

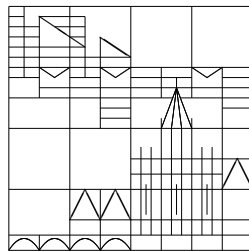
Skript zur Vorlesung

Analysis III

Gewöhnliche Differentialgleichungen

Wintersemester 2010/11

Robert Denk



Universität Konstanz

Fachbereich Mathematik und Statistik

16. 3. 2011

Inhaltsverzeichnis

I. Gewöhnliche Differentialgleichungen	1
1 Existenz- und Eindeutigkeitssatz	1
2 Spezielle Lösungsmethoden	14
a) Separable Gleichungen (Trennung der Variablen)	14
b) Homogene Differentialgleichungen und Substitution	16
c) Potenzreihenansatz	17
d) Exakte Differentialgleichungen	19
3 Lineare Differentialgleichungen	21
a) Homogene lineare Dgl.	21
b) Inhomogene Gleichungen	23
c) Systeme mit konstanten Koeffizienten	25
d) Lineare Dgl. höherer Ordnung mit konstanten Koeffizienten	29
4 Qualitative Aspekte	33
a) Stabilität	34
b) Phasenportraits	44
5 Rand- und Eigenwertprobleme	51
a) Randwertaufgaben für lineare Dgl.-Systeme	52
b) Randwertprobleme für lineare Dgl. höherer Ordnung	54
c) Sturm-Liouville-Randwertaufgaben	57
d) Selbstadjungierte Eigenwertaufgaben	60
Literatur	71

I. Gewöhnliche Differentialgleichungen

1. Existenz- und Eindeigkeitsatz

1.1 Worum geht's? In der Modellierung treten häufig Gleichungen der Form $y' = \alpha y$ oder (bis auf Konstanten) $y'' + y = 0$ auf. Die erste Gleichung beschreibt z.B. radioaktiven Zerfall (dann ist $\alpha < 0$) oder die Geldmenge bei kontinuierlicher fester Verzinsung α (in diesem Fall ist $\alpha > 0$ und wird meist mit r bezeichnet). Die zweite Gleichung beschreibt etwa die Bewegung eines ungedämpften Pendels.

Was sollen diese Gleichungen bedeuten? Genauer müsste man schreiben:

$$y'(t) = \alpha y(t) \quad (t \in \mathbb{R}). \quad (1-1)$$

Man sucht hierbei eine Funktion $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, welche die Gleichung (1-1) an jeder Stelle erfüllt. Derartige Gleichungen nennt man eine (gewöhnliche) Differentialgleichung (Dgl.). Natürlich gibt es hiervon mehrere Varianten:

- Die Funktion y ist nur auf einem Teilintervall $I \subset \mathbb{R}$ definiert.
- Die Funktion y hat Werte in \mathbb{R}^n . In diesem Fall stehen links und rechts von (1-1) Vektoren der Länge n .
- Die Funktion y hat einen komplexen Wertebereich, d.h. $y : I \rightarrow \mathbb{C}^n$. Diesen Fall werden wir im folgenden nur selten explizit aufschreiben, aber immer im Hinterkopf behalten.

Damit eine Funktion eine Lösung von (1-1) sein kann, muss man zumindest fordern, dass $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ differenzierbar ist. Häufig will man sogar $y \in C^1(I; \mathbb{R}^n)$.

Im Zusammenhang mit gewöhnlichen Differentialgleichungen stellen sich in natürlicher Weise folgende Fragen (und noch viel mehr):

- Gibt es eine Lösung der Differentialgleichung, d.h. eine Funktion y , welche (1-1) erfüllt?
- Kann man die Lösung explizit angeben?
- Existiert die Lösung vielleicht nur für einen Teilbereich des Intervalls I (also lokal), oder gibt es eine globale Lösung?
- Wieviele Lösungen gibt es?
- Kann man noch mehr über die Lösung sagen, ohne sie gleich auszurechnen? Ist die Lösung z.B. sogar zweimal differenzierbar oder beschränkt? Kann man die Lösung abschätzen?

- Wie hängt die Lösung von den Daten ab? Ersetzt man z.B. in (1-1) den Parameter α durch ein $\tilde{\alpha}$ mit $|\alpha - \tilde{\alpha}|$ klein, was weiß man dann über die neue Lösung?

In unseren Beispielen kann man mehr sagen:

a) Eine Lösung von (1-1) ist die Funktion $y(t) = e^{\alpha t}$. Eine weitere Lösung ist z.B. $y(t) = 2e^{\alpha t}$. Falls man aber noch eine *Anfangsbedingung*

$$y(0) = 1$$

an die Lösung stellt, so ist $y(t) = e^{\alpha t}$ die einzige Lösung. Man spricht hier von einem *Anfangswertproblem* (AWP).

b) Die Dgl. $y'' + y = 0$ hat z.B. die Lösungen $y(t) = \sin t$ und $y(t) = \cos t$. Jede Lösung dieser Dgl. hat die Form

$$y(t) = c_1 \sin t + c_2 \cos t$$

mit reellen Konstanten c_1, c_2 . Die Menge der Lösungen ist also ein zweidimensionaler Untervektorraum von $C(I; \mathbb{R})$. Durch die Anfangsbedingungen

$$\begin{aligned} y(0) &= 1, \\ y'(0) &= 0 \end{aligned}$$

wird die Lösung eindeutig festgelegt, nämlich $y(t) = \cos t$.

c) Das AWP

$$y''(t) + \cos t \cdot y(t) = 0, \quad y(0) = 1, \quad y'(0) = 0$$

hat eine eindeutige Lösung, die man aber nicht explizit hinschreiben kann. Man kann diese Gleichung recht einfach numerisch lösen; es handelt sich übrigens um die sogenannte Hillsche Differentialgleichung. Dass man die Lösung nicht einfach analytisch ausrechnen und elementar hinschreiben kann, ist bei Dgl. der Normalfall! Man sollte sich also nicht durch die Lösungsmethoden täuschen lassen, die im folgenden in der Vorlesung noch kommen.

d) Das AWP

$$y' = \sqrt{|y|}, \quad y(0) = 0$$

im Intervall $[0, \infty)$ hat unendlich viele linear unabhängige Lösungen.

In diesem ersten Abschnitt geht es darum zu sehen, unter welchen Bedingungen eine Dgl. eine Lösung besitzt und wann diese eindeutig ist.

1.2 Definition. a) Eine (gewöhnliche) Differentialgleichung (Dgl.) ist eine Gleichung der Form

$$f(t, y(t), y'(t), \dots, y^{(k)}(t)) = 0 \quad (t \in I). \quad (1-2)$$

Dabei ist $y: I \rightarrow \mathbb{R}^n$, $t \mapsto y(t)$ eine unbekannte Funktion, wobei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall ist, und $f: D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Funktion mit $D \subset I \times \mathbb{R}^{(k+1)n}$. Häufig schreibt man (1-2) in der verkürzten Form

$$f(t, y, \dots, y^{(k)}) = 0.$$

Falls f von der höchsten Ableitung $y^{(k)}$ wirklich abhängt, ist (1-2) eine Dgl. k -ter Ordnung.

Falls $m > 1$, spricht man auch von einem System gewöhnlicher Differentialgleichungen.

Falls sich die Funktion f in der Form $f(t, y, \dots, y^{(k)}) = y^{(k)} - \tilde{f}(t, y, \dots, y^{(k-1)})$ schreiben lässt (d.h. man kann die Gleichung nach der höchsten Ableitung auflösen), so spricht man von einer expliziten Dgl. k -ter Ordnung.

Falls f nicht explizit von t abhängt, d.h. es gilt $f(t, y, \dots, y^{(k)}) = \tilde{f}(y, \dots, y^{(k)})$, so spricht man von einer autonomen Dgl.

Falls f linear in $y, \dots, y^{(k)}$ ist, so heißt (1-2) eine lineare Dgl.

b) Ein Anfangswertproblem (AWP) ist eine Dgl. (1-2), welche zusätzlich mit Anfangsbedingungen der Form $y(t_0) = y_0$, $y'(t_0) = y_1, \dots, y^{(k-1)}(t_0) = y_{k-1}$ versehen ist. Dabei ist $t_0 \in I$ und $y_0, \dots, y_{k-1} \in \mathbb{R}^n$.

c) Eine Lösung der Dgl. (1-2) ist eine Funktion $y: I \rightarrow \mathbb{R}^n$, für welche gilt:

- y ist k -mal differenzierbar in I ,
- $\forall t \in I: (t, y(t), \dots, y^{(k)}(t)) \in D$,
- $\forall t \in I: f(t, y(t), \dots, y^{(k)}(t)) = 0$.

1.3 Beispiele. $y'' + y = 0$: linear, autonom, explizit, 2. Ordnung.

$y'' + \cos(t) \cdot y = 0$: linear, nicht autonom, explizit, 2. Ordnung.

$y'' + \sin(y) = 0$: nichtlinear, autonom, explizit, 2. Ordnung.

$(y')^2 + y^2 = 1$ in $[-1, 1]$: nichtlinear, autonom, nicht explizit (implizit), 1. Ordnung.

Bei impliziten Gleichungen beachte man den Satz über implizite Funktionen, der eventuell doch eine (lokale) Auflösbarkeit ergeben kann. Wir werden im folgenden fast ausschließlich explizite Dgl. betrachten.

1.4 Bemerkung. a) (Rückführung auf Dgl. 1. Ordnung) Betrachte die (explizite) Dgl. k -ter Ordnung

$$y^{(k)} = F(t, y, \dots, y^{(k-1)}), \quad y: I \rightarrow \mathbb{R}^n. \quad (1-3)$$

Setze für $t \in I$

$$\begin{aligned} x_1(t) &:= y(t), \\ x_2(t) &:= y'(t), \\ &\vdots \\ x_k(t) &:= y^{(k-1)}(t). \end{aligned}$$

Dann ist y genau dann eine Lösung von (1-3), falls die Funktion

$$x := \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix} : I \rightarrow \mathbb{R}^{k \cdot n}$$

eine Lösung ist von

$$x'(t) = \begin{pmatrix} x_2(t) \\ \vdots \\ x_k(t) \\ F(t, x_1(t), \dots, x_k(t)) \end{pmatrix} =: f(t, x(t)).$$

b) (Richtungsfelder) Betrachte das skalare AWP $y'(t) = f(t, y(t))$, $y(t_0) = y_0$. Zu $t_1 \in I$ gibt dann $f(t_1, y(t_1))$ die Steigung von y an der Stelle t_1 an. Auch ohne die Lösung y zu kennen, kann man daher das Richtungsfeld zeichnen. Die Abbildungen 1–3 zeigen die Richtungsfelder verschiedener Dgl.

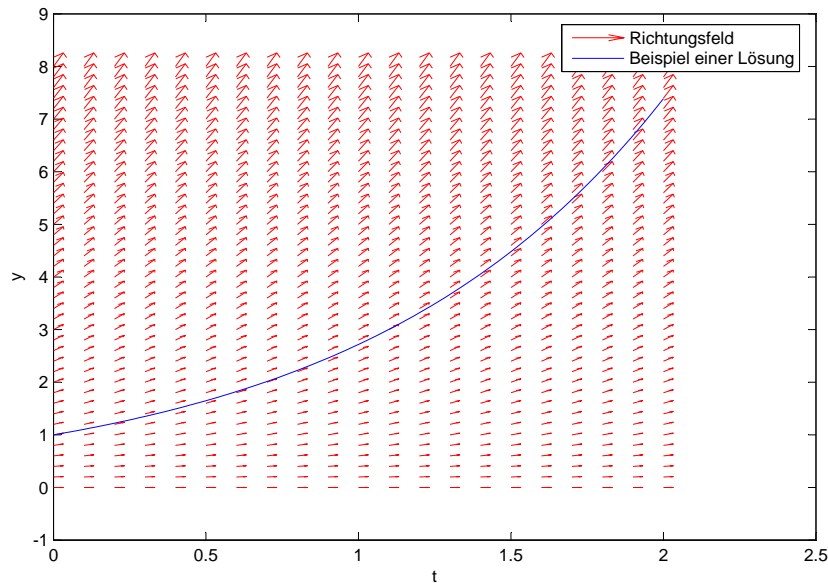
Der folgende Satz ist schon einer der Hauptsätze für die Existenz- und Eindeutigkeit der Lösung. Wir betrachten nur explizite Dgl., und nach Bemerkung 1.4 a) können wir o.E. von einem System 1. Ordnung ausgehen. Der Beweis enthält zwei wichtige Elemente: Die Transformation in eine Integralgleichung und den Banachschen Fixpunktsatz.

1.5 Satz (von Picard-Lindelöf, globale Version). Sei $I = [a, b] \subset \mathbb{R}$ ein kompaktes Intervall, $t_0 \in I$ und $y_0 \in \mathbb{R}^n$. Sei ferner $f : I \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige Funktion, die einer globalen Lipschitz-Bedingung genügt:

$$\exists L \geq 0 \forall t \in I \forall y_1, y_2 \in \mathbb{R}^n : |f(t, y_1) - f(t, y_2)| \leq L|y_1 - y_2|. \quad (1-4)$$

Dann existiert genau eine Lösung $y \in C^1(I; \mathbb{R}^n)$ des AWP

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0.$$

Abbildung 1: Das Richtungsfeld der Dgl. $y'(t) = y(t)$

Beweis. (i) Transformation in eine Integralgleichung: Falls $y \in C^1(I; \mathbb{R}^n)$ eine Lösung ist, so folgt nach dem Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung:

$$y(t) = y_0 + \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds =: (Ty)(t). \quad (1-5)$$

Ist andererseits eine Funktion $y \in C(I; \mathbb{R}^n)$ eine Lösung von $Ty = y$, so folgt $y \in C^1(I; \mathbb{R}^n)$ und $y'(t) = f(t, y(t))$, $y(t_0) = y_0$, d.h. y ist eine Lösung.

(ii) Anwendung des Banachschen Fixpunktsatzes: Wir betrachten den Operator $T: C(I; \mathbb{R}^n) \rightarrow C(I; \mathbb{R}^n)$, $(Ty)(t) := y_0 + \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds$. Dabei versehen wir $C(I; \mathbb{R}^n)$ mit einer neuen Metrik:

$$d(g, h) := \sup_{t \in I} |e^{-(L+1)t} \cdot (g(t) - h(t))| \quad (g, h \in C(I; \mathbb{R}^n)).$$

Wegen

$$e^{-(L+1)b} \leq e^{-(L+1)t} \leq e^{-(L+1)a} \quad (t \in [a, b])$$

ist diese Metrik äquivalent zur üblichen Metrik (aus der Supremumsnorm), und $(C(I; \mathbb{R}^n), d)$ ist ein vollständiger metrischer Raum. Wir rechnen nach, dass T eine Kontraktion in diesem metrischen Raum ist.

Zu $x, y \in C(I; \mathbb{R}^n)$ ist

$$d(Tx, Ty) = \sup_{t \in I} e^{-(L+1)t} \left| \int_{t_0}^t f(s, x(s)) - f(s, y(s)) ds \right|.$$

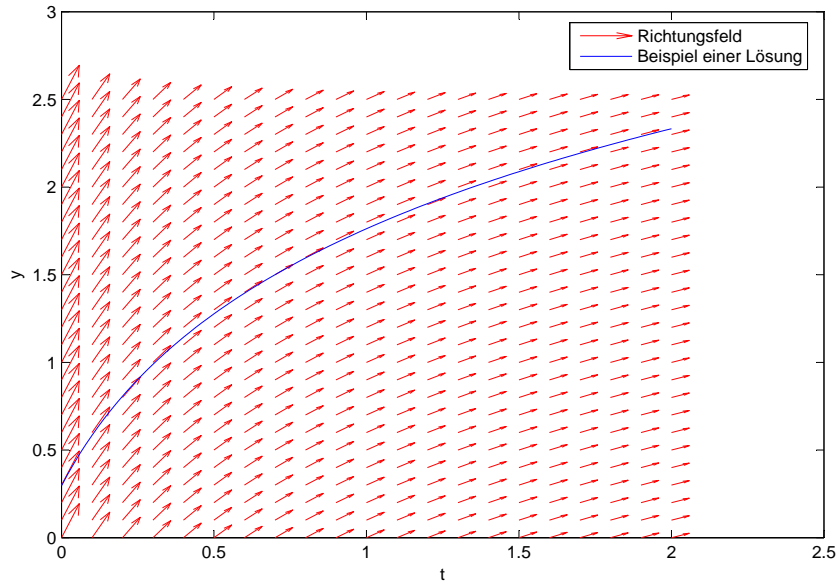


Abbildung 2: Das Richtungsfeld der Dgl. $y'(t) = (0.3 + t)^{-1}$

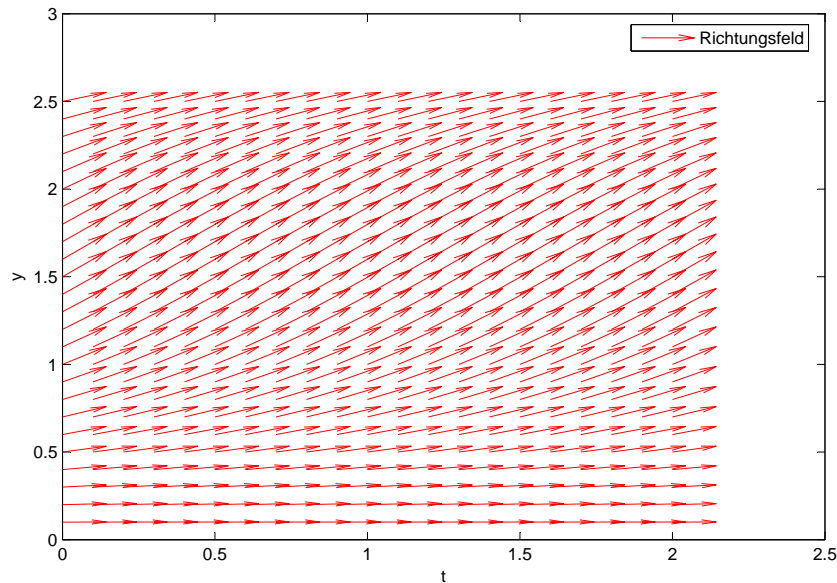
Für $t \geq t_0$ ist

$$\begin{aligned}
 e^{-(L+1)t} \left| \int_{t_0}^t f(s, x(s)) - f(s, y(s)) ds \right| &\leq e^{-(L+1)t} \int_{t_0}^t L|x(s) - y(s)| ds \\
 &= L e^{-(L+1)t} \int_{t_0}^t \underbrace{e^{(L+1)s} |x(s) - y(s)|}_{\leq d(x,y)} ds \\
 &\leq L \cdot d(x, y) \cdot e^{-(L+1)t} \int_{t_0}^t e^{(L+1)s} ds \\
 &= L \cdot d(x, y) \cdot e^{-(L+1)t} \left(\frac{e^{(L+1)s}}{L+1} \right) \Big|_{s=t_0}^t \\
 &= L \cdot d(x, y) \cdot e^{-(L+1)t} \cdot \frac{e^{(L+1)t} - e^{(L+1)t_0}}{L+1} \\
 &\leq \frac{L}{L+1} d(x, y).
 \end{aligned}$$

Genauso sieht man dies für $t \leq t_0$. Damit folgt

$$d(Tx, Ty) \leq \frac{L}{L+1} d(x, y).$$

Wegen $\frac{L}{L+1} < 1$ ist die Abbildung $T: C(I; \mathbb{R}^n) \rightarrow C(I; \mathbb{R}^n)$ eine Kontraktion. Damit existiert genau ein Element $y \in C(I; \mathbb{R}^n)$ mit $Ty = y$ (Gleichheit in $C(I; \mathbb{R}^n)$, also insbesondere an jeder Stelle t). Dieses y ist also die eindeutige Lösung des AWP. \square

Abbildung 3: Das Richtungsfeld der Dgl. $y'(t) = \sin^2(y(t))$

1.6 Bemerkung. a) Wendet man den Satz von Picard-Lindelöf auf explizite Dgl. k -ter Ordnung

$$y^{(k)} = F(t, y, \dots, y^{(k-1)}), \quad y: I \rightarrow \mathbb{R}^n$$

an, so erhält man die eindeutige Lösbarkeit für diese Dgl. mit den Anfangsbedingungen

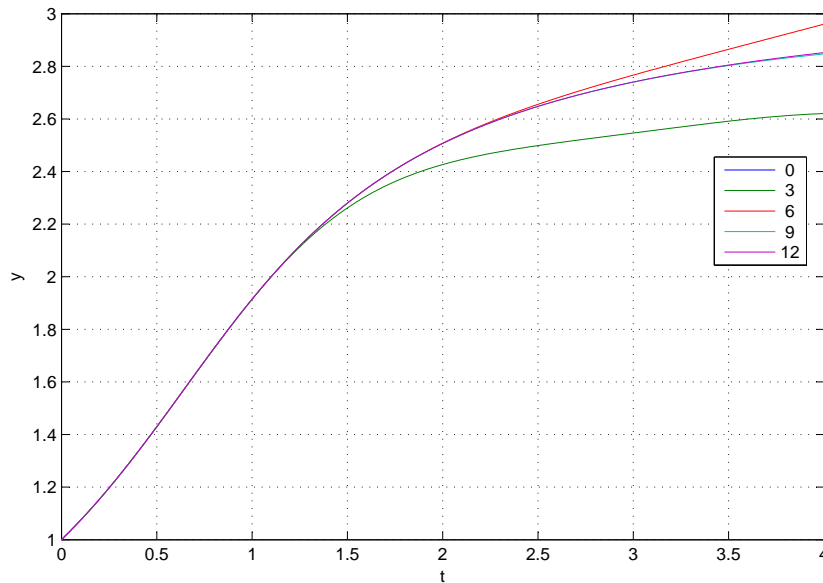
$$y(t_0) = y^0, \quad y'(t_0) = y^1, \dots, y^{(k-1)}(t_0) = y^{k-1}$$

mit $y^j \in \mathbb{R}^n$ für $j = 0, \dots, k-1$.

b) Mit dem wörtlichen gleichen Beweis gilt der Satz von Picard-Lindelöf auch für komplexwertige Funktionen, indem man \mathbb{R}^n durch \mathbb{C}^n ersetzt.

