

12. Differentialgleichungen (kurz)

[Literatur: Teschl05, Bd. 2, S. 171-197]

12.1. Wozu braucht man Differentialgleichungen?

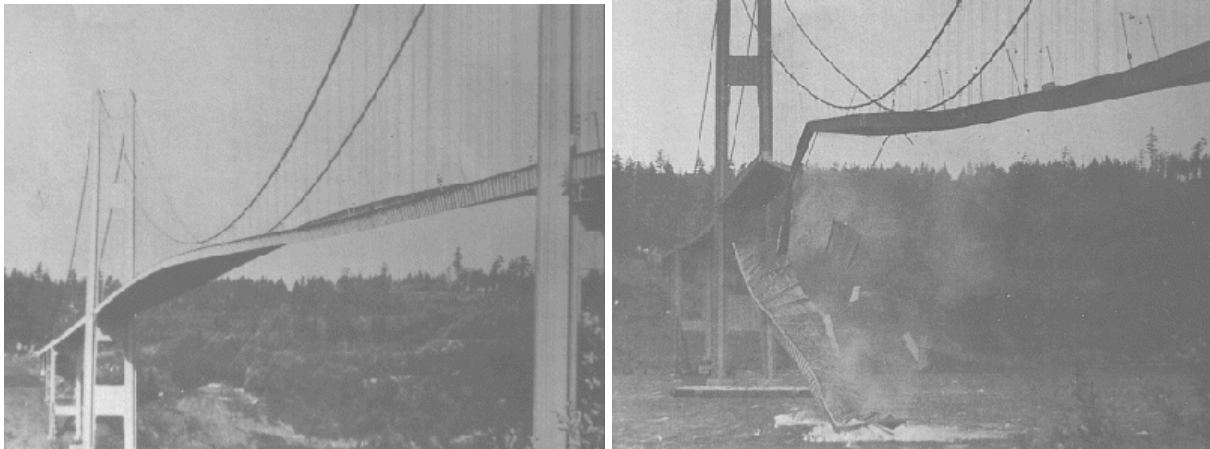
Am 28. Juli 2006 stürzte in Köln ein Kran samt Lastwagen um. Was war passiert? –

- Die Tragegurte am zu transportierenden Gegenstand (Tresor) rissen
- Der Kran wurde in Schwingungen versetzt und stürzte um.

Der Kran ist ein komplexes technisches System, das zu Schwingungen in der Lage ist.⁶

Die **Computersimulation** (mit Differentialgleichungen) untersucht solche Systeme, um bereits bei der Konstruktion aufzudecken, ob gefährliche Schwingungen im System stecken.

Weiteres berühmtes Beispiel: [Tacoma Bridge Failure \(Video\)](#) am 07. November 1940:



Was war passiert?

- Ein starker Wind hatte die Brücke zu Schwingungen aufgeschaukelt, die die Brückenkonstruktion nicht geeignet dämpfte.
- Die Neukonstruktion der Brücke hatte entsprechende Dämpfungselemente eingebaut und hält seither allen Winden stand.

Die Simulation (mit Differentialgleichungen) ist ein wichtiges Hilfsmittel in Informatik und Ingenieurwissenschaften, um das Verhalten in Extremfällen zu verstehen. Weiteres Anwendungsfeld sind Computerspiele: **Game Physics**.

Mehr dazu im **WPF „Spiele, Simulation und dynamische Systeme“** (W. Konen).

Ein schönes Beispiel von <http://crayon-physics.softonic.de>: [crayon.bat](#): Ein kleines Spiel mit großem WOW-Effekt, das Game Physics interaktiv erfahrbar macht. Man zeichnet Boxen oder Balken, die unter Schwerkraft fallen, mit dem Ziel, einen Ball zu einem Stern zu bringen.

Hier befassen wir uns mit sehr einfachen dynamischen Systemen

- freier Fall
- Federpendel

an denen wir die Grundlagen der **Differentialgleichungen (DGL)** erklären.

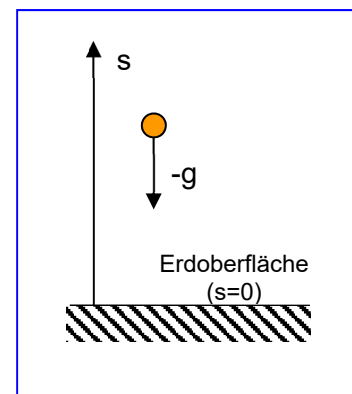
Zur Lösung von DGLs braucht man **komplexe Zahlen** (!)

⁶ Weitere spektakuläre Kran-Umsturz-Photos: www.craneaccidents.com

12.2. Grundlagen

Aktivierung: Wie kann man den physikalischen Vorgang „Freier Fall eines Körpers“ mathematisch beschreiben? Welchen Kräften unterliegt der Körper?

