

Vorlesung 1.

# Nichtlineare Dynamik: Grundbegriffe und Terminologie



Dynamik kommt vom altgriechischen **δυναμις**: Kraft.

Wikipedia: In der Physik wird unter Dynamik die Beschreibung der Bewegung von Körpern in ihrer Abhängigkeit von den einwirkenden Kräften verstanden.

Manchmal wird aber der Begriff **Dynamik**

in einem allgemeineren Sinn verwendet:

um einfach **Prozesse** zu bezeichnen, die sich *im Laufe der Zeit* entwickeln, die Abhängigkeit bestimmter Größen von der Zeit, ohne spezifische Mechanismen dieser Abhängigkeit zu implizieren.

Wir interessieren uns meist für Prozesse, deren Observablen im Laufe der Zeit keine konstante Grenzwerte anstreben,

sondern unaufhörlich abwechselnd zu- und abnehmen, also **oszillieren**.

So ein Prozess (nicht unbedingt streng periodisch) nennen wir eine **Schwingung**.

Wird dabei die Änderung des Outputs (z.B. Amplitude: Spanne zwischen Maxima und Minima von einer Observable) **nicht** proportional zur Änderung des Inputs, nennt man so eine Schwingung **nichtlinear**.

Damit kann man eine Disziplin, die sich mit **nichtlinearen Schwingungen** befasst, als **Nichtlineare Dynamik** bezeichnen.



Am 24.10.1676 schreibt Isaac **Newton** an Gottfried Wilhelm **Leibniz**  
(über Henry *Oldenburg*, Secretary of the Royal Society):

**6a c c d æ 13e f f 7i 3l 9n 4o 4q r r 4s 8t 12u x**

Entziffert: *Data æquatione quotcunque fluentes quantitates involvente,  
fluxiones invenire; et vice versa*

Englisch: *Given an equation involving any number of fluent quantities  
to find the fluxions, and vice versa.*

*Fluente*: Funktionen der Zeit;

*Fluxionen*: Ableitungen nach der Zeit.

*fluentes ... involvente, fluxiones invenire*  $\equiv$  Differentialrechnung.

*vice versa*  $\equiv$  **Differentialgleichungen.**



Laut der allgemeinen Theorie der Differentialgleichungen,  
um eine gewöhnliche DGL  $n$ -Ordnung

$$\frac{d^n x}{dt^n} = F \left( x(t), \frac{dx}{dt}, \frac{d^2 x}{dt^2}, \dots, \frac{d^{(n-1)} x}{dt^{n-1}}, t \right) \quad \text{zu lösen,}$$

brauchen wir einen Satz von  $n$  Anfangswerten:

$$x(t_0), \frac{dx}{dt}(t_0), \frac{d^2 x}{dt^2}(t_0), \dots, \frac{d^{(n-1)} x}{dt^{n-1}}(t_0).$$

Eine allgemeine Lösung enthält dann  $n$  Integrationskonstanten.

Ändert man einen Anfangswert (oder mehrere), so ändert sich auch die Lösung.

Die Änderungen können rein quantitativ sein, aber manchmal auch qualitativ: zB bei manchen Sätzen von Anfangswerten strebt die Lösung gegen eine Konstante, bei den anderen Sätzen hingegen oszilliert sie als Funktion von  $t$ .

Praktische Frage: *wie viele Sätze von Anfangswerten braucht man auszuprobieren, um die typischen Merkmale der Lösung zu erkennen?*

Uns interessieren die *allgemeinen* **qualitative** Eigenschaften,  
die allen (oder großen Gruppen) Lösungen gemeinsam sind.

Das wird oft als *Qualitative Theorie der Differentialgleichungen* bezeichnet.

Praktischer Trick: **Eine** Differentialgleichung  $n$ .-Ordnung,

$$\frac{d^n x}{dt^n} = F \left( x(t), \frac{dx}{dt}, \frac{d^2 x}{dt^2}, \dots, \frac{d^{(n-1)} x}{dt^{n-1}}, t \right) \quad (*)$$

kann in ein System von  $n$  Gleichungen **erster** Ordnung umgewandelt werden:

Wir führen  $n$  neuen Variablen ein:  $x_1(t) \equiv x(t)$ ,

$$x_2(t) \equiv \frac{dx}{dt}, \quad \text{für } 2 < k < n: \quad x_k(t) \equiv \frac{d^{(k-1)} x}{dt^{k-1}}, \quad \dots$$

und schließlich

$$x_n(t) \equiv \frac{d^{(n-1)} x}{dt^{n-1}}.$$

Damit haben wir ein **System** aus  $n$  Gleichungen:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2,$$

$$\frac{dx_k}{dt} = x_{k+1} \quad (k = 2, \dots, n-1),$$

$$\frac{dx_n}{dt} = F(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$$

das der ursprünglichen Einzelgleichung  $(*)$  äquivalent ist.