1.7 Bemerkung. Wie wir aus dem Banachschen Fixpunktsatz wissen, konvergiert die Iteration $x_n := Tx_{n-1}$ für jeden Startwert $x_0 \in C(I; \mathbb{R}^n)$ gegen den Fixpunkt y , also die Lösung der Differentialgleichung. Man hat also ein konstruktives Verfahren. Numerisch ist es allerdings weniger geeignet, dafür gibt es wesentlich bessere Verfahren. Wir wissen auch die a priori-Fehlerabschätzung $d(y, x_n) \leq \frac{c^n}{1-c} d(x_1, x_0)$ mit der Konstanten $c := \frac{L}{L+1}$. Die Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Picard-Iteration für die Dgl. $y' = \sin^2 y$ mit Startwert 0. Man sieht, dass die Konvergenz recht langsam ist. In Abbildung 5 wird die Konvergenz der Lösung an der Stelle $t = 4$ dargestellt.

Das folgende Lemma ist wichtig für eine Abschätzung der Lösung, wird aber auch später noch im Beweis der lokalen Version von Satz 1.5 verwendet.

Abbildung 4: Die Picard-Iteration für die Dgl. $y' = \sin^2 y$

1.8 Lemma (von Gronwall). Sei $a > 0$ und seien $y, f \in C([0, a]; \mathbb{R})$ mit $f \geq 0$. Für eine Konstante $b \in \mathbb{R}$ gelte

$$y(t) \leq b + \int_0^t y(s)f(s)ds \quad (t \in [0, a]).$$

Dann gilt

$$y(t) \leq b \exp\left(\int_0^t f(s)ds\right) \quad (t \in [0, a]).$$

Beweis. Zu $\varepsilon > 0$ definiere $z(t) := (b + \varepsilon) \exp(\int_0^t f(s)ds)$. Dann gilt $z'(t) = z(t)f(t)$ und damit

$$z(t) = z(0) + \int_0^t z(s)f(s)ds = (b + \varepsilon) + \int_0^t z(s)f(s)ds.$$

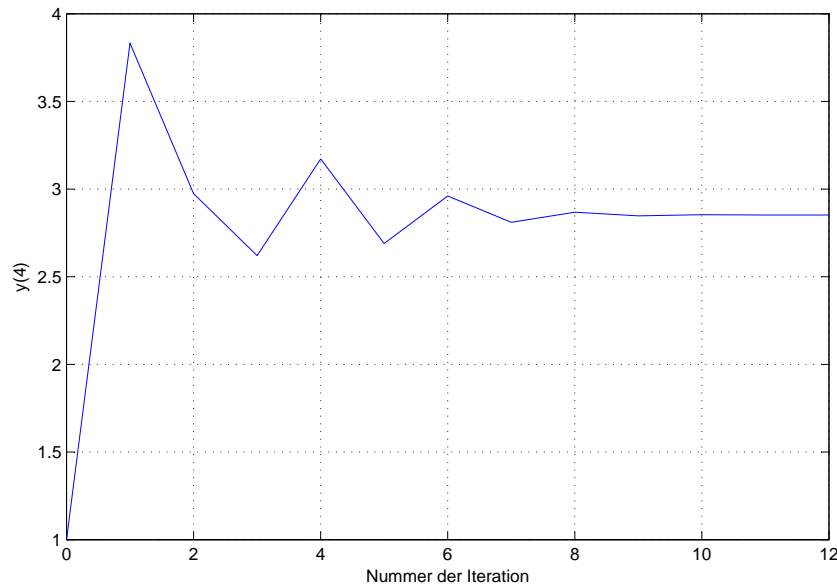
Wir zeigen, dass

$$y(t) < z(t) \quad (t \in [0, a]). \quad (1-6)$$

Für $t = 0$ ist (1-6) klar. Falls (1-6) nicht für alle $t \in [0, a]$ gilt, so existiert ein minimales t_0 mit $y(t_0) = z(t_0)$ (beide Seiten sind stetig). Es folgt

$$y(t_0) \leq b + \int_0^{t_0} y(s)f(s)ds < b + \varepsilon + \int_0^{t_0} z(s)f(s)ds = z(t_0),$$

Widerspruch. Also gilt (1-6), und da $\varepsilon > 0$ beliebig war, folgt die Behauptung. \square

Abbildung 5: Der Wert $y(4)$ für obige Picard-Iteration

Die globale Lipschitz-Bedingung von Satz 1.5 ist zu stark, z.B. erfüllt die Funktion $f(t, x) := t^2 + x^2$ keine globale Lipschitz-Bedingung. Dazu brauchen wir eine lokale Variante.

1.9 Definition. Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $D \subset I \times \mathbb{R}^n$ und $f: D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Funktion. Dann erfüllt f eine lokale Lipschitz-Bedingung in D , falls gilt: Für alle $(t_0, x_0) \in D$ existiert eine Umgebung $U(t_0, x_0) \subset \mathbb{R}^{n+1}$ und eine (lokale) Lipschitz-Konstante $L(t_0, x_0) \geq 0$ mit

$$\forall (t, x_1), (t, x_2) \in U(t_0, x_0) \cap D : |f(t, x_1) - f(t, x_2)| \leq L(t_0, x_0) \cdot |x_1 - x_2|.$$

1.10 Bemerkung. Sei $D \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ offen und $f: D \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig partiell differenzierbar. Dann ist f in D lokal Lipschitz-stetig. Denn in einer kompakten Umgebung eines Punktes $(t_0, x_0) \in D$ sind alle Ableitungen von f als stetige Funktionen beschränkt. Damit folgt die Lipschitz-Stetigkeit aus dem Mittelwertsatz.

Die lokale Lipschitz-Stetigkeit ist bereits ausreichend, um die Eindeutigkeit der Lösung zu zeigen.

1.11 Satz. Sei $D \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ und $f: D \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine lokal Lipschitz-stetige Funktion. Seien $y_1, y_2: I \rightarrow \mathbb{R}^n$ zwei Lösungen der Dgl. $y' = f(t, y)$ über einem Intervall $I \subset \mathbb{R}$. Falls $y_1(t_0) = y_2(t_0)$ für ein $t_0 \in I$ gilt, so folgt $y_1(t) = y_2(t)$ für alle $t \in I$.

Beweis. (i) Wir zeigen: Falls $y_1(a) = y_2(a)$ für ein $a \in I$ gilt, so existiert ein $\varepsilon > 0$

mit $y_1 = y_2$ in $I \cap [a, a + \varepsilon]$. Sei dazu $L = L(a, y_1(a))$ die lokale Lipschitz-Konstante von f . Dann gilt für $t \in [a, a + \varepsilon]$ mit $\varepsilon > 0$ hinreichend klein:

$$\begin{aligned} |y_1(t) - y_2(t)| &= \left| \int_a^t (f(s, y_1(s)) - f(s, y_2(s))) ds \right| \\ &\leq \int_a^t |f(s, y_1(s)) - f(s, y_2(s))| ds \\ &\leq L \int_a^t |y_1(s) - y_2(s)| ds. \end{aligned}$$

Wende nun das Lemma von Gronwall an (mit $b = 0$, $y(s) = |y_1(s) - y_2(s)|$ und $f(s) = L$) und erhalte $y_1 = y_2$ in $[a, a + \varepsilon]$.

(ii) Wir zeigen jetzt, dass $y_1 = y_2$ in $[t_0, \infty) \cap I$ gilt. Sei dazu $\tau := \sup\{t \in I : y_1 = y_2 \text{ in } [t_0, t]\}$. Falls $\tau = \infty$ oder falls τ das rechte Intervallende von I ist, sind wir fertig. Ansonsten existiert ein $\delta > 0$, so dass $[\tau, \tau + \delta] \subset I$. Da y_1, y_2 stetig sind, gilt $y_1(\tau) = y_2(\tau)$. Nach (i) existiert ein $\varepsilon > 0$ mit $y_1 = y_2$ in $[\tau, \tau + \varepsilon]$, Widerspruch zur Definition von τ . Also gilt $y_1 = y_2$ in $[t_0, \infty) \cap I$.

(iii) Dass $y_1 = y_2$ in $(-\infty, t_0] \cap I$ gilt, folgt entweder analog oder mit dem Trick der Zeitumkehr: Die Funktion $z(t) := y(t_0 - t)$ ist genau dann eine Lösung der Dgl. $z'(t) = -f(t_0 - t, z(t))$ im Intervall $t_0 - I := \{t_0 - t : t \in I\}$, wenn y eine Lösung von $y'(t) = f(t, y(t))$ im Intervall I ist. Nach (ii) sind die entsprechenden Lösungen z_1, z_2 im Intervall $[0, \infty) \cap (t_0 - I)$ identisch. Also sind die ursprünglichen Lösungen y_1, y_2 in $(-\infty, t_0] \cap I$ identisch. \square

1.12 Satz (von Picard-Lindelöf, lokale Version). Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall und $D \subset I \times \mathbb{R}^n$ offen. Sei $f: D \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige Funktion, die einer lokalen Lipschitz-Bedingung genügt. Dann existiert zu jedem $(t_0, y_0) \in D$ eine Umgebung $U(t_0, y_0)$, in welcher das AWP

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0$$

eine eindeutige stetig differenzierbare Lösung besitzt.

Beweis. (i) Existenz der Lösung: Sei $(t_0, y_0) \in D$ und $U(t_0, y_0)$ die Umgebung aus Definition 1.9. Durch eventuelle Verkleinerung von $U(t_0, y_0)$ kann man o.E. annehmen, dass $U(t_0, y_0) = (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon) \times V(y_0)$ mit $\varepsilon > 0$ und einer Umgebung $V(y_0) \subset \mathbb{R}^n$ von y_0 gilt. Wähle nun eine Funktion $\varphi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ (also eine C^∞ -Funktion mit kompaktem Träger) mit $\text{supp } \varphi \subset V(y_0)$, $0 \leq \varphi \leq 1$ und $\varphi = 1$ in einer Umgebung $\tilde{V} \subset V(y_0)$.

Dann ist $F(t, x) := f(t, x) \cdot \varphi(x)$ stetig und erfüllt eine globale Lipschitz-Bedingung in $(t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon) \times \mathbb{R}^n$. Denn als stetig differenzierbare Funktion mit kompaktem Träger ist φ global Lipschitz-stetig mit einer Lipschitz-Konstanten L_φ . Daher ist

$$|F(t, x_1) - F(t, x_2)| \leq |f(t, x_1) - f(t, x_2)| \cdot |\varphi(x_1)|$$

$$\begin{aligned}
& + |f(t, x_2)| \cdot |\varphi(x_1) - \varphi(x_2)| \\
& \leq L(t_0, x_0) \cdot |x_1 - x_2| + \sup_{(t,x) \in U(t_0, y_0)} |f(x)| \cdot L_\varphi \cdot |x_1 - x_2| \\
& \leq \tilde{L} |x_1 - x_2| \quad (t \in (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon), x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n).
\end{aligned}$$

Nach Satz 1.5 existiert also genau ein $y \in C^1((t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon); \mathbb{R}^n)$ mit $y'(t) = F(t, y(t))$ und $y(t_0) = y_0$.

Da $y(t_0) = y_0$ und y stetig ist, gilt $y(t) \in \tilde{V} \subset V(y_0)$ für $|t - t_0|$ hinreichend klein. Für diese t ist aber $\varphi(y(t)) = 1$ und damit ist y eine Lösung von $y'(t) = f(t, y(t))$ in einer Umgebung von t_0 .

(ii) Die Eindeutigkeit der Lösung folgt sogar global aus Satz 1.11. \square

1.13 Beispiele. a) $y'(t) = t + y(t) =: f(t, y(t))$ ist wegen

$$|f(t, x_1) - f(t, x_2)| = |x_1 - x_2|$$

global Lipschitz-stetig.

b) $y'(t) = t^2 + y(t)^2 =: f(t, y(t))$ ist nicht global in $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$, aber lokal Lipschitz-stetig, denn

$$|f(t, x_1) - f(t, x_2)| = |x_1^2 - x_2^2| \leq |x_1 + x_2| \cdot |x_1 - x_2|,$$

also gilt etwa in $V(x) := (x - 1, x + 1)$ die Lipschitz-Konstante $L := 2 \cdot \max\{|x - 1|, |x + 1|\}$. Die lokale Lipschitz-Stetigkeit folgt natürlich auch aus Bemerkung 1.10.

c) Betrachte $y'(t) = (y(t))^{2/3}$, d.h. $f(t, x) := x^{2/3}$ in $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Die Funktion ist nicht lokal Lipschitz-stetig. Tatsächlich gilt hier nicht die Eindeutigkeit der Lösung: Eine Lösung ist $y_0 = 0$. Für $a \in \mathbb{R}$ setze $\varphi_a(t) := \frac{1}{27}(t - a)^3$. Dann ist $\varphi_a(t)$ eine weitere Lösung mit $\varphi_a(a) = y_0(a) = 0$. Beachte, dass $\frac{\partial}{\partial x} f(t, x) = \frac{2}{3}x^{-1/3}$, d.h. die Funktion f ist in $\mathbb{R} \times (\mathbb{R} \setminus \{0\})$ lokal Lipschitz-stetig.

1.14 Satz (Maximales Existenzintervall). Sei $D \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ offen und zusammenhängend und $f: D \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine stetige Funktion, die einer lokalen Lipschitz-Bedingung genügt. Sei $(t_0, y_0) \in D$. Betrachte das AWP

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0. \quad (1-7)$$

Dann existiert ein eindeutiges t_0 enthaltendes offenes Intervall I und eine stetig differenzierbare Funktion $y: I \rightarrow \mathbb{R}^n$, welche (1-7) löst, so dass für jedes t_0 enthaltende offene Intervall \tilde{I} und jede stetig differenzierbare Lösung \tilde{y} von (1-7) in \tilde{I} gilt: $\tilde{I} \subset I$ und $y|_{\tilde{I}} = \tilde{y}$. Das Intervall I heißt maximales Existenzintervall des AWP (1-7).

Beweis. Sei \mathcal{M} die Menge aller offenen Intervalle $J \subset \mathbb{R}$ mit $t_0 \in J$, für welche eine Lösung y des AWP (1-7) in J existiert. Nach dem Satz von Picard-Lindelöf (Satz 1.12) ist \mathcal{M} nicht leer.

Seien $J_1, J_2 \in \mathcal{M}$ und y_1, y_2 zugehörige Lösungen, so gilt in $J_1 \cap J_2$ nach Satz 1.11 die Gleichheit $y_1 = y_2$. Setze nun $I := \bigcup_{J \in \mathcal{M}} J$. Dann ist I als Vereinigung offener Mengen offen und enthält t_0 . Außerdem ist I ein Intervall, da für jedes $t \in I$ ein $J \in \mathcal{M}$ existiert mit $t \in J$ und damit $[t_0, t] \subset J \subset I$ gilt. Definiere auf I die Lösung y durch $y(t) := \tilde{y}(t)$ für ein $J \in \mathcal{M}$ mit $t \in J$ und zugehöriger Lösung \tilde{y} . Aufgrund der oben gezeigten Eindeutigkeit ist y wohldefiniert und eindeutig. \square

Der nächste Satz gibt eine Abschätzung der Lebensdauer und der Lösung.

1.15 Satz. *In der Situation von Satz 1.12 sei $n = 1$. Für den Quader $Q := [t_0, t_0 + h] \times [y_0 - c, y_0 + c]$ gelte $Q \subset U(t_0, y_0)$. Dann ist die lokale Lösung y aus Satz 1.12 mindestens existent bis $t = t_0 + \min\{h, \frac{c}{M}\} =: t_0 + a$ mit $M := \max_{(t,x) \in Q} |f(t, x)|$. Es gilt $|y(t) - y_0| \leq c$ für alle $t \in [t_0, t_0 + a]$.*

Beweis. Definiere die Funktion F durch

$$F(t, x) := \begin{cases} f(t, y_0 + c), & x > y_0 + c, \\ f(t, x), & x \in [y_0 - c, y_0 + c], \\ f(t, y_0 - c), & x < y_0 - c \end{cases} \quad (t \in [t_0, t_0 + h], x \in \mathbb{R}).$$

Dann ist F global Lipschitz-stetig. Nach Satz 1.5 besitzt die Dgl. $y' = F(t, y)$, $y(t_0) = y_0$ eine eindeutige Lösung z . Es gilt für $t - t_0 \leq a$:

$$|z(t) - y_0| = \left| \int_{t_0}^t F(s, z(s)) ds \right| \leq M \cdot a \leq c,$$

wobei die letzte Ungleichung nach Definition von a gilt. Somit bleibt z im Quader Q . Da dort $F(t, x) = f(t, x)$, folgt $y(t) = z(t)$ für $t \in [t_0, t_0 + a]$, und die lokale Lösung y existiert mindestens bis $t = t_0 + a$. \square

Die folgenden beiden Aussagen zeigen, dass die Lösung eines AWP's stetig von den Daten f und x_0 abhängt. Die entscheidende Bedingung ist dabei wieder die Lipschitz-Stetigkeit. In Abbildung 6 wird das Beispiel $y' = \sqrt{|y|}$ dargestellt, bei welchem die Lipschitz-Stetigkeit verletzt ist. Es wird die numerisch berechnete Lösung (mit einem Runge-Kutta-Verfahren) gezeigt zu den Anfangswerten $y(0) = 0$ bzw. $y(0) = 10^{-12}$. Man sieht, wie die Ungenauigkeit im Anfangswert schon für kleine Werte von t explodiert. Eine solche berechnete Lösung ist nicht sinnvoll, da man stets Ungenauigkeiten in den Daten hat (z.B. durch Rundungsfehler).

1.16 Satz. *a) Sei $f \in C([0, h] \times \mathbb{R}^n; \mathbb{R}^n)$ global Lipschitz-stetig mit Lipschitz-Konstante L . Seien $x_0, y_0 \in \mathbb{R}^n$, und seien x bzw. y die Lösungen des AWP $x' =$*

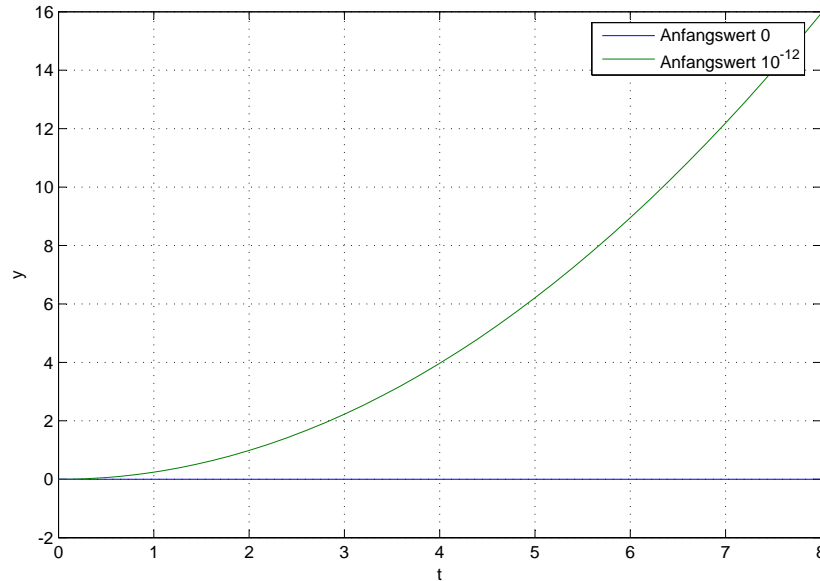


Abbildung 6: Lösungen der Dgl. $y' = \sqrt{|y|}$ zu verschiedenen Anfangswerten

$f(t, x)$, $x(0) = x_0$ bzw. $y' = f(t, y)$, $y(0) = y_0$. Dann gilt mit $c := \frac{L}{L+1}$ die Abschätzung

$$\sup_{t \in [0, h]} |e^{-(L+1)t}(x(t) - y(t))| \leq \frac{|x_0 - y_0|}{1 - c}.$$

b) Seien $f, g \in C([0, h] \times \mathbb{R}^n; \mathbb{R}^n)$ mit $\|f - g\|_\infty < \infty$. Die Funktion f sei global Lipschitz-stetig mit Lipschitz-Konstante L . Seien $x_0 \in \mathbb{R}^n$ und x bzw. y die Lösungen des AWP $x' = f(t, x)$, $x(0) = x_0$ bzw. $y' = g(t, y)$, $y(0) = x_0$. Dann gilt mit $c := \frac{L}{L+1}$ die Abschätzung

$$\sup_{t \in [0, h]} |e^{-(L+1)t}(x(t) - y(t))| \leq \|f - g\|_\infty \frac{h}{1 - c}.$$

Beweis. a) Es bezeichne $d(x, y) := \sup_{t \in [0, h]} |e^{-(L+1)t}(x(t) - y(t))|$ die schon im Beweis von Satz 1.5 verwendete Metrik. Dann folgt wie im Beweis von 1.5

$$\begin{aligned} e^{-(L+1)t}|x(t) - y(t)| &= e^{-(L+1)t} \left| x_0 - y_0 + \int_0^t (f(s, x(s)) - f(s, y(s))) ds \right| \\ &\leq e^{-(L+1)t} |x_0 - y_0| + L e^{-(L+1)t} \int_0^t |x(s) - y(s)| ds \\ &\leq |x_0 - y_0| + c \cdot d(x, y), \end{aligned}$$

also $d(x, y) \leq \frac{1}{1-c} |x_0 - y_0|$.

b) Wir schreiben

$$x(t) - y(t) = \int_0^t (f(s, x(s)) - f(s, y(s))) ds + \int_0^t (f(s, y(s)) - g(s, y(s))) ds$$

und erhalten

$$d(x, y) \leq c \cdot d(x, y) + h \cdot \|f - g\|_\infty,$$

$$\text{d.h. } d(x, y) \leq \frac{h}{1-c} \cdot \|f - g\|_\infty. \quad \square$$

2. Spezielle Lösungsmethoden

2.1 Worum geht's? Jetzt wissen wir zwar schon, wann eine Dgl. zumindest lokal eine eindeutige Lösung besitzt. Es ist aber nochmal was anderes, diese wirklich zu berechnen. Es gibt für bestimmte Typen von Gleichungen bestimmte Methoden, die mehr oder weniger funktionieren, um die Lösung explizit zu bestimmen. Im einzelnen sind dies:

- separable Gleichungen,
- homogene Gleichungen,
- Potenzreihenansatz,
- exakte Differentialgleichungen.