ANTWORT:



Als Antwort erhalten wir eine Gleichung, die die Ableitungen einer Funktion – hier $s(t)$ – enthält.

Satz S 12-1: gewöhnliche Differentialgleichung n. Ordnung

Sei $x(t)$ eine reelle Funktion in einer Veränderlichen $t \in \mathbb{R}$. Eine Gleichung, in der die Funktion $x(t)$ und ihre Ableitungen bis zur n. Ordnung auftreten, heißt **gewöhnliche Differentialgleichung (DGL) n. Ordnung**.

Satz S 12-2: lineare Differentialgleichung

Sei $y(x)$ eine reelle Funktion in einer Veränderlichen $t \in \mathbb{R}$. Eine Differentialgleichung der Form

$$x^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)x^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)x'(t) + a_0(t)x(t) = g(t)$$

in der also die $x^{(i)}$ nur als lineare Terme auftauchen, heißt **lineare Differentialgleichung n. Ordnung**. $g(t)$ (der einzige Summand, in dem x nicht vorkommt) heißt **Störglied**.

Ist das Störglied $g(t) = 0$, so heißt die DGL **homogen**, sonst **inhomogen**.

Sind die $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$ keine Funktionen von t sondern Konstanten, so haben wir den Sonderfall der **linearen DGL mit konstanten Koeffizienten**.

(Das Störglied darf weiterhin eine nichtkonstante, nichtlineare Funktion $g(t)$ sein!)

Eine DGL ist nicht-linear, wenn z.B. Terme der Form x^2 , x^3 , $x \cdot x''$, $\sin(x)$, $\ln(x)$, $|x|$ o.ä. auftauchen (also nichtlinear **in x**).



Übung: Interpretieren Sie die nachfolgenden DGLs:

(a) $x'(t) = -2t$

(b) $t + xx' = 0$

(c) $s''(t) = g$

(d) $x'' + x = 0$

(e) $2x'' - 4x' + 20x = \cos(\omega t)$

12.3. Lösung einfacher Differentialgleichungen

12.3.1. Nur ein Ableitungsterm

DGLs, in denen nur ein Ableitungsterm auftritt, lassen sich oft recht einfach durch Integrieren lösen:

Beispiel freier Fall:

$$s''(t) = -g$$

$$1. \text{ Integration} \Rightarrow \int s''(t) dt = - \int g dt \Rightarrow$$

$$s'(t) = -gt + C_1 \quad (1)$$

$$2. \text{ Integration} \Rightarrow \int s'(t) dt = \int (-gt + C_1) dt \Rightarrow$$

$$s(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + C_1t + C_2 \quad (2)$$

Aktivierung: Welche Bedeutung haben die Integrationskonstanten $C_1, C_2 \in \mathbb{R}$?

ANTWORT:

Bem.:

1. Eine DGL n. Ordnung hat n unbestimmte Konstanten (freie Parameter).
2. Die Lösung mit unbestimmten Integrationskonstanten C_1 und C_2 heißt **allgemeine** Lösung der DGL.
3. Eine Lösung mit bestimmten Werten für C_1 und C_2 heißt **spezielle (partikuläre)** Lösung der DGL.
4. Legt man bei einer DGL n. Ordnung n Anfangswerte fest, so erhält man genau eine spezielle Lösung (**Anfangswertproblem**).

Übung: Gegeben sei $s''(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}}$.

- (a) Interpretieren Sie die DGL (Ordnung, linear, homogen)
- (b) Ermitteln Sie die allgemeine Lösung $s(t)$
- (c) Wie lautet die spezielle Lösung für $s'(1) = 2$ und $s(1) = 2$?



12.3.2. Homogene lineare DGL mit konstanten Koeffizienten

Aktivierungen:

		Antwort
a) Welche Funktion ist gleich ihrer 2. Ableitung?	$x''(t) = x(t)$	
b) Welche Funktion ist proportional zu ihrer 2. Ableitung?	$x''(t) = ax(t)$	
c) Welche Funktion ist das Negative ihrer 2. Ableitung?	$x''(t) = -x(t)$	
d) Welche Funktion ist negativ-proportional zu ihrer 2. Ableitung?	$x''(t) = -ax(t)$	
a sei eine reelle Zahl > 0		

Finden Sie (durch Raten, Ausprobieren, Wissen) mindestens eine Lösung!

Es gibt aber in jedem Fall auch eine 2. Lösung. Finden Sie diese auch?

ALLE homogenen linearen DGLs mit konstanten Koeffizienten

$$x^{(n)}(t) + a_{n-1}x^{(n-1)}(t) + \dots + a_1x'(t) + a_0x(t) = 0$$

lassen sich durch den **einen Ansatz** $x(t) = e^{\lambda t}$ mit $\lambda \in \mathbb{C}$ lösen.

