, y_n + k_3 - k_2 + k_1/3)$$

Runge-Kutta-Verfahren sind **Einschrittverfahren**

nutzen nur Information (Ableitungsberechnungen)
aus **einem** Intervall (Schritt) $[t_n, t_{n+1}]$

Mehrschrittverfahren

nutzen auch zurückliegende Information
(aus "vorigen" Intervallen)

Prädiktor-Korrektor-Verfahren (ebenfalls viel verwendet)
sind Mehrschrittverfahren

prinzipielles Schema:

- Prädiktor(teil)schritt:

berechne y_{n+1}^P ("predicted")
aus äquidistanten Punkten $t_n, t_{n-1}, t_{n-2}, \dots$
deren Funktionswerten $y_n, y_{n-1}, y_{n-2}, \dots$
und Ableitungswerten $f(\cdot)$ an diesen Punkten

- Korrektor(teil)schritt:

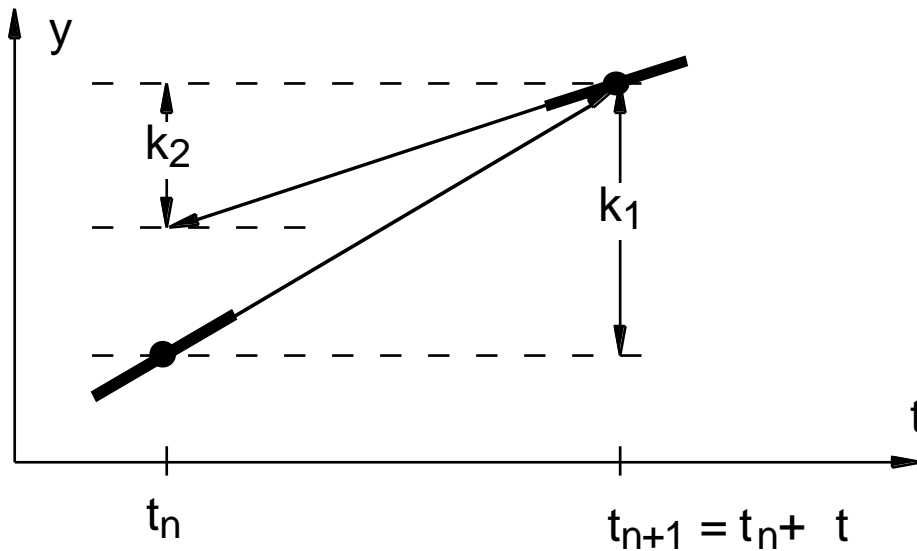
berechne Steigung an diesem Punkt
dh $f(t_{n+1}, y_{n+1}^P)$
und y_{n+1}^C ("corrected")
aus zuvor genutzter Information
+ $f(t_{n+1}, y_{n+1}^P)$

- (- Schema ließe sich offensichtlich "iterieren":
lohnt nicht, dh nutze y_{n+1}^C als Basis nächsten Schritts)

Insgesamt wieder Familie von Verfahren

- unterschiedlicher Ordnung / Fehlerordnung
(je nach "Zahl" genutzter Punkte)
- mit verschiedenen Alternativen / Varianten

nochmals Betrachtung
 Beispiel Runge-Kutta 2. Ordnung (Euler-Cauchy / Heun)



Verfahren

- bei vollem Euler-Schritt ergab sich
 $(y =) k_1 = t \cdot y_n' = t \cdot f(t_n, y_n)$

umgedeutet als Prädiktor(teil)schritt:

$$y_{n+1}^P = y_n + t \cdot f(t_n, y_n)$$

genutzte Information:

t_n, y_n und Ableitungswert $f(t_n, y_n)$ an diesem Punkt
 (+ "nichts" vorher)

- Steigung im erreichten Punkt ergab sich zu
 $f(t_n + t, y_n + k_1)$

umgedeutet als Beginn Korrektor(teil)schritt:

$$= f(t_{n+1}, y_{n+1}^P)$$

- bei dieser Steigung ergab sich
 $(y=) k_2 = t \cdot f(t_n + t, y_n + k_1)$
 und verwendet wurde
 $y = 1/2 \cdot (k_1 + k_2)$
 $y_{n+1} = y_n + 1/2 \cdot (k_1 + k_2)$

umgedeutet als Fortsetzung Korrektor(teil)schritt:

$$y_{n+1}^C = y_n + t/2 \cdot \{ f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1}^P) \}$$

genutzte Information:

$$\text{"zuvor genutzte"} + f(t_{n+1}, y_{n+1}^P)$$

Heun-Verfahren ("Runge-Kutta 2.Ordnung")
 ist demnach "auch" Prädiktor-Korrektor-Verfahren

entsprechend:

- wo Einschrittverfahren (zB Runge-Kutta)
 im Intervall $[t_n, t_{n+1}]$ äquidistante Zwischenpunkte nutzen
- lassen sich durch Uminterpretation daraus
 Prädiktor-Korrektor-Verfahren formen

allgemein aber:

- größere Systematik bei Konstruktion
 von Prädiktor-Korrektor-Verfahren
- unter Einschluß von Fehlerabschätzungen

Nebengesichtspunkt:

Einschrittverfahren sind "selbststartend"

Mehrschrittverfahren benötigen separate Initialisierung

"viele Verfahren":

Klassifikation zB nach

Berücksichtigung zurückliegender Punkte

- Einschrittverfahren
- Mehrschrittverfahren

Einbeziehung zukünftiger Werte

- explizit
- implizit

Konvergenzordnung

- 1. 2. ... Ordnung

Schrittweitensteuerung

- feste Schrittweite
- variable Schrittweite

Extrapolation

Ordnungssteuerung

- feste Ordnung
- variable Ordnung

vgl Spezialliteratur

und: auch hier ist der Fall stochastischer Modelle

- wesentlich ("Störungen" zB Wind, Strömung)
- und bearbeitet !

vgl Spezialliteratur