Ein weiterer Typ von Dgl. sind die linearen Dgl., welche im nachfolgenden Abschnitt behandelt werden. Hier werden wir Ansätze zur Lösung oben genannter Dgl. behandeln und auch einige speziellere Gleichungen lösen. Man sollte sich aber nicht verleiten lassen zu glauben, dass alle oder zumindest fast alle Dgl. explizit lösbar seien.

a) Separable Gleichungen (Trennung der Variablen)

Wir behandeln im folgenden nur den eindimensionalen Fall $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Eine Dgl. heißt separabel, falls sie von der Form

$$y'(t) = g(t) \cdot h(y(t)) \tag{2-1}$$

ist, d.h. in diesem Fall haben wir $f(t, y(t)) = g(t) \cdot h(y(t))$.

2.2 Satz. Seien $I, J \subset \mathbb{R}$ offene Intervalle und $g \in C(I; \mathbb{R})$, $h \in C(J; \mathbb{R})$ mit $h(x) \neq 0$ für alle $x \in J$. Sei $(t_0, x_0) \in I \times J$. Definiere $G(t) := \int_{t_0}^t g(\tau) d\tau$ und $H(x) := \int_{x_0}^x \frac{dz}{h(z)}$. Es gelte $G(I) \subset H(J)$. Dann existiert genau eine Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ der Dgl. (2-1) mit $y(t_0) = x_0$. Für diese Lösung gilt

$$H(y(t)) = G(t) \quad (t \in I). \quad (2-2)$$

Beweis. (i) Sei $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung. Dann folgt aus (2-1) und der Anfangsbedingung durch Integration bezüglich t :

$$\int_{t_0}^t \frac{y'(\tau)}{h(y(\tau))} d\tau = \int_{t_0}^t g(\tau) d\tau.$$

Substituiert man nun im linken Integral $z = y(\tau)$, so erhält man $H(y(t)) = G(t)$, also (2-2).

(ii) Es gilt $H'(x) = \frac{1}{h(x)} \neq 0$ in J , also ist H streng monoton. Damit existiert eine stetig differenzierbare Umkehrfunktion $H^{-1} : H(J) \rightarrow \mathbb{R}$. Für jede Lösung y gilt nach Teil (i) die Gleichung (2-2) und damit

$$y(t) = H^{-1}(G(t)). \quad (2-3)$$

Somit ist die Lösung eindeutig.

(iii) Wir zeigen noch die Existenz der Lösung. Definiere y durch (2-3). Dann ist y stetig differenzierbar mit $y(t_0) = H^{-1}(G(t_0)) = H^{-1}(0) = x_0$. Weiter folgt aus (2-2) durch Differenzieren

$$H'(y(t)) \cdot y'(t) = \frac{y'(t)}{h(y(t))} = G'(t) = g(t),$$

d.h. $y'(t) = g(t)h(y(t))$. Somit ist y eine Lösung von (2-1). \square

2.3 Beispiel. Betrachte das AWP $y' = y^2$, $y(0) = 1$. Die rechte Seite der Dgl. ist lokal Lipschitz-stetig, also gilt lokale Existenz und Eindeutigkeit. Wir schreiben die Aussage von Satz 2.2 etwas einprägsamer in folgender Form:

$$\frac{dy}{dt} = g(t) \cdot h(y) \quad \implies \quad \int \frac{dy}{h(y)} = \int g(t) dt + \text{const.}$$

In unserem Beispiel haben wir $g(t) = 1$ und $h(x) = x^2$, d.h.

$$G(t) = \int_0^t dt = t,$$

$$H(x) = \int_1^x \frac{dz}{z^2} = 1 - \frac{1}{x}.$$

Somit gilt

$$1 - \frac{1}{y(t)} = t,$$

d.h. $y(t) = \frac{1}{1-t}$.

b) Homogene Differentialgleichungen und Substitution

In vielen Fällen ist eine Substitution nützlich, um eine Dgl. in eine lösbare Form zu transformieren. Hierzu ein Beispiel:

2.4 Beispiel. Betrachte eine Dgl. der Form

$$x'(t) = f(ax(t) + bt + c)$$

mit Konstanten a, b, c . Substituiert man $y(t) := ax(t) + bt + c$, dann erhält man

$$y'(t) = ax'(t) + b = af(y(t)) + b,$$

also eine separable Dgl.

2.5 Beispiel (homogene Dgl.). Ein ähnlicher Trick funktioniert bei homogenen Dgl. Diese haben die Form

$$x'(t) = f\left(\frac{x(t)}{t}\right).$$

Substituiert man $y(t) := \frac{x(t)}{t}$, so folgt

$$y'(t) = \frac{x'(t)t - x(t)}{t^2} = \frac{x'(t)}{t} - \frac{x(t)}{t^2} = \frac{1}{t} (f(y(t)) - y(t)).$$

Dies ist wieder eine separable Dgl.

2.6 Beispiel (Bernoullische Dgl.). Die Bernoullische Dgl. hat die Form

$$x'(t) = a(t) \cdot x(t) + b(t) \cdot (x(t))^\alpha$$

mit einem reellen Parameter α . Für $\alpha = 0$ handelt es sich um eine lineare Dgl., die später behandelt werden, für $\alpha = 1$ um eine separable Dgl. Für $\alpha \neq 0, 1$ substituiert man $y(t) := x(t)^{1-\alpha}$. Dann ist

$$y'(t) = (1 - \alpha)x(t)^{-\alpha}(a(t)x(t) + b(t)x(t)^\alpha) = (1 - \alpha)(a(t)y(t) + b(t)).$$

Dies ist wieder eine lineare Dgl.

2.7 Beispiel (Riccatische Dgl.). Die Riccatische Dgl. ist von der Form

$$x'(t) = k(t)x^2(t) + g(t)x(t) + h(t) \quad (2-4)$$

mit $k, h, g \in C(\mathbb{R}; \mathbb{R})$. Die Anfangsbedingung sei $x(t_0) = x^0$. Im Falle $h = 0$ handelt es sich um die Bernoullische Dgl. mit Exponenten $\alpha = 2$. Am Beispiel der Riccati-Gleichung soll gezeigt werden, wie eine Substitution helfen kann, die Gleichung auf eine andere Dgl. zu transformieren, welche von einfacherer Struktur ist.

(i) Transformation zur Bernoullischen Dgl.: Dies ist nur möglich, falls eine Lösung p mit $p(t_0) =: p^0 \neq x^0$ der Riccati-Gleichung bereits bekannt ist. In diesem Fall setzt man $y := x - p$ und erhält den Anfangswert $y(t_0) = x^0 - p^0$ und

$$\begin{aligned} y' &= x' - p' = kx^2 + gx + h - kp^2 - gp - h \\ &= ky^2 - 2kp^2 + 2kxp + gx - gp \\ &= ky^2 + (2kp + g)y. \end{aligned}$$

Man sieht, dass y wieder eine Riccati-Dgl. erfüllt. Allerdings besitzt die neue Gleichung für y keinen h mehr, und damit handelt es sich um die Bernoullische Gleichung mit $\alpha = 2$.

(ii) Ohne das Wissen einer Lösung p kann man durch eine Substitution die Riccati-Gleichung (2-4) auf eine lineare Dgl. zweiter Ordnung zurückführen. Dazu setzt man

$$u(t) := \exp\left(-\int_{t_0}^t k(s)x(s)ds\right).$$

Damit folgt $u' = -kxu$ und somit

$$\begin{aligned} u'' &= k^2x^2u - k'xu - kx'u \\ &= k^2x^2u - k'xu - k^2x^2u - kngxu - khu \\ &= -k'xu - kngxu - khu \\ &= \frac{k'}{k}u' + gu' - khu, \end{aligned}$$

wobei $ux = -\frac{u'}{k}$ benutzt wurde. Damit ist u eine Lösung des AWP

$$u'' - u'\left(\frac{k'}{k} + g\right) + khu = 0, \quad u(t_0) = 1, \quad u'(t_0) = -k(t_0)x^0.$$

Dies ist wieder eine lineare Dgl.

c) Potenzreihenansatz

Der Potenzreihenansatz ist in vielen Fällen möglich, um eine Darstellung der Lösung einer Dgl. in Form einer konvergenten Potenzreihe zu erhalten. Wir diskutieren diesen Ansatz nur für lineare Dgl. zweiter Ordnung, Verallgemeinerungen sind leicht möglich.

Betrachte die lineare Dgl.

$$y''(t) + a(t)y'(t) + b(t)y(t) = s(t) \quad (2-5)$$

mit den Anfangsbedingungen $y(t_0) = y^0, y'(t_0) = y^1$. Die Koeffizienten a, b und die rechte Seite s seien in einem offenen Intervall $J := (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon)$ in eine Potenzreihe um t_0 entwickelbar, d.h. in Reihen der Form $\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k (t - t_0)^k$, welche mindestens in J konvergieren. In diesem Fall kann man den Ansatz

$$y(t) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k (t - t_0)^k \quad (2-6)$$

in die Differentialgleichung einsetzen und erhält eine Rekursionsformel für die unbekanntenen Koeffizienten $(c_k)_{k \in \mathbb{N}_0}$. Es kann leicht gezeigt werden, dass dieser Ansatz gerechtfertigt ist und dass die Lösung die Form (2-6) besitzt. Man beachte dazu, dass eine Potenzreihe im Inneren ihres Konvergenzkreises unendlich oft differenzierbar ist und die Ableitung mit der Summation vertauscht werden kann (siehe Analysis I).

2.8 Beispiel (Hermiteische Dgl.). Die Hermiteische Dgl. lautet

$$y''(t) - 2ty'(t) + \lambda y(t) = 0 \quad (2-7)$$

mit einem Parameter $\lambda \in \mathbb{R}$. Die Koeffizienten sind Polynome, also insbesondere in eine überall konvergente Potenzreihe um 0 entwickelbar. Mit dem Ansatz (2-6) mit $t_0 = 0$ erhält man

$$\begin{aligned} y'(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot k t^{k-1} = \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) c_{k+1} t^k, \\ y''(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} (k+2)(k+1) c_{k+2} t^k. \end{aligned}$$

Eingesetzt in die Hermiteische Dgl. ergibt sich

$$\sum_{k=0}^{\infty} (k+1)(k+2) c_{k+2} x^k - 2 \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) c_{k+1} x^{k+1} + \lambda \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^k = 0.$$

Nach dem Identitätssatz für Potenzreihen müssen alle Koeffizienten der Potenzreihe auf der linken Seite verschwinden (Koeffizientenvergleich). Also haben wir

$$2c_2 + \lambda c_0 = 0,$$

$$(k+2)(k+1)c_{k+2} - 2kc_k + \lambda c_k = 0 \quad (k \in \mathbb{N}).$$

Die Koeffizienten c_0 und c_1 sind frei wählbar, die anderen sind dann gegeben durch die Rekursion

$$c_{k+2} = \frac{2k - \lambda}{(k+2)(k+1)} c_k \quad (k \in \mathbb{N}_0).$$

Dieses Beispiel zeigt auch noch eine Besonderheit: Falls $\lambda = 2n_0 \in 2\mathbb{N}$, so ist $c_{k+2} = 0$ für alle $k = n_0, n_0 + 2, \dots$. In diesem Falle existiert ein Polynom, welches die Hermitesche Dgl. löst. Z.B. kann man für $\lambda = 4$ die Anfangskoeffizienten $c_0 := 1$ und $c_1 := 0$ wählen und erhält $c_2 = \frac{-4}{2} = -\frac{1}{2}$, $c_4 = c_6 = \dots = 0$ und $c_3 = c_5 = \dots = 0$. Also ist $y(t) = 1 - \frac{1}{2}t^2$ eine Lösung der Hermiteschen Dgl. mit $\lambda = 4$. Auf diese Weise erhält man (bis auf Normierung) die Hermite-Polynome $H_n(t)$, $n \in \mathbb{N}_0$.

d) Exakte Differentialgleichungen

Wir verwenden im folgenden den Begriff Gebiet. Dabei ist eine Menge $G \subset \mathbb{R}^n$ ein Gebiet, falls G offen und zusammenhängend ist.

2.9 Definition. Sei $G \subset \mathbb{R}^2$ ein Gebiet und seien $f_1, f_2 \in C(G; \mathbb{R})$. Dann heißt die Dgl.

$$f_1(t, y(t)) + f_2(t, y(t)) \cdot y'(t) = 0 \quad (2-8)$$

exakt, falls eine Stammfunktion $F \in C^1(G; \mathbb{R})$ existiert mit $\nabla F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix}$.

2.10 Bemerkung. Definiert man die 1-Form

$$\omega(x, h) := f_1(x)h_1 + f_2(x)h_2 = f_1(x)dx_1(h) + f_2(x)dx_2(h),$$

so ist die Dgl. (2-8) genau dann exakt, wenn ω exakt ist. Formal erhält man ω durch die Umformung

$$f_1(t, y)dt + f_2(t, y)dy = 0 \quad (2-9)$$

und die Umbenennung $x_1 := t$, $x_2 := y$. Die Form (2-9) ist eine „symmetrische“ Version der ursprünglichen Dgl. (2-8).

2.11 Satz. a) Sei die Dgl. (2-8) exakt mit Stammfunktion F und $y: J \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion auf einem Intervall $J \subset \mathbb{R}$. Es gelte $(t, y(t)) \in G$ für alle $t \in J$. Dann ist y genau dann eine Lösung von (2-8), wenn es ein $c \in \mathbb{R}$ gibt mit

$$F(t, y(t)) = c \quad (t \in J).$$

b) Sei G sternförmig und $f_1, f_2 \in C^1(G)$. Dann ist die Dgl. (2-8) genau dann exakt, falls $\partial_1 f_2 = \partial_2 f_1$.

Beweis. a) folgt aus

$$\frac{d}{dt}F(t, y(t)) = f_1(t, y(t)) + f_2(t, y(t)) \cdot y'(t).$$

b) folgt aus dem bekannten Kriterium für Exaktheit von 1-Formen (Analysis II). \square

Zur Lösung einer exakten Dgl. muss man nach Satz 2.11 eine Stammfunktion F bestimmen. Wir wiederholen die Vorgehensweise aus der Analysis II: Gegeben sei die exakte Dgl. (2-8) mit der Anfangsbedingung $y(t_0) = y^0$. Um eine Stammfunktion $F: G \rightarrow \mathbb{R}$ zu bestimmen, wählen wir zu $(t, x) \in G$ eine stückweise glatte Kurve $\Gamma = [\gamma]$, $\gamma: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit Anfangspunkt $\gamma(a) = (t_0, y^0)$ und Endpunkt (t, x) . Dann ist $F(t, x)$ durch das (wegunabhängige!) Kurvenintegral

$$F(t, x) = \int_{\Gamma} \omega$$

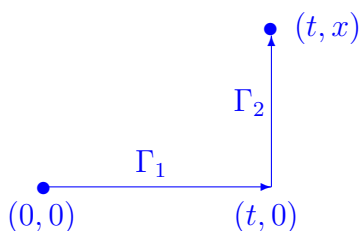
gegeben. Dabei kann die Wegunabhängigkeit ausgenutzt werden, um lokal einen Weg entlang der Koordinatenachsen zu wählen.

2.12 Beispiel. Betrachte die Dgl.

$$(3t^2 + 4ty(t)) + (2t^2 + 3y(t)^2) \cdot y'(t) = 0.$$

Hier ist $f_1(t, x) = 3t^2 + 4tx$, $f_2(t, x) = 2t^2 + 3x^2$, und wegen $\partial_2 f_1 = 4t = \partial_1 f_2$ handelt es sich um eine exakte Dgl. Wir wählen zu $(t_0, y^0) := (0, 0)$ und zu $(t, x) \in \mathbb{R}^2$ die Wegstücke

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= [\gamma_1], & \gamma_1: [0, t] &\rightarrow \mathbb{R}^2, & s &\mapsto (s, 0), \\ \Gamma_2 &= [\gamma_2], & \gamma_2: [0, x] &\rightarrow \mathbb{R}^2, & s &\mapsto (t, s). \end{aligned}$$



Damit ist

$$F(t, x) = \int_0^t (3s^2 + 4s \cdot 0) \cdot 1 ds + \int_0^x (2t^2 + 3s^2) \cdot 1 ds = t^3 + 2t^2x + x^3.$$

Die Lösung der Dgl. erhält man nach Satz 2.11 durch (lokale) Lösung der Gleichung $F(t, y(t)) = \text{const.}$

3. Lineare Differentialgleichungen

3.1 Worum geht's? Lineare Dgl. bilden eine besonders wichtige Klasse von Dgl., in welcher die Menge der Lösungen im wesentlichen eine Vektorraumstruktur besitzt. Das ist eine erste wichtige Verbindung zur Linearen Algebra, die im Falle von linearen Dgl. mit konstanten Koeffizienten besonders deutlich zu Tage tritt. Es kann in diesem Abschnitt nicht schaden, nochmal einen Blick in das Skript der Vorlesung Lineare Algebra zu werfen.

Auf den ersten Blick besitzen lineare Dgl. eine deutlich einfachere Struktur als nicht-lineare Gleichungen. Das gilt z.B. schon in Hinblick auf die eindeutige Lösbarkeit, die hier eine direkte Folgerung aus dem Satz von Picard-Lindelöf ist. Dennoch sei hier nochmal deutlich darauf hingewiesen, dass viele lineare Dgl. nicht elementar lösbar sind.

a) Homogene lineare Dgl.

Lineare Dgl.-Systeme haben die Form

$$y'(t) = A(t)y(t) + b(t), \quad y(t_0) = y^0, \quad (3-1)$$

wobei $A \in C(J; \mathbb{C}^{n \times n})$, $b \in C(J; \mathbb{C}^n)$, $t_0 \in J$ und $y^0 \in \mathbb{C}^n$ für ein (beliebiges) Intervall $J \subset \mathbb{R}$. Eine Lösung ist eine differenzierbare Funktion $y: J \rightarrow \mathbb{C}^n$, welche (3-1) erfüllt. Man beachte, dass dann wegen (3-1) auch $y \in C^1(J; \mathbb{C}^n)$ gilt.

Es ist hier günstiger, gleich in \mathbb{C} zu arbeiten, wie wir später noch sehen werden. In vielen Anwendungsfällen ist man natürlich an reellwertigen Funktionen interessiert. Man beachte, dass auf \mathbb{C}^n und $\mathbb{C}^{n \times n}$ nach Analysis II alle Normen äquivalent sind, insbesondere der Begriff der Stetigkeit nicht von der Wahl der Norm abhängt. Meist werden wir die euklidische Norm $|\cdot|$ oder die $|\cdot|_\infty$ -Norm auf \mathbb{C}^n und die zugehörige Operatornorm auf $\mathbb{C}^{n \times n}$ wählen (meist mit $\|\cdot\|$ bezeichnet).