Satz S 12-3: Homogene lineare DGL mit konstanten Koeffizienten

1) **Spezielle Lösungen** einer homogenen linearen DGL ermittelt der Ansatz

$$x(t) = e^{\lambda t} \text{ mit } \lambda \in \mathbb{C}$$

2) **Superpositionsprinzip**: Sind $x_1(t)$ und $x_2(t)$ zwei Lösungen einer homogenen linearen DGL, so ist auch jede Linearkombination

$$c_1x_1(t) + c_2x_2(t)$$

eine (allgemeine) Lösung dieser DGL mit $c_1, c_2 \in \mathbb{C}$.

3) **Real- und Imaginärteil als Lösung**: Ist $x(t)$ eine (komplexe) Lösung der homogenen linearen DGL 2. Ordnung mit konstanten und **reellen** Koeffizienten, so sind auch Realteil $\operatorname{Re}(x(t))$ und Imaginärteil $\operatorname{Im}(x(t))$ (eigenständige) Lösungen dieser homogenen linearen DGL. Es ist

$$a \operatorname{Re}(x(t)) + b \operatorname{Im}(x(t))$$

eine (allgemeine) Lösung dieser DGL. Wählt man $a, b \in \mathbb{R}$, so ist die Lösung rein reell.

Herleitung in Vorlesung.

Anmerkung:

1. Das Superpositionsprinzip enthält als Spezialfall (für $c_2=0$) die Aussage, dass mit $x_1(t)$ auch jedes Vielfache $c_1x_1(t)$ eine Lösung der DGL ist.
2. **Teil 3) beantwortet die Frage: Wenn ich mit einer rein reellen DGL starte, dann aber wegen Ansatz 1) komplexe Lösungen erhalte, wie komme ich dann wieder zu reellen Lösungen?**

Beispiel: Ein radioaktiver Zerfall werde beschrieben durch die DGL $x'(t) = -0.05x(t)$ oder $x'(t) + 0.05x(t) = 0$. Wie lautet $x(t)$, wenn $x(0) = 4$ gelten soll?

Lösung: Der Ansatz $x(t) = e^{\lambda t}$ liefert $\lambda e^{\lambda t} + 0.05e^{\lambda t} = 0 \Rightarrow \lambda = -0.05$.

Die allgemeine Lösung lautet gem. Superpositionsprinzip $x(t) = c_1 e^{-0.05t}$. Die Bedingung $x(0) = c_1 = 4$ führt auf $x(t) = 4e^{-0.05t}$.



Übung 1: a) Ermitteln Sie die allgemeine Lösung der DGL $x''(t) + 4x(t) = 0$

(Dies ist eine Gleichung vom Typ „Ungedämpfte Schwingung“. Die 2. Ableitung ändert alles, jetzt erhalten wir statt exponentiellem Zerfall die Funktionen sin oder cos)

b) Ermitteln Sie nach S12-3, Nr. 3 auch die allgemeine Lösung in rein reeller Form.

c) Ermitteln Sie aus der allgemeinen Lösung aus b) eine spezielle Lösung in reeller Form, die $x'(0) = 0.5$, $x(0) = 0.5$ erfüllt.



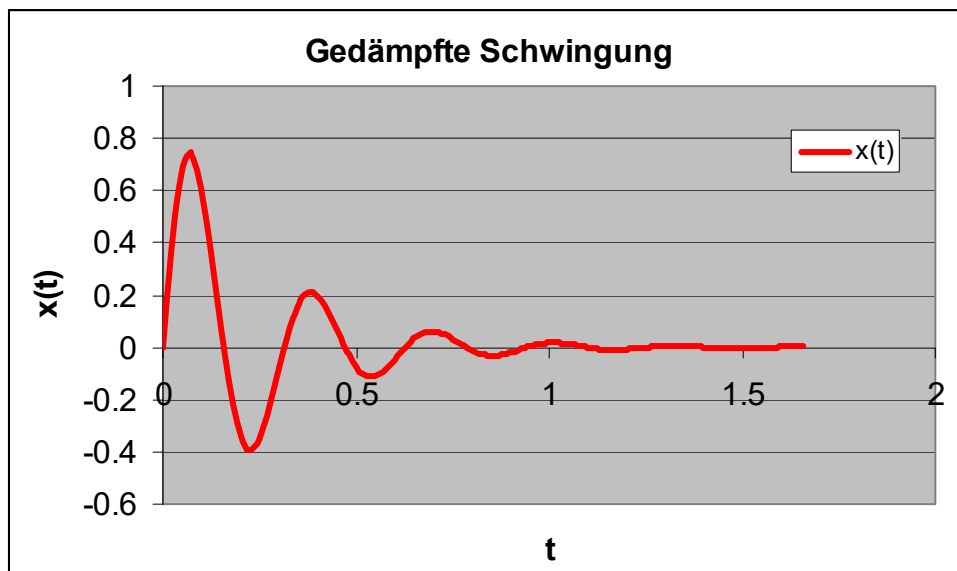
Übung 2: Ermitteln Sie die allgemeine Lösung der DGL $x''(t) + 4x'(t) + 404x(t) = 0$

(Dies ist eine Gleichung vom Typ „Gedämpfte Schwingung“)

Schreiben Sie die allgemeine Lösung nach S12-3, Nr. 3, auch in rein reeller Form!