Ein dynamisches System setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen:

- 1) **Dynamische Variablen**: Ein Satz von Größen,  
der den Systemzustand zu jedem Zeitpunkt  
vollständig charakterisiert;
- 2) **Evolutionoperator**: eine Regel, die es erlaubt,  
die Werte von allen dynamischen Variablen zu jedem späteren  
Zeitpunkt aus deren Anfangssatz eindeutig zu bestimmen.

▷ *Beispiel einer solchen Regel:*

*ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen.*

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \quad \text{oder} \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$$

→ *nicht-autonomes* oder *autonomes*  
dynamische Systeme

?

*Jedem Punkt des Phasenraumes  $\mathbf{x}$  wird durch dynamisches System  
ein Vektor der rechten Seiten zugeordnet.*

*Gesamtheit dieser Vektoren: ein Vektorfeld  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ .*

## Diskretisierungsstufen und Typen von Dynamischen Systemen

- 1 Kontinuierlicher Raum, kont. Zeit, kont. Observablen.

*Beispiel: Temperaturfeld im Raum wo ich unterrichte:  $T(r, t)$ .*

Dynamische Systeme: **partielle Differentialgleichungen**.

- 2 Diskreter Raum, kont. Zeit, kont. Observablen.

*Beispiel: Temperaturwert im gegebenen Raumpunkt  $T(t)$ .*

D.S.: **gewöhnliche Differentialgleichungen**.

- 3 Diskreter Raum, diskrete Zeit, kont. Observablen.

*Beispiel: Temperaturmesswert  $T_n$  am Mittag 15.04.  $n$ .Jahres.*

D.S.: **Abbildungen** (rekurrente Sequenzen)  $x_{n+1} = f(x_n)$ .

- 4 Diskreter Raum, diskrete Zeit, diskrete Observablen.

D.S.: **Symbolische Dynamik**: *ABBABAABBAABAB...*



▷ **Phasenraum:**

Gesamtheit von allen Werten von allen dynamischen Variablen.

$N$  Variablen  $\rightarrow$   $N$ -dimensionaler Phasenraum.

Instantaner Zustand des Systems: Punkt im Phasenraum.

▷ **Phasentrajektorie** (Bahnkurve, Lösungskurve, Orbit):

Menge von Punkten im Phasenraum,  
die der Zeitentwicklung von **einem** Anfangszustand entspricht.

▷ Phasentrajektorien können sich nicht schneiden.

**Dynamische Zustände und entsprechende Trajektorien:**

▷ Gleichgewicht, Ruhelage: **Fixpunkt**.

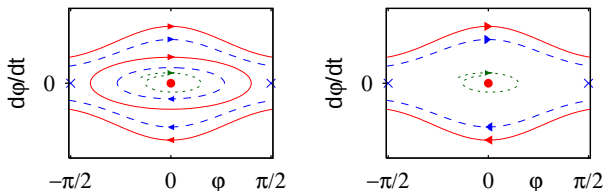
▷ Periodischer Prozess (Schwingungen): **geschlossene Bahnkurve**.

▷ Schwebung, Schwingung mit 2 Frequenzen:  
**Oberfläche eines 2-dimensionalen Torus**.

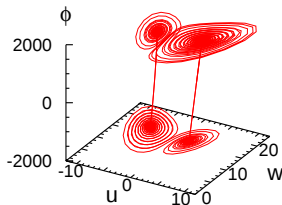
▷ Ungeordnete, irreguläre Schwingungen: **???**

## Phasenportrait:

geometrische Darstellung typischer Trajektorien im Phasenraum.