3.2 Satz. *Unter den obigen Voraussetzungen an A und f existiert zu jedem $t_0 \in J$ und $y^0 \in \mathbb{C}^n$ genau ein $y \in C^1(J; \mathbb{C}^n)$, welches das AWP (3-1) löst.*

Beweis. Falls J ein kompaktes Intervall ist, folgt der Satz direkt aus dem Satz von Picard-Lindelöf (Satz 1.5): Denn für $f(t, x) := A(t)x + b(t)$ gilt

$$|f(t, x_1) - f(t, x_2)| = |A(t)(x_1 - x_2)| \leq \sup_{t \in J} \|A(t)\| \cdot |x_1 - x_2|,$$

d.h. f ist global Lipschitz-stetig.

Falls J ein beliebiges Intervall ist, so kann man J durch kompakte Intervalle (die t_0 enthalten) ausschöpfen. Damit folgt die Existenz und Eindeutigkeit für ganz J . \square

3.3 Korollar. a) In der Situation von Satz 3.2 sei $t_0 \in J$ fest. Dann definiert

$$T: C^1(J; \mathbb{C}^n) \rightarrow C(J; \mathbb{C}^n) \times \mathbb{C}^n, y \mapsto (y' - Ay, y(t_0))$$

einen Vektorraumisomorphismus.

b) Für festes $t_0 \in J$ sei $H: C^1(J; \mathbb{C}^n) \rightarrow C(J; \mathbb{C}^n)$, $y \mapsto y' - Ay$ und $\ker H := \{y \in C^1(J; \mathbb{C}^n) : Hy = 0\}$. Dann ist $\ker H \rightarrow \mathbb{C}^n$, $y \mapsto y(t_0)$ ein Vektorraumisomorphismus. Insbesondere ist $\dim \ker H = n$.

Beweis. Die Linearität der Abbildung ist jeweils klar, die Injektivität und Surjektivität folgt aus dem Existenz- und Eindeutigkeitsatz 3.2. \square

3.4 Satz. Es existieren genau n linear unabhängige Lösungen in $C^1(J; \mathbb{C}^n)$ von $y'(t) = A(t)y(t)$. Ein System $\{z_1, \dots, z_n\}$ von Lösungen ist genau dann eine Basis, falls die Vektoren $\{z_1(t_0), \dots, z_n(t_0)\}$ eine Basis von \mathbb{C}^n sind.

Beweis. Folgt direkt aus Korollar 3.3. \square

3.5 Definition. a) Sei $\{z_1, \dots, z_n\}$ ein System von Lösungen von $y'(t) = A(t)y(t)$. Dann heißt die aus den Spalten gebildete Matrix $Z := (z_1 \dots z_n): J \rightarrow \mathbb{C}^{n \times n}$ die Wronski-Matrix und $w(t) := \det Z(t)$ die Wronski-Determinante.

b) Eine Basis $\{z_1, \dots, z_n\}$ des Lösungsraums von $y'(t) = A(t)y(t)$ heißt ein Fundamentalsystem. Die Wronskimatrix heißt in diesem Fall eine Fundamentalmatrix.

3.6 Bemerkung. a) Aus Satz 3.4 sehen wir: Seien z_1, \dots, z_n Lösungen der Dgl. $y' = Ay$. Dann ist $\{z_1, \dots, z_n\}$ genau dann ein Fundamentalsystem, falls $w(t) = \det Z(t) \neq 0$ für alle $t \in J$ ist. Dies ist äquivalent dazu, dass $w(t_0) \neq 0$ für ein $t_0 \in J$ ist.

b) Eine Wronski-Matrix Z löst die Matrix-Dgl. $Z'(t) = A(t)Z(t)$ (wobei die Ableitung $Z'(t)$ komponentenweise definiert ist). Falls Z eine Fundamentalmatrix ist, so ist eine Funktion $z \in C^1(J; \mathbb{C}^n)$ genau dann eine Lösung von $y' = Ay$, falls ein $c \in \mathbb{C}^n$ existiert mit $z(t) = Z(t)c$ ($t \in J$). Denn z ist genau dann Lösung, falls z eine Linearkombination der Spalten z_1, \dots, z_n von Z ist.

3.7 Satz (Formel von Liouville). Die Wronski-Determinante ist differenzierbar mit $w'(t) = (\operatorname{tr} A(t)) \cdot w(t)$. Damit gilt

$$w(t) = w(t_0) \exp \left(\int_{t_0}^t \operatorname{tr} A(s) ds \right).$$

Beweis. O.E. sei $w \neq 0$, d.h. $\det Z(t) \neq 0$ für alle $t \in J$. Mit der Ähnlichkeitstransformation

$$(b_{ij}(t))_{i,j=1,\dots,n} = B(t) := Z(t)^{-1}A(t)Z(t) \quad (t \in J)$$

erhält man $Z'(t) = A(t)Z(t) = Z(t)B(t)$, d.h. für $j = 1, \dots, n$ gilt

$$z'_j(t) = (Z(t)e_j)' = Z'(t)e_j = Z(t)B(t)e_j = \sum_{k=1}^n b_{kj}(t)z_k(t).$$

Für die Determinante erhalten wir

$$\begin{aligned} w'(t) &= \left(\det(z_1(t), \dots, z_n(t)) \right)' \\ &= \sum_{j=1}^n \det(z_1(t), \dots, \underbrace{z'_j(t)}_{j\text{-te Spalte}}, \dots, z_n(t)) \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_{kj}(t) \det(z_1(t), \dots, \underbrace{z_k(t)}_{j\text{-te Spalte}}, \dots, z_n(t)) \\ &= \sum_{j=1}^n b_{jj}(t) \det Z(t) \\ &= (\operatorname{tr} B(t))w(t) \\ &= (\operatorname{tr} A(t))w(t). \end{aligned}$$

Damit (Trennung der Variablen)

$$w(t) = w(t_0) \exp \left(\int_{t_0}^t \operatorname{tr} A(s) ds \right).$$

□

b) Inhomogene Gleichungen

Wir betrachten nun den inhomogenen Fall

$$y'(t) = A(t)y(t) + b(t) \tag{3-2}$$

mit $A \in C(J; \mathbb{C}^{n \times n})$, $f \in C(J; \mathbb{C}^n)$ wie oben.

3.8 Lemma. Sei $y_p \in C^1(J; \mathbb{C}^n)$ eine spezielle (partikuläre) Lösung von (3-2) und $Z \in C^1(J; \mathbb{C}^{n \times n})$ eine Fundamentalmatrix. Dann ist die allgemeine Lösung gegeben durch $y(t) = y_p(t) + Z(t)c$ mit $c \in \mathbb{C}^n$.

Beweis. Wegen $y' = y_p' + (Zc)' = Ay_p + b + A(Zc) = Ay + b$ ist jedes solche y eine Lösung. Falls andererseits y eine beliebige Lösung von (3-2) ist, so ist $\tilde{y} := y - y_p$ eine Lösung von $\tilde{y}' = Ay + b - Ay_p - b = A\tilde{y}$ und damit $\tilde{y} = Zc$ mit einem $c \in \mathbb{C}^n$ nach Bemerkung 3.6 b). \square

3.9 Satz (Variation der Konstanten). Sei $Z: J \rightarrow \mathbb{C}^{n \times n}$ eine Fundamentalmatrix der homogenen Dgl. $y' = Ay$. Dann erhält man eine Lösung der inhomogenen Dgl. $y' = Ay + b$ durch den Ansatz

$$y_p(t) = Z(t)c(t),$$

wobei $c \in C^1(J; \mathbb{C}^n)$ eine Lösung von $Z(t)c'(t) = b(t)$ ist, d.h.

$$c(t) = c(t_0) + \int_{t_0}^t Z(s)^{-1}b(s)ds.$$

Beweis. Das folgt aus

$$\begin{aligned} (Z(t)c(t))' &= Z'(t)c(t) + Z(t)c'(t) = A(t)Z(t)c(t) + Z(t)c'(t) \\ &= A(t)y_p(t) + Z(t)c'(t). \end{aligned}$$

Man beachte, dass $Z(t)c'(t) = b(t)$ genau dann gilt, falls $c(t) = c(t_0) + \int_{t_0}^t Z(s)^{-1}b(s)ds$. \square

3.10 Beispiel. Gegeben sei das Dgl.-System

$$\begin{aligned} y_1'(t) &= -y_2(t) \\ y_2'(t) &= y_1(t) + t. \end{aligned}$$

In Matrix-Schreibweise:

$$y'(t) = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} y(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix}.$$

Eine Fundamentalmatrix der homogenen Gleichung ist gegeben durch

$$Z(t) = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{pmatrix}.$$

Damit ist

$$Z(t)^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos t & \sin t \\ -\sin t & \cos t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t \sin t \\ t \cos t \end{pmatrix}.$$

Variation der Konstanten liefert also

$$c(t) = \int_0^t \begin{pmatrix} s \sin s \\ s \cos s \end{pmatrix} ds + \text{const.}$$

Partielle Integration ergibt

$$c(t) = \left. \begin{pmatrix} -s \cos s + \sin s \\ s \sin s + \cos s \end{pmatrix} \right|_{s=0}^{s=t},$$

und eine partikuläre Lösung ist gegeben durch

$$\begin{aligned} y_p(t) &= Z(t)c(t) = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -t \cos t + \sin t \\ t \sin t + \cos t - 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -t \cos^2 t + \cos t \sin t - t \sin^2 t - \sin t \cos t + \sin t \\ -t \sin t \cos t + \sin^2 t + t \sin t \cos t + \cos^2 t - \cos t \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -t - \sin t \\ 1 - \cos t \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Die allgemeine Lösung hat die Form $y(t) = Z(t)d + y_p(t)$, wobei $d \in \mathbb{R}^2$ durch die Anfangsbedingung $y(t_0) = y_0$ bestimmt wird.

c) Systeme mit konstanten Koeffizienten

Nun soll es um Dgl. der Form

$$y'(t) = Ay(t) \quad (t \in \mathbb{R}) \tag{3-3}$$

gehen, wobei $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ eine konstante Matrix ist. Man beachte, dass im skalaren Fall $y' = \alpha y$ die Lösung durch $y(t) = c \exp(\alpha t)$ mit $c \in \mathbb{C}$ gegeben ist. Eine Möglichkeit, (3-3) zu lösen, besteht in einer Erweiterung der exp-Funktion für Matrizen.

Sei $|\cdot|$ die euklidische Norm in \mathbb{C}^n und $\|\cdot\|: \mathbb{C}^{n \times n} \rightarrow [0, \infty)$ die zugehörige Operatornorm. Man beachte, dass $\|\cdot\|$ submultiplikativ ist, d.h. es gilt

$$\|AB\| \leq \|A\| \cdot \|B\| \quad (A, B \in \mathbb{C}^{n \times n}).$$

3.11 Definition. Für $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ist

$$\exp(A) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A^n}{n!}$$

die exp-Funktion von A .

3.12 Satz. a) Die exp-Reihe ist normkonvergent, d.h. es gilt $\sum_{n=0}^{\infty} \|\frac{A^n}{n!}\| < \infty$ und damit konvergent. Es gilt $\exp(0) = I_n$ ($n \times n$ -Einheitsmatrix) und $\|\exp(A)\| \leq \exp(\|A\|)$.

b) Für $A, B \in \mathbb{C}^{n \times n}$ mit $AB = BA$ gilt $\exp(A + B) = \exp(A) \exp(B)$.

c) Durch $Z(t) := \exp(tA)$ ($t \in \mathbb{R}$) ist die eindeutige Lösung der (Matrizen-)Dgl. $Z'(t) = AZ(t)$ mit $Z(0) = I_n$ gegeben. Eine Funktion $y \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{C}^n)$ ist genau dann eine Lösung der Dgl. (3-3), falls ein $c \in \mathbb{C}^n$ existiert mit $y(t) = \exp(tA)c$ ($t \in \mathbb{R}$).

Beweis. Übungen. □

Mit diesem Satz ist die Lösung der Dgl. (3-3) zurückgeführt auf die Berechnung der exp-Funktion einer Matrix. Um explizite Lösungen zu erhalten, verwenden wir den Satz über die Jordan-Normalform, der aus der Linearen Algebra bekannt ist:

Zu $\lambda \in \mathbb{C}$ und $p \in \mathbb{N}$ sei

$$J_p(\lambda) := \begin{pmatrix} \lambda & 1 & & & \\ & \lambda & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \lambda & 1 \\ & & & & \lambda \end{pmatrix}$$

die Jordan-Elementarmatrix (das Jordan-Kästchen) der Dimension p . Nach dem Satz von der Jordan-Normalform existiert zu jeder Matrix $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ eine invertierbare Matrix $S \in GL(n, \mathbb{C})$ mit

$$S^{-1}AS = \begin{pmatrix} J(\lambda_1) & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & J(\lambda_1) & & \\ & & & J(\lambda_2) & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & J(\lambda_\ell) \end{pmatrix},$$

wobei $\lambda_1, \dots, \lambda_\ell$ die paarweise verschiedenen Eigenwerte von A sind und $J(\lambda_k)$ ein Jordan-Kästchen geeigneter Dimension zum Eigenwert λ_k ist.

Dies ist eine spezielle Darstellung der Form $S^{-1}AS = D + N$ mit $DN = ND$, wobei D eine Diagonalmatrix und N nilpotent ist. Dabei hat D auf der Diagonalen die Eigenwerte entsprechend ihrer (algebraischen) Vielfachheit und N hat nur auf der ersten Nebendiagonalen die Werte 0 und 1, sonst nur 0. Es folgt $S^{-1}(tA)S = tD + tN$ und $S^{-1} \exp(tA)S = \exp(S^{-1}tAS) = \exp(tD + tN) = \exp(tD) \exp(tN)$, d.h.

$$\exp(tA) = S \exp(tD) \exp(tN) S^{-1}.$$

Zu einem Jordan-Kästchen $J_p(\lambda_k)$ der Dimension p zu einem Eigenwert λ_k sind die zugehörigen Hauptvektoren h_1, \dots, h_p definiert durch

$$(A - \lambda_k I_n)h_j = h_{j-1} \quad (j = 1, \dots, p),$$

wobei $h_0 := 0$ gesetzt wurde. Dabei ist h_1 ein Eigenvektor und h_j heißt Hauptvektor der Stufe j . Die Transformationsmatrix aus dem Satz über die Jordan-Normalform besteht gerade aus allen Hauptvektoren der Matrix A , denn

$$S^{-1}ASe_j = \lambda e_j + e_{j-1}$$

bedeutet für $h_j := Se_j$ (j -te Spalte der Matrix S) gerade

$$Ah_j = S(\lambda e_j + e_{j-1}) = \lambda h_j + h_{j-1}.$$

3.13 Satz. Sei h_j für $j = 1, \dots, p$ der Hauptvektor der Stufe j zum Eigenwert λ der Matrix A . Dann ist

$$y_j(t) := e^{\lambda t} \left(h_j + th_{j-1} + \frac{t^2}{2} h_{j-2} + \dots + \frac{t^{j-1}}{(j-1)!} h_1 \right)$$

eine Lösung der Dgl. $y' = Ay$. Das System aller so gebildeten Lösungen (zu allen Jordan-Kästchen) bildet ein Fundamentalsystem der Dgl.

Beweis. Wir wissen nach Satz 3.12, dass die Spalten von $\exp(tA)$ ein Fundamentalsystem bilden. Für jedes $S \in GL(n, \mathbb{C})$ ist wegen $\frac{d}{dt}(\exp(tA)S) = A \exp(tA)S$ und $\det(\exp(tA)S)|_{t=0} = \det(S) \neq 0$ auch $Y(t) := \exp(tA)S$ ein Fundamentalsystem.

Wir verwenden die Transformationsmatrix S aus dem Satz über die Jordan-Normalform. Hier ist $\exp(tA)S = S \exp(tD) \exp(tN)$. Zur Vereinfachung der Notation nehmen wir an, dass A nur ein Jordan-Kästchen $J_p(\lambda)$ zum Eigenwert λ der Dimension p besitzt. In diesem Fall ist

$$D = \begin{pmatrix} \lambda & & & \\ & \lambda & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & & \\ & 0 & 1 & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Beachte, dass

$$N^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & \\ & 0 & 0 & 1 \\ & & \ddots & \ddots & 1 \\ & & & 0 & 0 \end{pmatrix}, \dots, \quad N^{p-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ & 0 & 0 & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & 0 \\ & & & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad N^p = 0.$$

Damit ist

$$\exp(tD) = \begin{pmatrix} e^{\lambda t} & & & \\ & e^{\lambda t} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{\lambda t} \end{pmatrix} = e^{\lambda t} I_n$$

und

$$\exp(tN) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^k N^k}{k!} = \sum_{k=0}^{p-1} \frac{t^k N^k}{k!} = \begin{pmatrix} 1 & t & \frac{t^2}{2} & \cdots & \frac{t^{p-1}}{(p-1)!} \\ & 1 & t & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & \frac{t^2}{2} \\ & & & \ddots & t \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

Somit erhalten wir mit den Hauptvektoren $S = (h_1, \dots, h_p)$

$$\begin{aligned} S \exp(tD) \exp(tN) &= e^{\lambda t} \begin{pmatrix} h_1, \dots, h_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & t & \frac{t^2}{2} & \cdots & \frac{t^{p-1}}{(p-1)!} \\ & 1 & t & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & \frac{t^2}{2} \\ & & & \ddots & t \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \\ &= e^{\lambda t} \left(h_1, \quad h_2 + th_1, \quad \dots, \quad h_p + th_{p-1} + \cdots + \frac{t^{p-1}}{(p-1)!} h_1 \right). \end{aligned}$$

Im allgemeinen Fall besitzt A mehrere Jordan-Kästchen, und die obige Darstellung zu verschiedenen Jordan-Kästchen ergibt die Spalten der Matrix $Y(t) := \exp(tA)S$ und damit ein Fundamentalsystem. \square

3.14 Beispiel. Betrachte $y' = Ay$ mit

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Das charakteristische Polynom ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \det(A - \lambda I_3) &= \det \begin{pmatrix} 2 - \lambda & 0 & 1 \\ -1 & 1 - \lambda & -1 \\ -1 & 0 & -\lambda \end{pmatrix} \\ &= (2 - \lambda)(1 - \lambda)(-\lambda) + 1 \cdot (-1 \cdot 0 - (-1)(1 - \lambda)) \\ &= -(\lambda - 1)^3. \end{aligned}$$

Damit ist $\lambda = 1$ der einzige Eigenwert mit algebraischer Vielfachheit 3. Das lineare Gleichungssystem $(A - 1 \cdot I_3) = 0$ besitzt nur 2 linear unabhängige Lösungen (Eigenvektoren), etwa

$$h_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad h_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Weiterhin gilt

$$(A - \lambda)h_2^{(1)} = h_1^{(1)} \quad \text{für } h_2^{(1)} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Für die Transformationsmatrix

$$S := (h_1^{(1)}, h_2^{(1)}, h_1^{(2)}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

erhält man daher die Jordan-Normalform

$$S^{-1}AS = J := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Jede Lösung der Dgl. $y' = Ay$ hat somit die Form

$$y(t) = c_1 e^t h_1^{(1)} + c_2 e^t (h_2^{(1)} + t h_1^{(1)}) + c_3 e^t h_1^{(2)}$$

mit $c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{C}$.

d) Lineare Dgl. höherer Ordnung mit konstanten Koeffizienten

Die Überlegungen des vorherigen Abschnitts lassen sich übertragen auf Dgl. der Form

$$x^{(k)}(t) + a_1 x^{(k-1)}(t) + \dots + a_k x(t) = 0. \quad (3-4)$$

Wir setzen (vgl. Bemerkung 1.4 a)

$$y(t) := \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \\ \vdots \\ x^{(k-1)}(t) \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 0 & 1 \\ -a_k & -a_{k-1} & \dots & \dots & -a_1 \end{pmatrix}.$$

Damit ist (3-4) äquivalent zu $y'(t) = Ay(t)$.

3.15 Satz. a) Das charakteristische Polynom der Matrix A ist gegeben durch

$$\chi_A(\lambda) := \det(\lambda I_k - A) = \lambda^k + a_1 \lambda^{k-1} + \dots + a_{k-1} \lambda + a_k.$$

b) Sei λ eine p -fache Nullstelle von χ_A . Dann sind

$$x_1(t) := e^{\lambda t}, \quad x_2(t) := t e^{\lambda t}, \quad \dots, \quad x_p(t) := t^{p-1} e^{\lambda t}$$

linear unabhängige Lösungen der Dgl. (3-4). Betrachtet man diese Lösungen für alle Nullstellen von χ_A , so erhält man ein Fundamentalsystem.