Eine spezielle Lösung dieser DGL sieht wie folgt aus ([Mathe-Reihen-V2.xlsx](#), Blatt "DGL Schwingung", a=0, b=1):

$$x_{\text{spez}}(t) = e^{-2t} \sin(20t)$$



Übung 3: Ermitteln Sie die Lösung des Anfangswertproblems

$$x''(t) - 9x(t) = 0, \quad x'(0) = 1, \quad x(0) = 0$$

(Dies ist eine Gleichung vom Typ „Exponentielles Wachstum/Zerfall“)

Lösung:

$$x(t) = \frac{1}{6}e^{3t} - \frac{1}{6}e^{-3t}$$

12.4. Fazit Differentialgleichungen

Wir sehen hier den großen Vorteil komplexer Zahlen: Durch den Ansatz $x(t) = e^{\lambda t}$ mit $\lambda \in \mathbb{C}$ lassen sich ganz verschiedenartige Probleme (radioaktiver Zerfall, ungedämpfte Schwingung, gedämpfte Schwingung, elektromagnetischer Schwingkreis) in EINEM Framework lösen.

⇒ „ONE SIZE FITS ALL!“

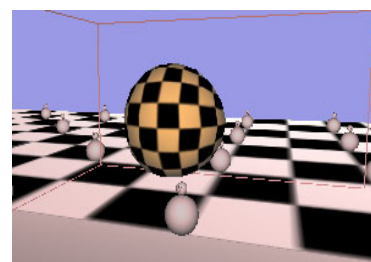
Was hängenbleiben sollte:

- die Typisierung von DGLs: **Ordnung, homogen/inhomogen, linear/nichtlinear.**
- Homogene lineare DGLs mit konstanten Koeffizienten löst man mit dem Ansatz $x(t) = e^{\lambda t}$ mit $\lambda \in \mathbb{C}$. und kann damit eine Reihe von DGLs aus ganz verschiedenen Anwendungsbereichen einheitlich lösen („ONE SIZE FITS ALL“)
- Mehrere Lösungen einer homogenen linearen DGL lassen sich linear superponieren

12.4.1. Where to go from here

Dies war nur eine sehr kurze Einführung in das faszinierende und wichtige Gebiet der Differentialgleichungen. Einige weiterführende Vertiefungen:

- Was die umstürzende Brücke mit DGLs zu tun hat, konnten wir in dieser kurzen Einführung noch nicht ganz erklären. Wer es genau wissen will → Informatik-Master studieren, in der SGM-Vorlesung (Spezielle Gebiete der Mathematik) gehen wir der Sache auf den Grund.
- DGLs spielen eine zentrale Rolle bei Modellierung und Simulation. Anwendung in der Informatik z.B. in Game Physics, der physikalischen Modellierung in Computerspielen **[Bild]**. Wer hier mehr lernen will: **WPF Spiele, Simulation und Dynamische Systeme** (W. Konen)
- Viele DGLs lassen sich nur schwer analytisch lösen. Hier kommt **Maple** ins Spiel, das besonders stark darin ist, solche analytischen Lösungen zu finden.
- Manche (viele) DGLs lassen sich gar nicht analytisch lösen. Diese werden dann numerisch gelöst, z.B. **Runge-Kutta-Verfahren**. Eine Einführung zu einfachen numerischen Lösungsverfahren gibt **WPF Spiele, Simulation und Dynamische Systeme**.
- Ein weiteres Feld sind **Systeme von DGLs**. Beispiel **Crashtest**: Ein Fahrzeug wird in ein Netz von 10000 einzelnen Punkten zerlegt, deren DGLs simultan (meist numerisch) gelöst werden.
- Wieso ist es trotzdem wichtig, einfache DGLs (wie hier z.B. lineare DGLs) analytisch zu lösen? – Weil sich viele komplizierte DGLs in der Nähe **stationärer Punkte** (nahe an einem Ruhezustand) **linearisieren** lassen und in dieser Form wichtige Teilaspekte analytisch verstanden werden können. Über den analytischen Weg gelangt man oft zu einer tieferen Einsicht in die Zusammenhänge.



Womit wir wieder am Anfang wären (s. Kap. 0, Mathematik 1):

*Das Ziel des Rechnens ist Einsicht, nicht Zahlen.
[Richard Hamming, 1915-1998]*