- ▷ Zeitverlauf wird nicht angezeigt:  
es ist nur eine aus vielen möglichen Parametrisierungen entlang der Bahn
- ▷  $N > 2 \implies$  Projektionen



*Zwei Klassen von dynamischen Systemen:*

- ▷ **Konservative Systeme** besitzen Invariante.  
(klassisches Beispiel: Gesamtenergie von mechanischen Systemen  
in Abwesenheit von Reibung)
- ▷ **Dissipative Systeme:** wird ein dissipatives System sich selbst überlassen,  
so entsteht nach und nach ein Zustand,  
der die Abhängigkeit vom Ausgangszustand (asymptotisch) verliert:  
Anfangszustände aus einer Menge mit **positivem Maß**  
münden in denselben Endprozess.
- ▷ **Attraktor:** Menge von Punkten im Phasenraum,  
die einem dieser Endprozesse entsprechen.
- ▷ Menge von Anfangsbedingungen im Phasenraum, die zu einem Attraktor  
führen, sind sein **Einzugsgebiet** (*basin of attraction*).
- ▷ Arten von Attraktoren: stabiles Gleichgewicht,  
stabile geschlossene Bahnkurve (**Grenzyklus**),  
**seltsamer chaotischer Attraktor** (nicht eine einzelne Bahn,  
sondern eine Menge von unendlich vielen Bahnen)



## Evolution von Volumen im Phasenraum

- ▷  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \iff \dot{x}_i = f_i(x_i), i = 1, \dots, N$ , mit  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ : Vektor(feld) der rechten Seiten.
- ▷ Gegeben: ein (kleiner) Quader mit Seitenlängen  $a_1, a_2, \dots, a_N$   
und Volumen  $V = a_1 a_2 \dots a_N$ .

$$\triangleright dV/dt = \dot{a}_1 a_2 \dots a_N + a_1 \dot{a}_2 \dots a_N + \dots + a_1 a_2 \dots \dot{a}_N$$

$$= V \left( \frac{\dot{a}_1}{a_1} + \frac{\dot{a}_2}{a_2} + \dots + \frac{\dot{a}_N}{a_N} \right)$$

- ▷ Evolution der Kantenlänge:

$$\dot{a}_j = \frac{d}{dt}(a_j^{\text{rechts}} - a_j^{\text{links}}) \equiv (\dot{a}_j^r - \dot{a}_j^l)$$

$$= \left( \dot{a}_j^l + a_j \left. \frac{d\dot{a}_j^l}{dx_j} \right|_{x_j=a_j^l} + O(a_j^2) \right) - \dot{a}_j^l = a_j \frac{\partial \dot{x}_j}{\partial x_j} + O(a_j^2) = a_j \frac{\partial f_j}{\partial x_j} + O(a_j^2)$$

$$\triangleright \frac{dV}{dt} = V \sum_j \frac{\partial f_j}{\partial x_j} = V \operatorname{div} \mathbf{f}$$

## Beispiel: hamiltonsche Dynamik

- ▷  $H = H(q_1, \dots, q_N, p_1, \dots, p_N)$ .
- ▷ Bewegungsgleichungen:  $\dot{q}_i = \partial H / \partial p_i$  und  $\dot{p}_i = -\partial H / \partial q_i$
- ▷  $\frac{dV}{dt} = V \sum_i \left( \frac{\partial \dot{q}_i}{\partial q_i} + \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial p_i} \right) = V \sum_i \left( \frac{\partial^2 H}{\partial p_i \partial q_i} - \frac{\partial^2 H}{\partial p_i \partial q_i} \right) = 0$ .
- ▷  $\Rightarrow$  Phasenvolumen bei den hamiltonschen Systemen  
bleibt erhalten (Satz von Joseph Liouville).



## Andere Beispiele:

$$\triangleright \begin{cases} dx_1/dt = -3x_1 + \sin x_2 \\ dx_2/dt = -5 \exp(3x_1) + 2x_2 \end{cases} \quad \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{f} &= -3 + 2 = -1 < 0 \\ &\Rightarrow V(t) \rightarrow 0. \end{aligned}$$

$$\triangleright \begin{cases} dx_1/dt = 3x_1 + \sin x_2 \\ dx_2/dt = -5 \exp(3x_1) + 2x_2 \end{cases} \quad \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{f} &= 3 + 2 = 5 > 0 \\ &\Rightarrow V(t) \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

- $\triangleright$  Was bedeutet das Schrumpfen (Anschwellen) vom Phasenvolumen?  
 Zustandsdichte wird mit der Zeit immer größer (immer kleiner).  
 Das schrumpfende Phasenvolumen entspricht  
 den **dissipativen** Systemen.  
 Mehr davon später...

Pierre-Simon Laplace (1814):

“We may regard the present state of the universe  
as the effect of its past and the cause of its future.