Beweis. a) wird hier nicht bewiesen (Beweis z.B. möglich durch Induktion).

b) Wir konstruieren explizit eine Kette von Hauptvektoren. Dazu sei

$$c(\mu) := \begin{pmatrix} 1 \\ \mu \\ \mu^2 \\ \vdots \\ \mu^{k-1} \end{pmatrix}$$

und $h_j := \frac{1}{(j-1)!} c^{(j-1)}(\lambda)$. Es gilt

$$Ac(\mu) = \begin{pmatrix} \mu \\ \vdots \\ \mu^{k-1} \\ \mu^k - \chi_A(\mu) \end{pmatrix} = \mu c(\mu) - \chi_A(\mu) e_k.$$

Wir leiten j -mal nach t ab:

$$Ac^{(j)}(\mu) = \mu c^{(j)}(\mu) + j c^{(j-1)}(\mu) - \chi_A^{(j)}(\mu) e_k \quad (j = 0, 1, \dots).$$

Falls nun λ eine p -fache Nullstelle ist, so gilt $\chi_A(\lambda) = \dots = \chi_A^{(p-1)}(\lambda) = 0$ und damit

$$(A - \lambda I_k) c^{(j)}(\lambda) = \begin{cases} 0, & j = 0, \\ j c^{(j-1)}(\lambda), & j = 1, \dots, p-1. \end{cases}$$

Für die Vektoren h_j folgt damit

$$(A - \lambda I_k) h_j = \begin{cases} 0, & j = 1, \\ h_{j-1}, & j = 2, \dots, p. \end{cases}$$

Damit ist h_1, \dots, h_p eine Kette von Hauptvektoren. Nach Satz 3.13 sind

$$y_j(t) := e^{\lambda t} \left(h_j + t h_{j-1} + \frac{t^2}{2} h_{j-2} + \dots + \frac{t^{j-1}}{(j-1)!} h_1 \right) \quad (j = 1, \dots, p)$$

linear unabhängige Lösungen von $y' = Ay$. Wir brauchen davon nur die erste Komponente. Da die erste Komponente von h_j für $j = 1$ gleich 1 ist und für $j > 1$ verschwindet, erhalten wir

$$x_j(t) = e^{\lambda t} \frac{t^{j-1}}{(j-1)!} \quad (j = 1, \dots, p)$$

für die ersten Komponenten. Wir können auf den Faktor $\frac{1}{(j-1)!}$ noch verzichten. Die ersten Komponenten sind linear unabhängig, da sonst auch die Vektoren y_j linear abhängig wären. \square

Bei speziellen Inhomogenitäten kann man eine partikuläre Lösung direkt hinschreiben:

3.16 Satz. *Betrachte die Dgl.*

$$x^{(k)}(t) + a_1 x^{(k-1)}(t) + \dots + a_k x(t) = t^s e^{\lambda t} \quad (3-5)$$

mit $s \in \mathbb{N}_0$ und $\lambda \in \mathbb{C}$. Sei λ eine p -fache Nullstelle von χ_A mit $p \in \mathbb{N}_0$, d.h. $\chi_A(\mu) = (\mu - \lambda)^p \psi(\mu)$ mit $\psi(\lambda) \neq 0$. Dann ist

$$x(t) := \frac{s!}{(p+s)!} \frac{\partial^{p+s}}{\partial \mu^{p+s}} \left(\frac{\exp(\mu t)}{\psi(\mu)} \right) \Big|_{\mu=\lambda}$$

eine partikuläre Lösung von (3-5).

Beweis. Betrachte den Differentialoperator

$$L: C^k(\mathbb{R}; \mathbb{C}) \rightarrow C(\mathbb{R}; \mathbb{C}), \quad u \mapsto u^{(k)} + a_1 u^{(k-1)} + \dots + a_k u =: \chi_A(D)u$$

mit

$$\chi_A(D) := D^k + a_1 D^{k-1} + \dots + a_k D^0, \quad D := \frac{d}{dt}.$$

Dann gilt für die Funktion $f(t) := e^{\mu t}$ mit $\mu \in \mathbb{C}$ offensichtlich

$$(Lf)(t) = (\chi_A(D)f)(t) = \chi_A(\mu)f(t) = (\mu - \lambda)^p \psi(\mu)f(t).$$

Somit

$$L\left(\frac{1}{\psi(\mu)}f\right)(t) = (\mu - \lambda)^p e^{\mu t}.$$

Wir differenzieren die letzte Gleichung $(p+s)$ -mal nach μ an der Stelle $\mu = \lambda$. Auf der rechten Seite verwenden wir

$$\frac{\partial^j}{\partial \mu^j} (\mu - \lambda)^p \Big|_{\mu=\lambda} = \begin{cases} 0, & j \neq p, \\ p!, & j = p. \end{cases}$$

Mit der Produktregel erhält man für die oben definierte Funktion x :

$$\begin{aligned} (Lx)(t) &= \frac{s!}{(p+s)!} L \left[\frac{\partial^{p+s}}{\partial \mu^{p+s}} \left(\frac{\exp(\mu t)}{\psi(\mu)} \right) \Big|_{\mu=\lambda} \right] \\ &= \frac{s!}{(p+s)!} \frac{\partial^{p+s}}{\partial \mu^{p+s}} \left[(\mu - \lambda)^p e^{\mu t} \right] \Big|_{\mu=\lambda} \\ &= \frac{s!}{(p+s)!} \binom{p+s}{p} p! t^s e^{\lambda t} \\ &= t^s e^{\lambda t}. \end{aligned}$$

□

3.17 Bemerkung (Leibniz-Formel). Im letzten Beweis wurde die Produktregel gleich für höhere Ableitungen verwendet, die sogenannte Leibniz-Formel: Seien f, g n -fach differenzierbar. Dann gilt

$$(fg)^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)} g^{(n-k)}.$$

Diese Formel kann man leicht induktiv beweisen.

3.18 Bemerkung. Bei Dgl. mit reellen Koeffizienten führen die bisherigen Ansätze auf komplexwertige Lösungen. Falls y eine Lösung von $y' = Ay$ ist, so ist auch $\operatorname{Re} y$ und $\operatorname{Im} y$ eine Lösung. Wenn die Matrix A reell ist, treten komplexe Eigenwerte stets in konjugiert komplexen Paaren auf. Wegen

$$e^{\lambda t} = e^{\operatorname{Re} \lambda t} (\cos(\operatorname{Im} \lambda t) + i \sin(\operatorname{Im} \lambda t))$$

treten dann noch \cos - und \sin -Terme auf. Diese Überlegungen gelten analog für Dgl. höherer Ordnung.

3.19 Beispiel. Betrachte

$$x^{(4)}(t) - 2x''(t) + x(t) = 24 t \sin t. \quad (3-6)$$

(i) Fundamentalsystem der homogenen Dgl.: Es ist

$$\chi_A(\mu) = \mu^4 - 2\mu^2 + 1 = (\mu - 1)^2(\mu + 1)^2.$$

Nach Satz 3.15 ist also

$$e^t, te^t, e^{-t}, te^{-t}$$

ein Fundamentalsystem der homogenen Gleichung.

(ii) Übergang zum Komplexen: Wegen $t \sin t = \operatorname{Im}(te^{it})$ betrachten wir zunächst die rechte Seite te^{it} .

(iii) Bestimmung einer partikulären Lösung: In der Bezeichnung von Satz 3.16 ist $s = 1$, $\lambda = i$ und $p = 0$. Damit ist $\psi(t) = \chi_A(t)$, und der Ansatz für die spezielle Lösung lautet für die Inhomogenität te^{it} :

$$x_0(t) = \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\frac{e^{\mu t}}{\psi(\mu)} \right) \Big|_{\mu=i} = \frac{\psi(\mu)te^{\mu t} - \psi'(\mu)e^{\mu t}}{\psi^2(\mu)} \Big|_{\mu=i} = \dots = \frac{t + 2i}{4} e^{it}.$$

Für die rechte Seite $24te^{it}$ erhalten wir damit die komplexwertige spezielle Lösung

$$\begin{aligned} 24x_0(t) &= (6t + 12i)e^{it} = (6t + 12i)(\cos t + i \sin t) \\ &= (6t \cos t - 12 \sin t) + i(6t \sin t + 12 \cos t). \end{aligned}$$

(iv) Rückkehr zur reellen Lösung: Da die ursprüngliche rechte Seite der Imaginärteil der in (iii) betrachteten Inhomogenität war, ist auch der Imaginärteil von $x_0(t)$ eine partikuläre Lösung der ursprünglichen Gleichung. Somit ist

$$\operatorname{Im} 24x_0(t) = 6t \sin t + 12 \cos t$$

eine spezielle Lösung von (3-6).

(v) Allgemeine Lösung: Die allgemeine Lösung ist somit gegeben durch

$$x(t) = c_1 e^t + c_2 t e^t + c_3 e^{-t} + c_4 t e^{-t} + 6t \sin t + 12 \cos t$$

mit Konstanten $c_j \in \mathbb{C}$.

4. Qualitative Aspekte

4.1 Worum geht's? Für viele Anwendungen ist nicht nur die Frage der eindeutigen Lösbarkeit einer Dgl. wichtig, sondern auch die Frage, wie sich die Lösungen verhalten. Insbesondere die Stabilität der Lösungen, d.h. das Verhalten der Lösung für $t \rightarrow \infty$ ist wichtig. Eine Lösung heißt stabil, falls eine kleine Abweichung im Anfangswert eine (für alle Zeiten) kleine Abweichung in der Lösung bewirkt. Man beachte, dass kleine Abweichungen in den Daten in den Anwendungen stets vorhanden sind.

Die Stabilität der Lösung einer gewöhnlichen Dgl. (und erst recht einer partiellen Dgl.) ist sehr schwer zu beweisen. Es gibt kein allgemein gültiges Rezept, diese Frage zu beantworten. Falls man jedoch Glück hat, kann man eine Ljapunov-Funktion zur Dgl. finden und somit die Stabilität beweisen.

Dieser Abschnitt soll nur einen kurzen Einblick in dieses Themengebiet liefern. Vertieft werden diese Fragen dann im Hauptstudium insbesondere auch bei partiellen Dgl.

a) Stabilität

Bei der qualitativen Beschreibung des Lösungsverhaltens von Dgl. werden einige Begriffe üblicherweise verwendet, die in folgender Definition zusammengestellt werden.

4.2 Definition. Gegeben sei das Anfangswertproblem

$$y'(t) = f(t, y(t)) \quad (t \in J), \quad y(t_0) = y^0. \quad (4-1)$$

mit $f: J \times X \rightarrow X$, $X := \mathbb{R}^n$.

Der Raum X heißt der Zustandsraum oder Phasenraum.

Sei nun das Anfangswertproblem (4-1) eindeutig lösbar und $t_0 \in J$ fest. Dann heißt die Abbildung

$$\Phi: \mathbb{R} \times X \rightarrow X, \quad (t, y^0) \mapsto \Phi(t, y^0) := y(t)$$

der Fluss der Dgl. (wobei y wieder die Lösung des Anfangswertproblems ist). Der zugehörige Wertebereich

$$\gamma(y^0) := \{\Phi(t, y^0) : t \in J\}$$

heißt der Orbit (oder Phasenkurve, Trajektorie). Ein $y^0 \in X$ heißt ein Fixpunkt, falls gilt

$$\Phi(t, y^0) = y^0 \quad (t \in J).$$

Offensichtlich ist y^0 genau dann ein Fixpunkt, wenn

$$f(t, y^0) = 0 \quad (t \in J).$$

In diesem Fall heißt y^0 ein singulärer Punkt von f . So besitzt z.B. die logistische Gleichung

$$y'(t) = y(t)(y(t) - 1)$$

die singulären Punkte $y^0 = 0$ und $y^0 = 1$.

4.3 Beispiel. Die Dgl.

$$x'' + x = 0$$

(ungedämpftes lineares Pendel) ist äquivalent zum System

$$y' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} y = \begin{pmatrix} y_2 \\ -y_1 \end{pmatrix},$$

wobei wie üblich $y := \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}$ gesetzt wurde. Zu $y^0 \in \mathbb{R}^2$ ist die Lösung des Anfangswertproblems $y' = Ay$, $y(0) = y^0$ gegeben durch

$$\Phi(t, y^0) = y(t) = \begin{pmatrix} \cos t & \sin t \\ -\sin t & \cos t \end{pmatrix} y^0.$$

Damit ist der Orbit periodisch mit Periode 2π .

4.4 Beispiel (Orbits bei 2×2 -Matrizen). Das qualitative Verhalten lässt sich gut beschreiben, falls man die lineare Dgl. $y' = Ay$ mit einer konstanten 2×2 -Matrix A betrachtet. Die Lösung ist natürlich durch $y(t) = \exp(tA)y(t_0)$ gegeben, das qualitative Verhalten wird durch die Eigenwerte $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$ von A bestimmt. Wir sehen an den Phasenportraits (Orbits) der Lösung folgende Möglichkeiten:

- $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, d.h. $\lambda_1, \lambda_2 > 0$: Quelle (siehe Abbildung 7).
- $A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, d.h. $\lambda_1, \lambda_2 < 0$: Senke (siehe Abbildung 8).
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, d.h. $\lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0$: instabiler Sattelpunkt (siehe Abbildung 9).
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, d.h. doppelter Eigenwert $\lambda_1 = \lambda_2 > 0$ mit einfacher geometrischer Vielfachheit (Jordan-Normalform): instabiler eintangentiger Knoten (siehe Abbildung 10).
- $A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, d.h. doppelter Eigenwert $\lambda_1 = \lambda_2 < 0$ mit einfacher geometrischer Vielfachheit (Jordan-Normalform): stabiler eintangentiger Knoten (siehe Abbildung 11).
- $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$, d.h. zwei rein imaginäre (und zueinander konjugiert komplexe) Eigenwerte $\lambda_1 = \overline{\lambda_2}$: Zentrum oder Wirbelpunkt (siehe Abbildung 12).
- $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$, d.h. zwei komplexe (und zueinander konjugierte) Eigenwerte $\lambda_1 = \overline{\lambda_2}$ mit $\operatorname{Re} \lambda_j > 0$: instabiler Strudelpunkt (siehe Abbildung 13).
- $A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$, d.h. zwei komplexe (und zueinander konjugierte) Eigenwerte $\lambda_1 = \overline{\lambda_2}$ mit $\operatorname{Re} \lambda_j < 0$: stabiler Strudelpunkt (siehe Abbildung 14).

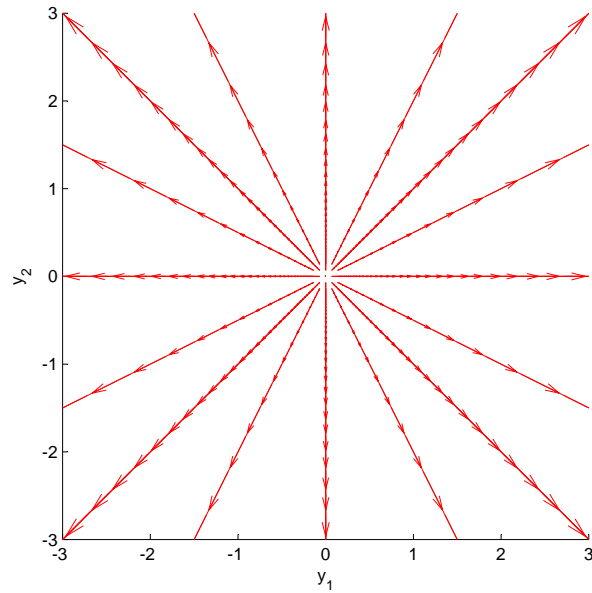


Abbildung 7: Orbits bei zwei positiven Eigenwerten (Quelle)

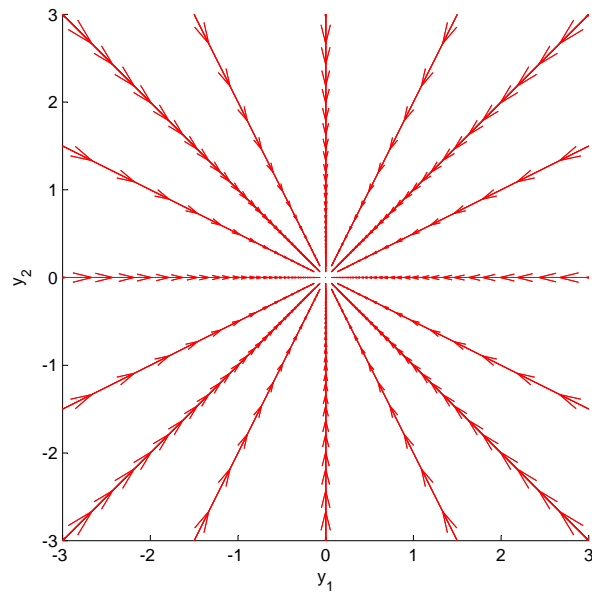


Abbildung 8: Orbits bei zwei negativen Eigenwerten (Senke)

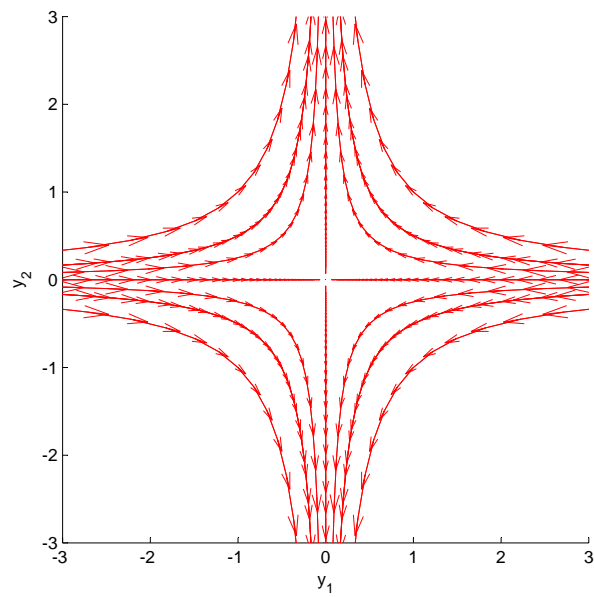


Abbildung 9: Ein positiver und ein negativer Eigenwert (instabiler Sattelpunkt)

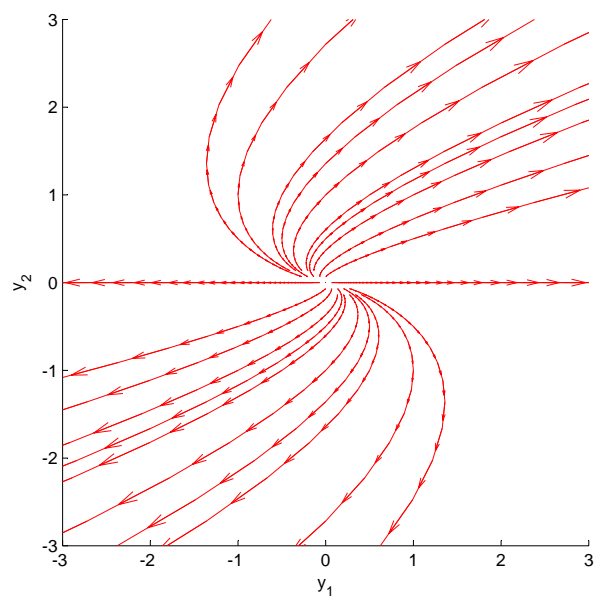


Abbildung 10: Doppelter positiver Eigenwert mit Jordan-Normalform (instabiler eintangentiger Knoten)

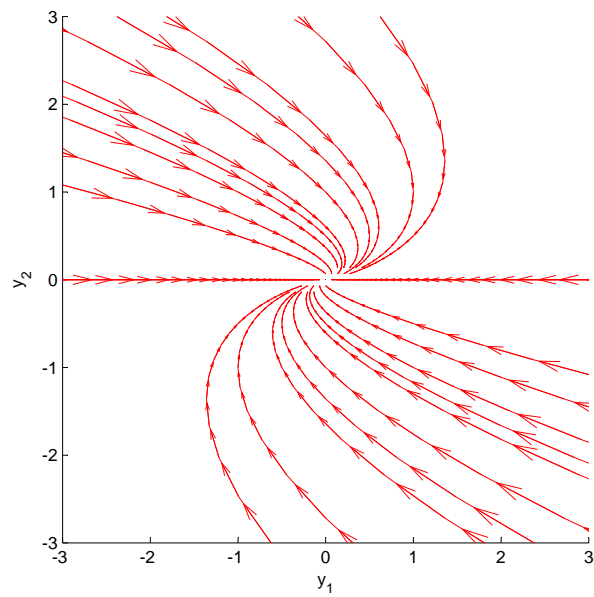


Abbildung 11: Doppelter negativer Eigenwert mit Jordan-Normalform (stabiler eintangentiger Knoten)

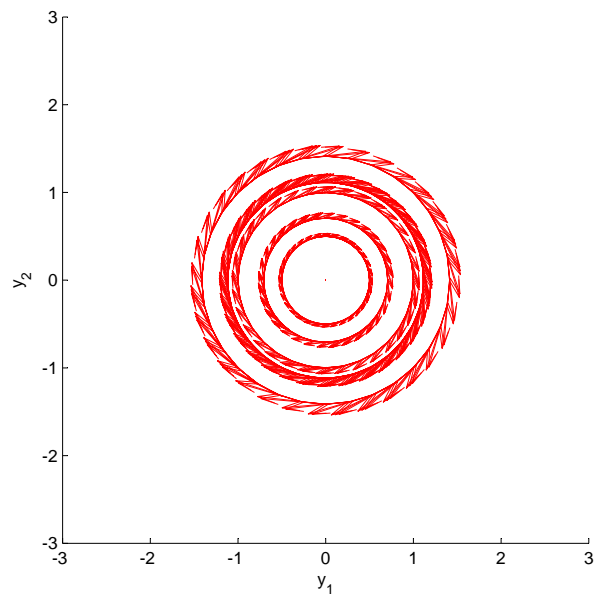


Abbildung 12: Rein imaginärer Eigenwert (Wirbelpunkt)

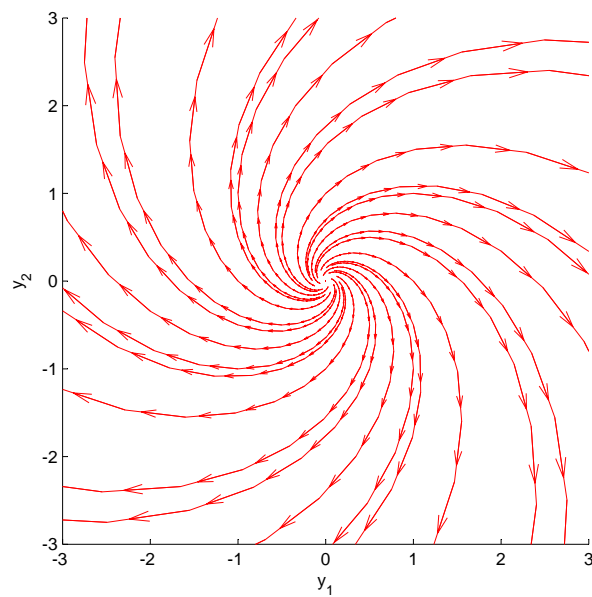


Abbildung 13: Zwei komplexe Eigenwerte mit positivem Realteil (instabiler Strudel-
punkt)

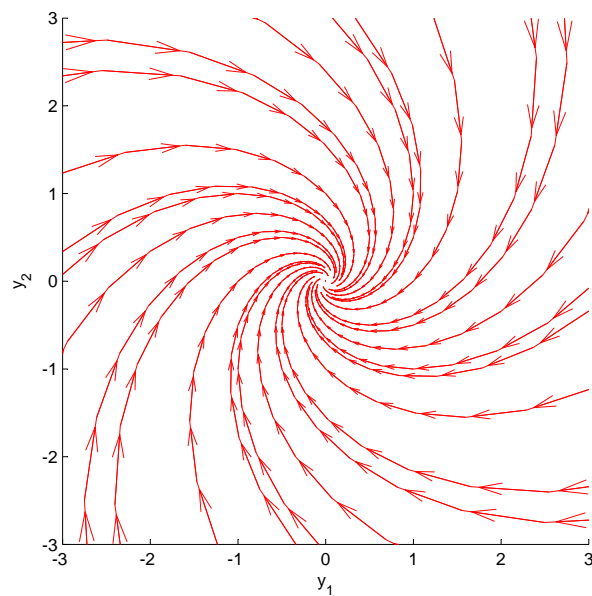


Abbildung 14: Zwei komplexe Eigenwerte mit negativem Realteil (stabiler Strudel-
punkt)

4.5 Definition. Eine Lösung y des Anfangswertproblems

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad y(0) = y^0$$

heißt stabil, falls für alle $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$ existiert, so dass für alle Lösungen x des Anfangswertproblems

$$x'(t) = f(t, x(t)), \quad x(0) = x^0$$

mit $|x^0 - y^0| < \delta$ gilt:

$$|x(t) - y(t)| < \varepsilon \quad (t \in [0, \infty)).$$

Die Lösung y heißt instabil, falls sie nicht stabil ist.

Die Lösung y heißt asymptotisch stabil, falls sie stabil ist und falls für x wie oben zusätzlich gilt

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - y(t)| = 0.$$

In obigen Beispielen ist etwa ein Wirbelpunkt stabil, eine Senke ist asymptotisch stabil, eine Quelle ist instabil. Allgemein ist die triviale Lösung $y = 0$ der Dgl. $y' = Ay$ mit $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ genau dann

- instabil, falls ein Eigenwert λ von A existiert mit $\operatorname{Re} \lambda > 0$ oder falls ein Eigenwert λ von A existiert mit $\operatorname{Re} \lambda = 0$, für welchen die algebraische Vielfachheit größer ist als die geometrische Vielfachheit,
- stabil, falls für alle Eigenwerte λ von A gilt: $\operatorname{Re} \lambda \leq 0$ und für alle Eigenwerte λ mit $\operatorname{Re} \lambda = 0$ die algebraische Vielfachheit gleich der geometrischen Vielfachheit ist,
- asymptotisch stabil, falls für alle Eigenwerte λ gilt $\operatorname{Re} \lambda < 0$.

4.6 Satz. Gegeben sei die nichtlineare Dgl.

$$x' = Ax + g(\cdot, x) = f(\cdot, x)$$

mit $g \in C^1(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$, A konstante $n \times n$ -Matrix, und

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{|g(t, x)|}{|x|} = 0, \quad \text{gleichmäßig in } t.$$

Falls für alle Eigenwerte $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ von A gilt: $\operatorname{Re} \lambda_i < 0$, so ist die triviale Lösung $y = 0$ stabil. Insbesondere existiert eine globale Lösung der Dgl.

Beweis. $y = 0$ ist Lösung, da $g(\cdot, 0) = 0$. Jede Lösung z des homogenen Systems $z' = Az$ ist gegeben durch $z(t) = \exp(tA)z(0)$. Da die Koeffizienten der Matrix $\exp(tA)$ nur Terme der Form $t^s e^{\lambda_i t}$ enthalten, existieren $a, b > 0$ mit

$$\|\exp(tA)\| \leq a e^{-bt} \quad (t \geq 0).$$

Sei nun x die (lokale) Lösung von $x' = Ax + g(\cdot, x)$, $x(0) = x^0$. Dann gilt (Variation der Konstanten)

$$\begin{aligned}x(t) &= e^{At}x^0 + \int_0^t e^{A(t-s)}g(s, x(s))ds, \\x'(t) &= Ae^{At}x^0 + g(t, x(t)) + A \int_0^t e^{A(t-s)}g(s, x(s))ds,\end{aligned}$$

d.h. x ist Lösung (Kontrolle durch Einsetzen). Es folgt

$$|x(t)| \leq a|x^0|e^{-bt} + a \int_0^t e^{-b(t-s)}|g(s, x(s))|ds. \quad (4-2)$$

Wegen $\frac{g(\cdot, x)}{|x|} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0$ folgt

$$\forall \varepsilon \in (0, b) \exists \delta \in (0, \varepsilon) \forall x, |x| < \delta \forall t \geq 0 : |g(t, x)| < \frac{\varepsilon}{a}|x|.$$

Behauptung:

$$\forall t \geq 0 \forall x^0, |x^0| < \frac{\delta}{a} : |x(t)| < \delta (< \varepsilon). \quad (4-3)$$

Beweis: Sei x^0 mit $|x^0| < \frac{\delta}{a}$, $t_0 := \inf\{t \geq 0 : |x(t)| = \delta\}$.

Annahme: t_0 ist endlich, dann folgt mit (4-2) und dem Lemma von Gronwall

$$\begin{aligned}\forall t \in [0, t_0] : |x(t)| &\leq \delta e^{-bt} + a \int_0^t e^{-b(t-s)} \frac{\varepsilon}{a} |x(s)| ds \\ &= \delta e^{-bt} + \varepsilon \int_0^t e^{-b(t-s)} |x(s)| ds \\ \Rightarrow |x(t)| &\leq \delta e^{-bt} \cdot \exp\left(\varepsilon \int_0^t e^{-b(t-s)} ds\right) \\ &\leq \delta e^{-bt} e^{\varepsilon t} \\ &= \delta e^{-(b-\varepsilon)t} \\ \Rightarrow \delta = x(t_0) &\leq \delta e^{-(b-\varepsilon)t_0} < \delta,\end{aligned} \quad (4-4)$$

Widerspruch. D.h. $t_0 = \infty$ und es folgt, dass x beschränkt bleibt, falls $|x^0| < \frac{\delta}{a} = \frac{\delta(\varepsilon)}{a}$. Dann bleibt aber auch $g(\cdot, x)$ beschränkt, mithin auch x' . Also ist $t_0 = \infty$ und $y = 0$ stabil. Mit (4-4), jetzt angewandt für alle $t \geq 0$ folgt schließlich $|x(t)| \rightarrow 0$. \square

4.7 Beispiel (Räuber-Beute-Modell).

$$x'_1 = r_1(\cdot, x)x_1, \quad x'_2 = r_2(\cdot, x)x_2,$$

$$r_1(\cdot, x) = a - bx_2 - mx_1, \quad r_2(\cdot, x) = -d + cx_1 - nx_2,$$

$a, b, c, d, m, n > 0$, d.h.

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad x' = f(x), \quad f(x) = \begin{pmatrix} x_1(a - bx_2 - mx_1) \\ x_2(-d + cx_1 - nx_2) \end{pmatrix}.$$

Fixpunkte: $f(x) \stackrel{!}{=} 0$

$$\Leftrightarrow \quad (\text{i}) \quad x_1 = x_2 = 0, \quad x^1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{oder} \quad (\text{ii}) \quad x_1 = 0, \quad x_2 = -\frac{d}{n}, \quad x^2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{d}{n} \end{pmatrix}$$

$$\text{oder} \quad (\text{iii}) \quad x_1 = \frac{a}{m}, \quad x_2 = 0, \quad x^3 = \begin{pmatrix} \frac{a}{m} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{oder} \quad (\text{iv}) \quad x^4 = \begin{pmatrix} x_1^4 \\ x_2^4 \end{pmatrix}.$$

Seien x_j^4 ($j = 1, 2$) Lösungen von

$$a - bx_2 - mx_1 = 0, \quad -d + cx_1 - nx_2 = 0,$$

$$x_1^4 = \frac{bd + an}{bc + nm}, \quad x_2^4 = \frac{ac - md}{bc + mn}.$$

(i) x^1 (bzw. $y = x^1 = 0$) ist nicht stabil:

$$x' = f(x), \quad f(x) = Ax + o(|x|) \text{ mit } A = \frac{\partial f}{\partial x}(0),$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x) = \begin{pmatrix} a - bx_2 - 2mx_1 & -bx_1 \\ cx_2 & -d + cx_1 - 2nx_2 \end{pmatrix},$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(0) = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & -d \end{pmatrix} \quad \lambda_1 = a > 0, \quad \lambda_2 = -d < 0,$$

(ii) $y \equiv x^3$ ist asymptotisch stabil, falls $ac < md$:

$$z := x - x^3, \quad z' = \tilde{f}(z), \quad f(x) = \underbrace{\frac{\partial f}{\partial x}(x^3)}_A (x - x^3) + o(|x - x^3|),$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x^3) = \begin{pmatrix} -a & -\frac{ba}{m} \\ 0 & -d + \frac{ac}{m} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = -a < 0, \quad \lambda_2 = -d + \frac{ca}{m} = \frac{-dm + ca}{m} < 0 \text{ falls } ac < md.$$

(iii) x^2 ist nicht stabil.

(iv) x^4 ist stabil, falls $ac > md$.

4.8 Beispiel. Betrachte die Dgl. einer gedämpften Schwingung

$$y''(t) + y(t) + ry'(t) = 0 \quad (t \in \mathbb{R})$$

mit $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, wobei $r > 0$ der Dämpfungsfaktor ist. Wir multiplizieren mit y' :

$$y''y' + yy' + r(y')^2 = 0$$

Damit folgt

$$\frac{d}{dt} (|y'|^2 + |y|^2) = -2r(y')^2 \leq 0.$$

Also ist die linke Seite als Funktion von t monoton fallend, d.h.

$$|y'(t)|^2 + |y(t)|^2 \leq |y'(0)|^2 + |y(0)|^2.$$

Damit ist die Lösung $y_0(t) = 0 \quad (t \in \mathbb{R})$ eine stabile Lösung der Dgl., denn eine kleine Abweichung der Startwerte $(y(0), y'(0))$ an der Stelle 0 kann für alle $t \in \mathbb{R}$ nicht größer werden.

Schreibt man dieses Beispiel als System erster Ordnung, erhält man mit $x := \begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix}$ die (autonome) Gleichung

$$x'(t) = \begin{pmatrix} x_2(t) \\ -x_1(t) - rx_2(t) \end{pmatrix} =: f(x(t)).$$

Für $E(x) := |x|^2$ erhält man für eine Lösung $x \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{R}^2)$

$$\frac{d}{dt} E(x(t)) = (\nabla E(x(t)))^t \cdot x'(t) = 2x(t)^t x'(t) = -2rx_2^2(t) \leq 0.$$

Die Funktion E heißt eine Lyapunov-Funktion zur Dgl. $x'(t) = f(x(t))$.

4.9 Definition. Der Punkt $x^0 \in \mathbb{R}^n$ sei ein isolierter singulärer Punkt des Vektorfeldes $f \in C(\mathbb{R}^n; \mathbb{R}^n)$. Dann heißt $L \in C^1(U(x^0); \mathbb{R})$, $U(x^0)$ eine Umgebung von x^0 , eine Lyapunov-Funktion zur autonomen Dgl. $x'(t) = f(x(t))$ am Punkt x^0 , falls gilt:

- (i) $L(x) \geq 0$ und $L(x) = 0$ nur an der Stelle x^0 ,
- (ii) Es gilt $\langle \nabla L(x), f(x) \rangle \leq 0 \quad (x \in \mathbb{R}^n)$.

4.10 Satz. Sei $x^0 = 0 \in \mathbb{R}^n$ ein isolierter singulärer Punkt des Vektorfeldes $f \in C(\mathbb{R}^n; \mathbb{R}^n)$. Falls eine Lyapunov-Funktion L zur autonomen Dgl. $x'(t) = f(x(t))$ am Punkt x^0 existiert, so ist die konstante Lösung $y = 0$ stabil.

Beweis. Die Funktion L sei in $B(0, \varepsilon^0)$ definiert. Für $0 < \varepsilon < \varepsilon_0$ setze $m(\varepsilon) := \min_{|x|=\varepsilon} L(x)$. Nach Eigenschaft (i) in Definition 4.9 ist $m > 0$. Da L stetig ist und $L(0) = 0$, existiert ein $\delta = \delta(\varepsilon) < \varepsilon$ mit $L(x) < m(\varepsilon)$ ($x \in B(0, \delta)$).

Sei nun $x \in C^1([0, \infty); \mathbb{R}^n)$ eine Lösung von $x'(t) = f(t, x(t))$ mit $|x(t_1)| < \delta$ für ein $t_1 \geq 0$. Dann folgt $L(x(t_1)) < m(\varepsilon)$ und damit

$$\frac{d}{dt} L(x(t)) = \langle \nabla L(x(t)), x'(t) \rangle = \langle \nabla L(x(t)), f(x(t)) \rangle \leq 0$$

nach Eigenschaft (ii). Damit folgt $L(x(t)) < m(\varepsilon)$ ($t \geq t_1$).

Falls $|x(t)| \geq \varepsilon$ für ein $t > t_1$ gilt, so existiert (Stetigkeit) ein $t_2 \geq t_1$ mit $|x(t_2)| = \varepsilon$. Damit ist aber $L(x(t_2)) \geq m(\varepsilon)$, Widerspruch. Also gilt $|x(t)| < \varepsilon$ für alle $t \geq t_1$, d.h. die Nulllösung ist stabil. \square

4.11 Bemerkung. a) Die Schwierigkeit in der Anwendung dieses Satzes liegt darin, eine Lyapunov-Funktion zu finden. Auch bei partiellen Dgl. ist derselbe Ansatz möglich, aber dort ist es noch schwerer, eine Lyapunov-Funktion zu konstruieren. Manchmal hilft ein physikalischer Zugang (Energie).

b) Falls in Definition 4.9 (ii) sogar

$$\langle \nabla L(x), f(x) \rangle < 0 \quad (x \in \mathbb{R}^n),$$

so spricht man von einer strengen Lyapunov-Funktion, und man kann die asymptotische Stabilität beweisen.

b) Phasenportraits

4.12 Definition. Sei x maximale Lösung der Dgl. $x' = f(t, x)$ im Intervall (a, b) . Dann heißt $\xi \in X$ Grenzpunkt von x bezüglich $t \rightarrow b$, falls gilt:

$$\exists (t_n)_n, t_n \uparrow b : \lim_{n \rightarrow \infty} x(t_n) = \xi.$$

Analog können wir einen Grenzpunkt in a finden. Die Menge M_b aller Grenzpunkte (in b) heißt ω -Limesmenge bezüglich $t \uparrow b$. Analog definieren wir die α -Limesmenge M_a für $t \downarrow a$. Dabei sind $a = -\infty$, $b = \infty$ möglich.

Betrachte die autonome Dgl.

$$x' = v(x), \quad x \in \mathbb{R}^2, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad x(0) = x^0.$$

Periodische Lösungen entsprechen einem geschlossenen Orbit. Eindeutigkeit impliziert $x(t + T_p) = x(t)$ (für alle $t \geq 0$). Wir zitieren ohne Beweis:

4.13 Satz (Poincaré & Bendixson). *Sei K eine kompakte Menge im \mathbb{R}^2 und x eine Lösung von $x' = v(x)$, $x(0) = x^0$ mit $x(t) \in K$ für alle $t \geq 0$. K enthalte keine singulären Punkte von v . Dann ist die ω -Limesmenge M_∞ ein periodischer Orbit und $\gamma(x^0) = M_\infty$ oder $x(t)$ strebt spiralförmig dagegen.*

4.14 Beispiel. Betrachte die Dgl.

$$y'' + (y^2 + 2(y')^2 - 1)y' + y = 0,$$

$$x := \begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} \Rightarrow x' = v(x) = \begin{pmatrix} x_2 \\ -x_1 + x_2(1 - x_1^2 - 2x_2^2) \end{pmatrix}.$$

Singuläre Punkte des Vektorfeldes: $v(x) = 0 \Leftrightarrow x_2 = 0 = x_1$. Sei x eine lokale Lösung der Dgl. Dann folgt

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{2} |x|^2 = x_1 x_1' + x_2 x_2' = (1 - x_1^2 - 2x_2^2) x_2^2.$$

Nun ist

$$1 - x_1^2 - 2x_2^2 \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 0 \end{cases} \quad \text{falls} \quad \begin{cases} 2|x|^2 < 1 \\ |x|^2 > 1 \end{cases},$$

d.h.:

$$\sqrt{\frac{1}{2}} < |x(0)| < 1 \Rightarrow \forall t \geq 0 : \sqrt{\frac{1}{2}} \leq |x(t)| \leq 1.$$

Beweis: Sei $|x(0)| < 1$, und $t_1 := \inf\{t \geq 0 : |x(t)| = 1\}$. Annahme: In $(t_1, t_1 + \varepsilon) : |x(t)| > 1$. Dann folgt für $t \in (t_1, t_1 + \varepsilon)$:

$$\frac{d}{dt} |x(t)|^2 = |x(t_1)|^2 + \underbrace{\int_{t_1}^t \frac{d}{dt} |x(s)|^2 ds}_{\leq 0} \leq |x(t_1)|^2,$$

Widerspruch. Analog mit $t_2 := \inf\{t \geq 0 : |x(t)|^2 = \frac{1}{2}\}$. Jetzt kann man Satz 4.13 mit $K := \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \frac{1}{2} \leq |x|^2 \leq 1\}$ anwenden.

Im folgenden werden einige Phasenportraits von Dgl. skizziert.