*Une intelligence qui, à un instant donné,  
connaîtrait toutes les forces dont la nature  
est animé et la situation respective des êtres  
qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements  
des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome;  
rien ne serait incertain pour elle,  
et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.”*



## Pierre-Simon Laplace (1814):

„Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Universums als Folge eines früheren Zustandes ansehen und als Ursache des Zustandes, der danach kommt.

*Eine Intelligenz, die in einem gegebenen Augenblick alle Kräfte kennt, mit denen die Welt begabt ist, und die gegenwärtige Lage der Gebilde, die sie zusammensetzen, und die überdies umfassend genug wäre, diese Kenntnisse der Analyse zu unterwerfen, würde in der gleichen Formel die Bewegungen der größten Himmelskörper und die des leichtesten Atoms einbegreifen. Nichts wäre für sie ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen.“*





Ist alles tatsächlich so gut und zuverlässig berechenbar?

Nehmen wir uns ein einfaches System, eine *Abbildung* des Intervalls  $[0 : 1]$ :

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n, & 0 \leq x_n < 1/2 \\ 2x_n - 1, & 1/2 \leq x_n \leq 1 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{(Verdopplung)} \\ \text{(Verdopplung und Verschiebung)} \end{array}$$

Wo muß „eine Intelligenz“ z.B. den Anfangspunkt  $x_0$  setzen,  
um nach 60 Iterationen sich in der linken Hälfte des Intervalls zu finden?

Das berechnet uns (ohne extra Vorkehrungen) auch kein moderner Computer.

---

Wird eine Zahl  $x$  zwischen 0 und 1 als **binärer Bruch** dargestellt:

$$x = \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{4} + \frac{a_3}{8} + \dots = \sum_{j=1}^{\infty} a_j 2^{-j} \equiv \{a_1, a_2, a_3, \dots\} \quad \text{mit } a_j = 0 \text{ oder } 1,$$

so wird die Lage im Intervall (rechts oder links von  $1/2$ )  
lediglich durch  $a_1$  bestimmt.

$$a_1 = 0 \Rightarrow 0 < x < 1/2, \quad a_1 = 1 \Rightarrow 1/2 \leq x < 1.$$



Nehmen wir uns ein einfaches System, eine Abbildung des Intervalls  $[0 : 1]$ :

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n, & 0 \leq x < 1/2 \\ 2x_n - 1, & 1/2 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

- Iteration der Abbildung von  $x_0 = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$  in der binären Darstellung:

$$2x_0 = 2 \left( \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{4} + \frac{a_3}{8} + \dots \right) = a_1 + \frac{a_2}{2} + \frac{a_3}{4} + \frac{a_4}{8} + \dots = a_1 + \{a_2, a_3, a_4, \dots\}.$$

Der erste Summand verschwindet bei der Iteration immer:

falls  $a_1 = 0$ , ist es sofort 0,

und falls  $a_1 = 1$ , wegen der zweiten Zeile (1 wird abgezogen).

- Eine Iteration der Abbildung wird aus dieser Sicht zur Verschiebung nach links:

$$\{a_1, a_2, a_3, a_4, \dots\} \Rightarrow \{a_2, a_3, a_4, a_5, \dots\} \Rightarrow \{a_3, a_4, a_5, a_6, \dots\} \Rightarrow \dots$$

- Damit wird die Lage im Intervall nach 60 Iterationen einzig und allein durch die 61. Stelle in der Binärdarstellung vom Anfangswert  $x_0$  bestimmt.
- Aber die Rechner haben nur 52 bits für die Darstellung von „langen“ Zahlen!  
*“Une intelligence” gerät in Schwierigkeiten...*



- Stabilität: Arten und Kriterien.
- Ein- und zweidimensionale Dynamik.
- Populationsdynamik. Lotka-Volterra Gleichungen.
- Schwingungen: Kriterien für Existenz/Nicht-Existenz.
- Übergänge zwischen dynamischen Zuständen: *Bifurkationen*.
- Periodische Schwingungen. Relaxationsschwingungen.
- Einfache Modelle der Neurodynamik. Anregbarkeit.
- Stabilität der periodischen Schwingungen. Poincare-Abbildung.
- Einführung in die fraktale Geometrie.
- Lorenz-Gleichungen. Chaotischer *Attraktor*.
- Allgemeine Eigenschaften chaotischer Dynamik. Lyapunov-Exponenten.
- Universelle Szenarien vom Übergang zum Chaos. Perioden-Verdopplungssequenz.
- Quasiperiodizität. *Synchronisation*.
- Hamiltonsche Dynamik: Chaos ohne Attraktoren.