(i)

$$y'' = y - y^3.$$

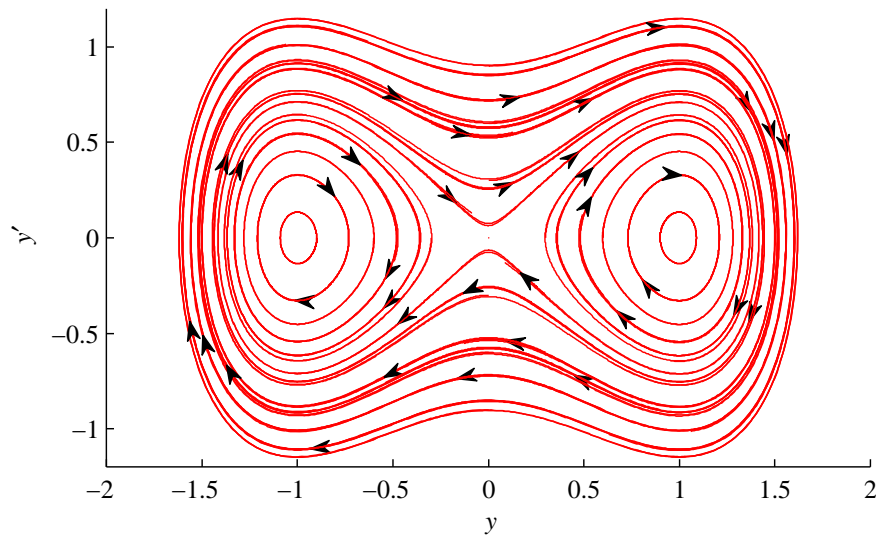


Abbildung 15: Phasenportrait von Beispiel (i)

(ii)

$$x_1(t) = r(t) \cdot \cos t, \quad x_2(t) = r(t) \cdot \sin t$$

mit

$$r' = r(r - 1) =: f(r), \quad r(0) = r_0$$

$$r_0 = 0: \quad r \equiv 0, \quad r_0 = 1: \quad r \equiv 1.$$

Ist $0 < r_0 < 1$ so ist für alle t : $r(t) \leq 1$. Ist $r_0 > 1$, so gilt $r(t) > 1$. Durch Separation der Variablen ergibt sich:

$$r(t) = \frac{1}{1 - \frac{r_0 - 1}{r_0} e^t}, \quad (r_0 \neq 0, 1).$$

(iii)

$$(a) \quad y'' + y = 0 \quad \text{lineares Pendel,}$$

$$(b) \quad y'' + \sin y = 0 \quad \text{nichtlineares Pendel.}$$

(iv) *Räuber-Beute-Modell*

$$x' = \begin{pmatrix} (a - bx_2 - mx_1)x_1 \\ (-d + cx_1 - nx_2)x_2 \end{pmatrix}.$$

(a) $a = 6, b = c = d = m = n = 1,$

$$x^4 = \begin{pmatrix} 3, 5 \\ 2, 5 \end{pmatrix}, \quad \text{stabil, falls } ac > md.$$

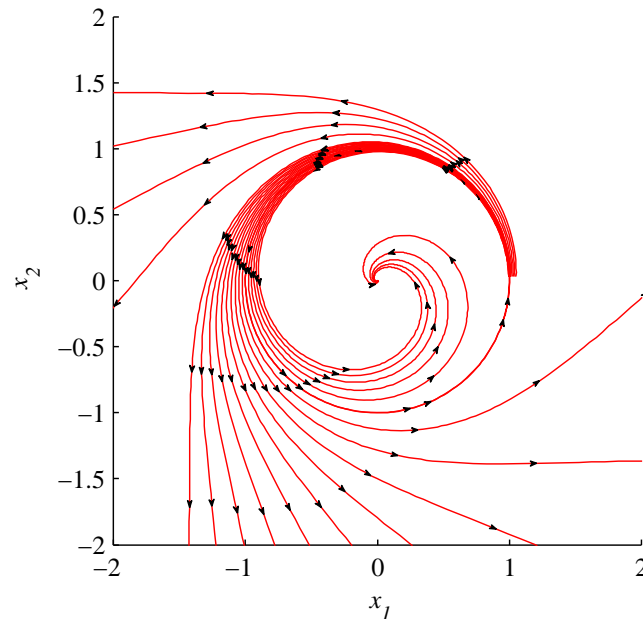


Abbildung 16: Phasenportrait von Beispiel (ii)

(b) $a = b = c = d = 1$, $m = n = 10^{-2}$,

$$x(0) = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 2,4 \end{pmatrix}, \quad x^4 \approx \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

(v)

$$y'' + (y^2 + 2(y')^2 - 1)y' + y = 0,$$

$$x = \begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix}, \quad x(0) \in \left\{ \begin{pmatrix} 0,01 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1,2 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

(vi) *Lorenz-Attraktor*

$$x = (x_1, x_2, x_3), \quad \sigma = 10, \quad r = 28, \quad b = \frac{8}{3}.$$

$$x' = \begin{pmatrix} \sigma(-x_1 + x_2) \\ rx_1 - x_2 - x_1x_3 \\ -bx_3 + x_1x_2 \end{pmatrix}.$$

Dies ist ein Modell (Approximation) einer von unten erwärmten Flüssigkeit in einem Zylinder.

x_1 : Rotationsgeschwindigkeit des Zylinders,

x_2 : Temperaturdifferenz an gegenüberliegenden Zylinderseiten,

x_3 : Abweichung vom linearen Temperaturgradienten.

Singuläre Punkte:

$$0 = (0, 0, 0), \quad C^{(\prime)} := ((-)\sqrt{b(r-1)}, (-)\sqrt{b(r-1)}, r-1).$$

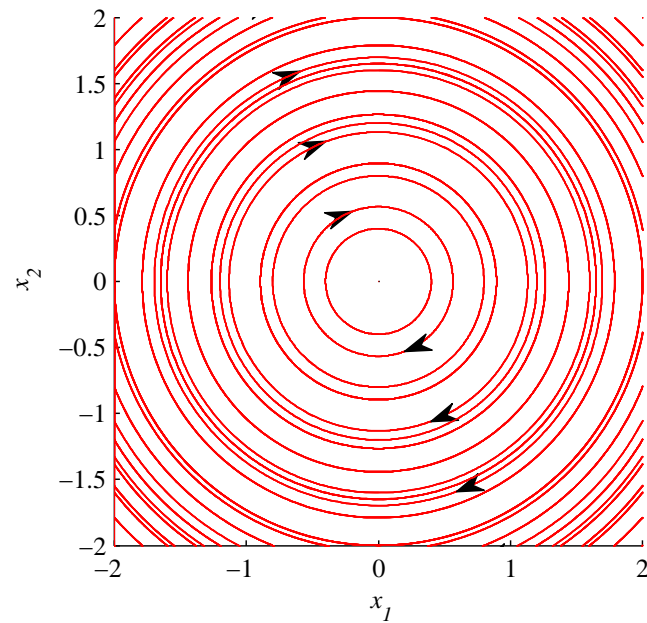


Abbildung 17: Phasenportrait von Beispiel (iii) (a), lineares Pendel

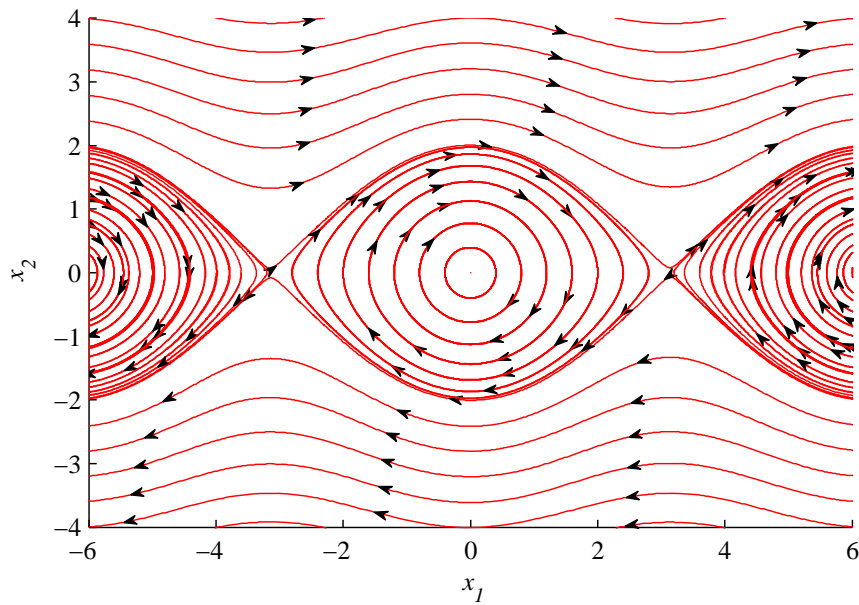


Abbildung 18: Phasenportrait von Beispiel (iii) (b), nichtlineares Pendel

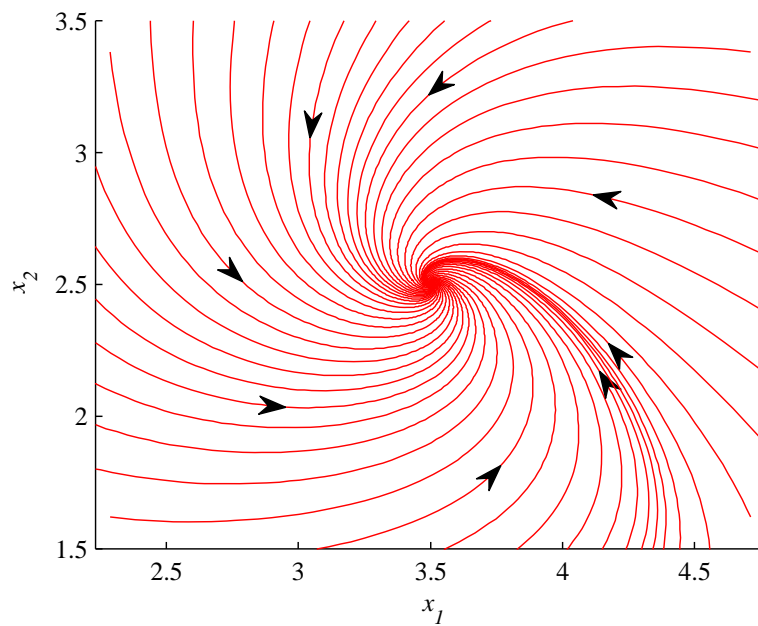


Abbildung 19: Das Räuber-Beute-Modell, Beispiel (iv) (a)

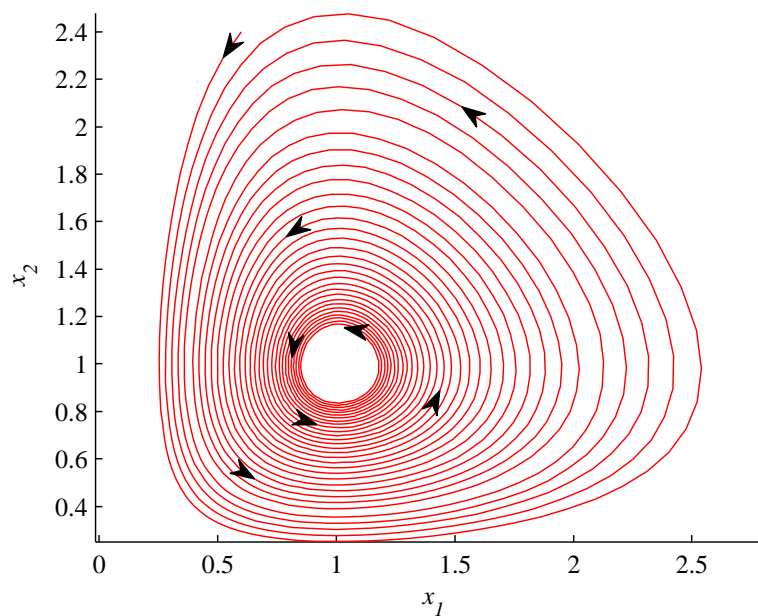


Abbildung 20: Das Räuber-Beute-Modell, Beispiel (iv) (b)

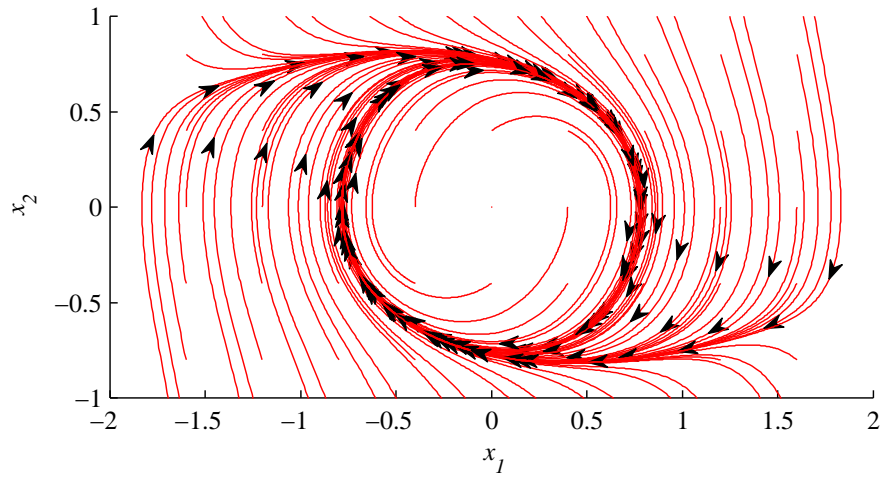


Abbildung 21: Phasenportrait von Beispiel (v)

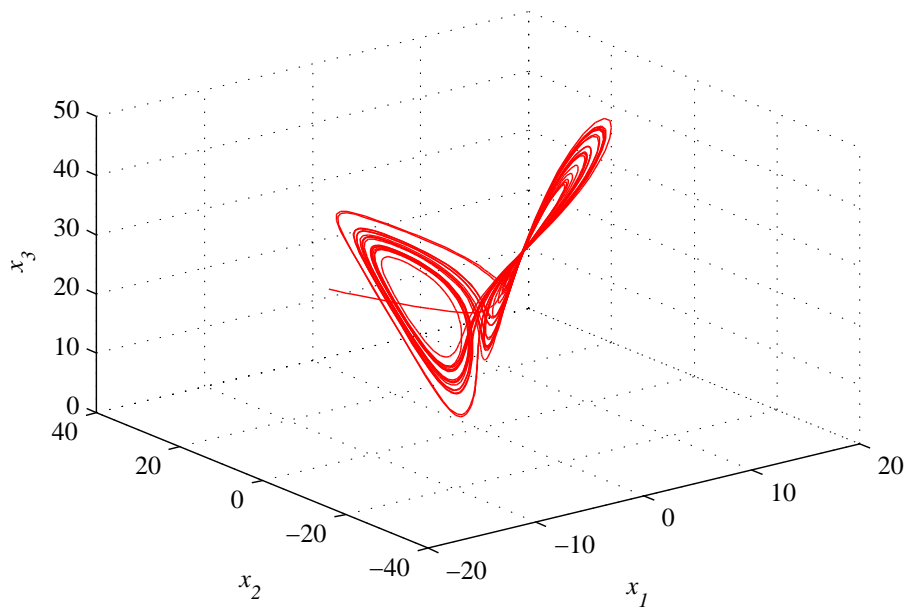


Abbildung 22: Der Lorenz-Attraktor

5. Rand- und Eigenwertprobleme

5.1 Worum geht's? Die Schwingung einer Saite führt zur partiellen Differentialgleichung

$$\partial_t^2 u(t, x) - \partial_x^2 u(t, x) = 0,$$

wobei t die Zeit und $x \in [0, L]$ den Ort auf der Saite der Länge L beschreibt. Die Lösung $u(t, x)$ ist dann die Auslenkung an der Stelle x zur Zeit t . Eine natürliche Bedingung ist die, dass die Saite am Rand fest eingespannt ist:

$$u(t, 0) = u(t, L) = 0.$$

Wir geben noch die Auslenkung und die Geschwindigkeit zur Zeit $t = 0$ vor:

$$u(0, x) = u_0(x), \quad \partial_t u(0, x) = u_1(x).$$

Macht man den Ansatz $u(t, x) = a(t)v(x)$, so erhält man aus der Dgl. $a''(t)v(x) - a(t)v''(x) = 0$ und damit

$$\frac{v''(x)}{v(x)} = \frac{a''(t)}{a(t)} =: -\lambda$$

mit einer Konstanten $\lambda \in \mathbb{R}$. Für die Funktion v , welche jetzt nur noch von x abhängt, erhalten wir eine gewöhnliche Dgl.:

$$v''(x) + \lambda v(x) = 0, \quad v(0) = 0, \quad v(L) = 0.$$

Im Vergleich zu bisher behandelten Dgl. unterscheidet sich diese in zwei Punkten:

- Es ist nicht der Wert und die erste Ableitung an einer Stelle vorgegeben (AWP), sondern der Wert der Lösung an zwei verschiedenen Stellen (Randwertproblem, RWP).
- In der Gleichung taucht ein unbekannter Parameter λ auf, es handelt sich um eine sogenannte Eigenwertaufgabe.

Um derartige Probleme geht es in diesem Abschnitt. Die erste Frage ist wieder die nach der eindeutigen Lösbarkeit eines Randwertproblems. Jetzt stellt sich allerdings heraus, dass das RWP nicht in jedem Fall eindeutig lösbar ist. Es gibt die Fälle, in denen keine Lösung existiert, es kann aber auch unendlich viele Lösungen geben. Wenn aber eindeutige Lösbarkeit gegeben ist, kann man die Lösung mit Hilfe der Greenschen Funktion berechnen.

Wir werden später sehen, dass das zugehörige Eigenwertproblem nur für bestimmte Werte von λ eine nichttriviale Lösung besitzt. Tatsächlich kann man von diesen Eigenwerten und zugehörigen Eigenfunktionen noch mehr sagen, ja sogar beliebige Funktionen nach diesen Eigenfunktionen in Reihen entwickeln, ähnlich der Theorie der Fourier-Reihen.

a) Randwertaufgaben für lineare Dgl.-Systeme

Betrachte das Randwertproblem

$$y'(t) = F(t)y(t) + g(t) \quad (t \in \mathbb{R}), \quad (5-1)$$

$$Ay(a) + By(b) = c. \quad (5-2)$$

Hier seien $a < b$, $F \in C([a, b], \mathbb{C}^{n \times n})$, $g \in C([a, b]; \mathbb{C}^n)$, $A, B \in \mathbb{C}^{n \times n}$ und $c \in \mathbb{C}^n$. Im folgenden sei $Y \in C^1([a, b]; \mathbb{C}^{n \times n})$ eine Fundamentalmatrix des homogenen Systems, d.h.

$$Y'(t) = F(t)Y(t) \quad (t \in \mathbb{R}).$$

Dann erhält man durch Variation der Konstanten eine spezielle Lösung des inhomogenen Systems durch

$$y_0(t) := Y(t) \left(\int_a^t Y(s)^{-1} g(s) ds \right).$$

Die allgemeine Lösung hat die Form

$$y(t) = y_0(t) + Y(t)d$$

mit $d \in \mathbb{C}^n$.

5.2 Satz. Das Randwertproblem (5-1)–(5-2) ist genau dann für beliebiges g und c eindeutig lösbar, wenn die charakteristische Matrix

$$C_Y := AY(a) + BY(b)$$

invertierbar ist. Dies ist äquivalent dazu, dass das zugehörige homogene Randwertproblem

$$y'(t) = F(t)y(t), \quad Ay(a) + By(b) = 0$$

nur die triviale Lösung $y = 0$ besitzt.

Beweis. Wir setzen die allgemeine Lösung in die Randbedingung ein und erhalten wegen $y_0(a) = 0$ die Bedingung

$$(AY(a) + BY(b))d + By_0(b) = c.$$

Dies ist genau dann eindeutig nach d auflösbar, falls $\det C_Y \neq 0$. □

5.3 Bemerkung. Seien Y und Z zwei verschiedene Fundamentalmatrizen der Dgl. (5-1). Da das zu (5-1) gehörige Anfangswertproblem eindeutig lösbar ist, gilt $Z(t) = Y(t)S$ mit der invertierbaren Matrix $S := Y(a)^{-1}Z(a)$. Für die charakteristischen Matrizen erhalten wir

$$C_Z = AZ(a) + BZ(b) = C_Y S.$$

Also ist C_Z genau dann invertierbar, falls C_Y dies ist.

Der folgende Satz liefert eine Darstellung der Lösung des Randwertproblems mit homogenen Randbedingungen

$$y'(t) = F(t)y(t) + g(t), \quad Ay(a) + By(b) = 0. \quad (5-3)$$

5.4 Satz. Sei C_Y invertierbar. Dann existiert eine matrixwertige Abbildung $G: [a, b] \times [a, b] \rightarrow \mathbb{C}^{n \times n}$ (die Greensche Matrix) mit folgenden Eigenschaften:

(i) Die Einschränkung von G auf die Bereiche $\{(t, s) : a \leq t < s \leq b\}$ und $\{(t, s) : a \leq s \leq t \leq b\}$ ist jeweils stetig.

(ii) $G(t+0, t) - G(t-0, t) = I_n$ für $a < t < b$.

(iii) Für jedes $g \in C([a, b]; \mathbb{C}^k)$ ist durch

$$y(t) := \int_a^b G(t, s)g(s)ds$$

die Lösung des Randwertproblems (5-3) gegeben.

Beweis. Die eindeutige Lösung des Randwertproblems ergibt sich mit obigen Bezeichnungen als $y(t) = y_0(t) + Y(t)d$ mit $d := -C_Y^{-1}By_0(b)$. Wir setzen die Darstellung von y_0 ein und erhalten

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_a^t Y(t)Y(s)^{-1}g(s)ds - Y(t)C_Y^{-1}B \int_a^b Y(b)Y(s)^{-1}g(s)ds \\ &= \int_a^b G(t, s)g(s)ds \end{aligned}$$

mit

$$G(t, s) := \begin{cases} Y(t)[I_n - C_Y^{-1}BY(b)]Y(s)^{-1}, & a \leq s \leq t \leq b, \\ -Y(t)C_Y^{-1}BY(b)Y(s)^{-1}, & a \leq t < s \leq b. \end{cases}$$

Die Gleichung (ii) folgt sofort durch Einsetzen. \square

5.5 Bemerkung. Aus der Definition von C_Y erhalten wir

$$I_n - C_Y^{-1}BY(b) = C_Y^{-1}AY(a)$$

und damit eine symmetrische Darstellung der Greenschen Matrix:

$$G(t, s) = \begin{cases} Y(t)C_Y^{-1}AY(a)Y(s)^{-1}, & a \leq s \leq t \leq b, \\ -Y(t)C_Y^{-1}BY(b)Y(s)^{-1}, & a \leq t < s \leq b. \end{cases}$$

Da sich die Lösung des Randwertproblems durch Integration über $G(t, \cdot)$ ergibt, spielen die Werte von G auf der Diagonalen $\Delta := \{(t, t) : t \in [a, b]\}$ keine Rolle.

5.6 Lemma. Die Greensche Matrix ist durch die folgenden vier Eigenschaften eindeutig bestimmt:

- (i) G ist auf $[a, b]^2 \setminus \Delta$ stetig.
- (ii) Es gilt $G(t+0, t) - G(t-0, t) = I_n$ ($a < t < b$).
- (iii) Für jedes feste $s \in [a, b]$ löst $G(\cdot, s)$ die homogene Matrix-Dgl. $\partial_t G(t, s) = F(t)G(t, s)$ ($t \in [a, b] \setminus \{s\}$).
- (iv) Für jedes feste $s \in (a, b)$ erfüllt $G(\cdot, s)$ die homogenen Randbedingungen $AG(a, s) + BG(b, s) = 0$.

Beweis. Dass die Greensche Matrix die Eigenschaften (i) und (ii) besitzt, ist klar nach Satz 5.4. Nach Bemerkung 5.5 ist in jedem der beiden Dreiecke $\{(t, s) : t < s\}$ und $\{(t, s) : t > s\}$ die Greensche Matrix $G(t, s)$ für festes s von der Form $Y(t)S$ mit einer Matrix S und löst daher die Matrix-Dgl. in (iii).

Für festes s ist

$$\begin{aligned} AG(a, s) + BG(b, t) &= A[-Y(a)C_Y^{-1}BY(b)Y(s)^{-1}] + B[Y(b)C_Y^{-1}AY(a)Y(s)^{-1}] \\ &= [-AY(a)C_Y^{-1}BY(b) + BY(b)C_Y^{-1}AY(a)]Y(s)^{-1} \\ &= [-AY(a)C_Y^{-1}(C_Y - AY(a)) + (C_Y - AY(a))C_Y^{-1}AY(a)]Y(s)^{-1} \\ &= 0, \end{aligned}$$

wobei $BY(b) = C_Y - AY(a)$ verwendet wurde. Also gilt (iv).

Sei nun \tilde{G} eine weitere Abbildung mit den Eigenschaften (i)-(iv). Dann ist $H := G - \tilde{G}$ wegen (i) stetig ergänzbar auf $[a, b]^2$, und H erfüllt für festes s die Dgl. $\partial_t H(t, s) = F(t)H(t, s)$ in $[a, b] \setminus \{s\}$ und damit, da H stetig ist, im ganzen Intervall $[a, b]$. Nach (iv) erfüllt $H(\cdot, s)$ die homogenen Randbedingungen. Somit ist $H(\cdot, s)$ eine Lösung des homogenen Randwertproblems und damit (da die Lösung eindeutig ist) gleich Null. \square

b) Randwertprobleme für lineare Dgl. höherer Ordnung

Nun betrachten wir lineare Dgl. k -ter Ordnung:

$$f_0(t)x^{(n)}(t) + f_1(t)x^{(n-1)}(t) + \cdots + f_n(t)x(t) = \gamma(t), \quad (5-4)$$

wobei wieder $a < b$ und $f_0, \dots, f_k, \gamma \in C([a, b]; \mathbb{C})$ mit $f_0(t) \neq 0$ ($t \in [a, b]$) sei. Diesmal haben wir n lineare Randbedingungen der Form

$$R_i x := \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x^{(j-1)}(a) + \beta_{ij} x^{(j-1)}(b) = \gamma_i \quad (i = 1, \dots, n). \quad (5-5)$$

Hier sind $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_i \in \mathbb{C}$ für $i, j = 1, \dots, n$. Zur einfacheren Notation definieren wir die Randoperatoren $R_i: C^n([a, b]; \mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}$ für $i = 1, \dots, n$ durch

$$R_i x := \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x^{(j-1)}(a) + \beta_{ij} x^{(j-1)}(b).$$

Damit lässt sich die Randbedingung (5-5) schreiben als $R_i x = \gamma_i$ ($i = 1, \dots, n$).

Man kann (5-4) normieren durch die Wahl von

$$\tilde{f}_j := \frac{f_j}{f_0} \quad (j = 0, \dots, n), \quad \tilde{\gamma} := \frac{\gamma}{f_0}.$$

Wie üblich setzen wir

$$y(t) := \begin{pmatrix} x(t) \\ x'(t) \\ \vdots \\ x^{(k-1)}(t) \end{pmatrix}$$

und entsprechend

$$F(x) := \begin{pmatrix} 0 & 1 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 0 & 1 \\ -\tilde{f}_n(t) & -\tilde{f}_{n-1}(t) & \dots & \dots & -\tilde{f}_1(t) \end{pmatrix}, \quad g(t) := \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \tilde{\gamma}(t) \end{pmatrix}.$$

Mit $A := (\alpha_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$, $B := (\beta_{ij})_{i,j}$, $c := (\gamma_i)_{i=1,\dots,n}$ ist das Randwertproblem (5-4)–(5-5) äquivalent zum Randwertproblem

$$y'(t) = F(t)y(t) + g(t), \quad Ay(a) + By(b) = c.$$

Im folgenden Satz ist wieder $\Delta := \{(t, t) : t \in [a, b]\}$.

5.7 Satz. *Das homogene Randwertproblem (5-4)–(5-5) mit $\gamma = 0$ und $\gamma_i = 0$ ($i = 1, \dots, n$) besitze nur die triviale Lösung $y = 0$. Dann existiert eine Funktion $G: [a, b] \times [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$, welche in $[a, b]^2 \setminus \Delta$ stetig ist und für welche durch*

$$x(t) := \int_a^b G(t, s) \gamma(s) ds \quad (t \in [a, b])$$

die Lösung der Dgl. (5-4) mit homogenen Randbedingungen $R_i x = 0$ ($i = 1, \dots, n$) gegeben ist. Die Funktion G heißt Greensche Funktion des Randwertproblems.

Beweis. Für das äquivalente System erster Ordnung bedeutet die eindeutige Lösbarkeit des homogenen Randwertproblems $\det C_Y \neq 0$, damit erhalten wir die eindeutige Lösbarkeit von (5-4)–(5-5).

Sei $\tilde{G}: [a, b]^2 \rightarrow \mathbb{C}^{n \times n}$ die Greensche Matrix aus Satz 5.4. Nach Eigenschaft (iii) in Satz 5.4 ist

$$y(t) := \int_a^b \tilde{G}(t, s)g(s)ds$$

die Lösung der Randwertaufgabe mit homogenen Randbedingungen. Die Lösung des skalaren Problems (5-4) mit homogenen Randbedingungen ist gegeben als die erste Komponente des Vektors y , also durch $x(t) := e_1^t y(t)$. Die ersten $n-1$ Komponenten des Vektors g verschwinden, also gilt

$$x(t) = \int_a^b e_1^t \tilde{G}(t, s)g(s)ds = \int_a^b G(t, s)\gamma(s)ds,$$

wenn man $G(t, s)$ durch

$$G(t, s) := \frac{e_1^t \tilde{G}(t, s)e_n}{f_0(s)}$$

definiert. □

5.8 Lemma. Die Greensche Funktion $G: [a, b] \times [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ zum Randwertproblem (5-4)–(5-5) ist durch die folgenden Eigenschaften eindeutig bestimmt:

- (i) G ist stetig, und für jedes feste $s \in [a, b]$ ist $G(\cdot, s) \in C^{n-2}([a, b]; \mathbb{C})$.
- (ii) Für jedes feste $s \in [a, b]$ ist $G(\cdot, s)$ in $[a, b] \setminus \{s\}$ n -mal stetig differenzierbar mit

$$\frac{\partial^{n-1}}{\partial t^{n-1}} G(t+0, t) - \frac{\partial^{n-1}}{\partial t^{n-1}} G(t-0, t) = \frac{1}{f_0(t)} \quad (t \in (a, b)).$$

- (iii) Für jedes feste $s \in [a, b]$ löst $G(\cdot, s)$ die homogene Dgl. (5-4) in $[a, b] \setminus \{s\}$.
- (iv) Für jedes feste $s \in [a, b]$ erfüllt $G(\cdot, s)$ die homogenen Randbedingungen (5-5).

Beweis. Wir wissen aus dem Beweis von Satz 5.7, dass die Greensche Funktion durch

$$G(t, s) := \frac{e_1^t \tilde{G}(t, s)e_n}{f_0(s)}$$

gegeben ist. Um die Eigenschaften (i)–(iv) nachzurechnen, setzen wir die Darstellung

$$\tilde{G}(t, s) = \begin{cases} Y(t)C_Y^{-1}AY(a)Y(s)^{-1}, & a \leq s \leq t \leq b, \\ -Y(t)C_Y^{-1}BY(b)Y(s)^{-1}, & a \leq t < s \leq b. \end{cases}$$

aus Bemerkung 5.5 ein. Für festes s ist also jede Spalte von $\tilde{G}(t, s)$ eine Kombination der Spalten von $Y(t)$. Da in $Y(t)$ die j -te Zeile die Ableitung der $(j - 1)$ -ten Zeile ist, gilt dies auch für $\tilde{G}(t, s)$. Wir erhalten

$$\frac{\partial^j}{\partial t^j} e_1^t \tilde{G}(t, s) = e_{j+1}^t \tilde{G}(t, s) \quad (j = 1, \dots, n - 2).$$

Die letzte Spalte von $\tilde{G}(t, s)$ ist also nach Definition von $G(t, s)$ gegeben durch

$$\frac{1}{f_0(s)} \tilde{G}(t, s) e_n = \begin{pmatrix} G(t, s) \\ \partial_t G(t, s) \\ \vdots \\ \partial_t^{n-1} G(t, s) \end{pmatrix}.$$

Damit folgen die Aussagen (iii) und (iv) aus den entsprechenden Aussagen von Lemma 5.6, ebenso die Differenzierbarkeitsaussagen von (i) und (ii) im Bereich $[a, b]^2 \setminus \Delta$.

Nach Lemma 5.6 gilt

$$\tilde{G}(s + 0, s) - \tilde{G}(s - 0, s) = I_n.$$

Damit ist die letzte Spalte in den ersten $n - 1$ Komponenten stetig im ganzen Intervall $[a, b]$, was (i) zeigt. Für die letzte Komponente erhalten wir aus der letzten Gleichung die Behauptung (ii). \square

c) Sturm-Liouville-Randwertaufgaben

Wir betrachten folgendes Randwertproblem zweiter Ordnung:

$$(Lx)(t) := -(p(t)x'(t))' + q(t)x(t) = r(t), \quad (5-6)$$

$$R_1 x := \alpha_{11}x(a) + \alpha_{12}x'(a) = \gamma_1,$$

$$R_2 x := \beta_{21}x(b) + \beta_{22}x'(b) = \gamma_2. \quad (5-7)$$

Dabei sind $p \in C^1([a, b]; \mathbb{C})$ mit $p(t) \neq 0$ für alle $t \in [a, b]$, $q, r \in C([a, b]; \mathbb{C})$ und $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_i \in \mathbb{C}$ mit $(\alpha_{11}, \alpha_{12}) \neq 0$ und $(\beta_{21}, \beta_{22}) \neq 0$. Ein Randwertproblem der Form (5-6)–(5-7) heißt ein Sturm-Liouville-Randwertproblem.

5.9 Satz. *Das zu (5-6)–(5-7) gehörige homogene Randwertproblem besitze nur die triviale Lösung. Dann lässt sich die Greensche Funktion des Randwertproblems in der Form*

$$G(t, s) = \begin{cases} -\frac{1}{p(a)W(a)}\varphi(t)\psi(s), & a \leq t \leq s \leq b, \\ -\frac{1}{p(a)W(a)}\varphi(s)\psi(t), & a \leq s \leq t \leq b \end{cases}$$

darstellen. Dabei sind φ und ψ Lösungen von $Lx = 0$ mit $R_1\varphi = 0$, $R_2\varphi \neq 0$ und $R_2\psi = 0$, $R_1\psi \neq 0$ und

$$W(t) := W(\varphi, \psi)(t) := \varphi(t)\psi'(t) - \varphi'(t)\psi(t)$$

die Wronski-Determinante zu $\{\varphi, \psi\}$.

Beweis. (a) Existenz von φ und ψ : Da das homogene Randwertproblem nur die triviale Lösung besitzt, ist etwa das Randwertproblem $Lu = 0$, $R_1u = 0$, $R_2u = 1$ eindeutig lösbar mit Lösung φ . Analog sieht man die Existenz von ψ .

(b) Lineare Unabhängigkeit von $\{\varphi, \psi\}$: Falls etwa $\varphi = \alpha\psi$ mit einem $\alpha \in \mathbb{C}$, so folgt $L\varphi = 0$, $R_1\varphi = 0$ und $R_2\varphi = \alpha R_2\psi = 0$ und damit $\varphi = 0$ im Widerspruch zu $R_2\varphi \neq 0$.

(c) Betrachtung der Wronski-Determinante: Wir schreiben (5-6) in ein System $y' = Ay$ erster Ordnung um und erhalten

$$y'(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{q(t)}{p(t)} & -\frac{p'(t)}{p(t)} \end{pmatrix} y(t).$$

Die Wronski-Determinante des Fundamentalsystems $\left\{ \begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \psi \\ \psi' \end{pmatrix} \right\}$ ist nach der Formel von Liouville (Satz 3.7) gegeben durch

$$\begin{aligned} W(t) &= W(a) \exp\left(\int_a^t \operatorname{tr} A(s) ds\right) = W(a) \exp\left(\int_a^t -\frac{p'(s)}{p(s)} ds\right) \\ &= W(a) \exp(-\ln p(t) + \ln p(a)) = \frac{W(a)p(a)}{p(t)}. \end{aligned}$$

Da $\{\varphi, \psi\}$ ein Fundamentalsystem ist, gilt $W(a) \neq 0$.

(d) Wir prüfen die Eigenschaften (i)–(iv) aus Lemma 5.8 nach. Die Stetigkeit (i) ist klar. Für (ii) schreiben wir

$$\begin{aligned} \partial_t G(t+0, t) - \partial_t G(t-0, t) &= -\frac{1}{p(a)W(a)} (\varphi(t)\psi'(t) - \varphi'(t)\psi(t)) \\ &= -\frac{1}{p(a)W(a)} W(t) = -\frac{1}{p(t)}. \end{aligned}$$

Dabei wurde im letzten Schritt (c) verwendet.

Sei $s \in [a, b]$ fest. Für $t < s$ ist

$$[LG(\cdot, s)](t) = -\frac{\psi(s)}{p(a)W(a)} (L\varphi)(t) = 0,$$

analog $LG(\cdot, s) = 0$ für $t > s$. Dies zeigt (iii). Für die Randterme gilt

$$R_1G(\cdot, s) = -\frac{1}{p(a)W(a)}\psi(s)R_1\varphi = 0$$

und ebenso $R_2G(\cdot, s) = 0$. Somit gilt (iv). Nach Lemma 5.8 ist G also die Greensche Funktion zu (5-6)–(5-7). \square

5.10 Bemerkung. a) In der Situation von Satz 5.9 gilt $G(t, s) = G(s, t)$ (Symmetrie der Greenschen Funktion).

b) Nach Bemerkung 5.3 ist das Randwertproblem (5-6)–(5-7) genau dann eindeutig lösbar, falls für ein Fundamentalsystem $\{\varphi_1, \varphi_2\}$ von (5-6) gilt

$$\det\left(\left(R_i\varphi_j\right)_{i,j=1,2}\right) = \det\begin{pmatrix} R_1\varphi_1 & R_1\varphi_2 \\ R_2\varphi_1 & R_2\varphi_2 \end{pmatrix} \neq 0.$$

In diesem Fall gilt dies für alle Fundamentalsysteme.

5.11 Beispiel. Betrachte für einen reellen Parameter $k \geq 0$

$$(Lx)(t) := -x''(t) - k^2x(t) = \gamma(t) \quad (t \in [0, 1])$$

mit den Randbedingungen

$$R_1x := x(0) = 0, \quad R_2x := x(1) = 0.$$

Hier ist $p = 1$ und $q = -k^2$. Ein Fundamentalsystem von $Lx = 0$ ist gegeben durch $\varphi_1 = \sin kt$, $\varphi_2 = \cos kt$. Dafür gilt

$$\det\begin{pmatrix} R_1\varphi_1 & R_1\varphi_2 \\ R_2\varphi_1 & R_2\varphi_2 \end{pmatrix} = \det\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \sin k & \cos k \end{pmatrix} = -\sin k \neq 0,$$

falls $k \notin \pi\mathbb{Z}$.

Sei also $k \notin \pi\mathbb{Z}$, d.h. das Randwertproblem eindeutig lösbar. Um die Greensche Matrix zu berechnen, bestimmen wir φ und ψ aus Satz 5.9. Eine Lösung von $Lx = 0$ mit der Randbedingung $R_1x = 0$ ist $\varphi(t) := \sin kt$. Eine Lösung von $Lx = 0$ mit der Randbedingung $R_2x = 0$ ist $\psi(t) := \sin k(1 - t)$. Die Wronski-Determinante an der Stelle $a = 0$ ist

$$W(0) = \varphi(0)\psi'(0) - \varphi'(0)\psi(0) = 0 \cdot (-k \cos k) - k \sin k = -k \sin k \neq 0.$$

Nach Satz 5.9 ist die Greensche Funktion gegeben durch

$$G(t, s) = \frac{1}{k \sin k} \sin(kt) \sin(k(1 - s)) \quad (0 \leq t \leq s \leq 1)$$

und durch $G(t, s) = G(s, t)$ für $0 \leq s \leq t \leq 1$.

Die Lösung des Randwertproblems $Lx = \gamma$, $R_1x = R_2x = 0$ für $\gamma \in C([0, 1]; \mathbb{C})$ ist also gegeben durch

$$(Lx)(t) = \int_0^t G(t, s)\gamma(s)ds$$

mit obiger Greenscher Funktion G .

d) Selbstadjungierte Eigenwertaufgaben

Wir betrachten wieder ein Sturm-Liouville-Randwertproblem, diesmal aber mit einem (unbekannten) Eigenwertparameter $\lambda \in \mathbb{C}$:

$$(Lx)(t) := -\frac{1}{r(t)} \left[(p(t)x'(t))' - q(t)x(t) \right] = \lambda x(t), \quad (5-8)$$

$$R_1x := \alpha_{11}x(a) + \alpha_{12}x'(a) = \gamma_1,$$

$$R_2x := \beta_{21}x(b) + \beta_{22}x'(b) = \gamma_2. \quad (5-9)$$

Dabei sind jetzt die Koeffizienten reellwertig, d.h. $p \in C^1([a, b]; \mathbb{R})$ mit $p(t) \neq 0$ für alle $t \in [a, b]$, $q, r \in C([a, b]; \mathbb{R})$ und $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_i \in \mathbb{R}$ mit $(\alpha_{11}, \alpha_{12}) \neq 0$ und $(\beta_{21}, \beta_{22}) \neq 0$. Zusätzlich gelte noch

$$r(t) > 0 \quad (t \in [a, b]).$$

5.12 Definition. a) Der zum Eigenwertproblem (5-8)–(5-9) gehörige lineare Operator A ist definiert als Abbildung $A: D(A) \rightarrow C([a, b]; \mathbb{C})$ mit Definitionsbereich

$$D(A) := \{x \in C^2([a, b]; \mathbb{C}) : R_1x = R_2x = 0\} \subset C([a, b]; \mathbb{C})$$

durch

$$Ax := Lx \quad (x \in D(A)).$$

b) Ein Eigenwert von A ist eine Zahl $\lambda \in \mathbb{C}$, für welche ein $u \in D(A) \setminus \{0\}$ existiert mit $Au = \lambda u$. In diesem Fall heißt u eine Eigenfunktion von A .

c) Das zum Eigenwertproblem (5-8)–(5-9) zugehörige Skalarprodukt ist definiert als

$$\langle u, v \rangle := \int_a^b r(t)u(t)\overline{v(t)}dt \quad (u, v \in C([a, b]; \mathbb{C})).$$

Die Norm ist definiert durch $\|u\| := \sqrt{\langle u, u \rangle}$.

Im folgenden bezeichne $\langle \cdot, \cdot \rangle$ und $\|\cdot\|$ stets das oben definierte Skalarprodukt bzw. die oben definierte Norm. Dass es sich tatsächlich um ein Skalarprodukt und damit um eine Norm handelt, sieht man sofort wie in der Analysis I.

5.13 Bemerkung. a) Das Randwertproblem $Au = \lambda u$ hat immer die triviale Lösung $u = 0$. Die Eigenwerte sind also genau diejenigen λ , in denen keine eindeutige Lösbarkeit gegeben ist. Sei $\{\varphi_1, \varphi_2\}$ ein Fundamentalsystem der Dgl. $Lu - \lambda u = 0$, $\varphi_j = \varphi_j(t, \lambda)$. Dann existiert genau dann eine Eigenfunktion $x = c_1\varphi_1 + c_2\varphi_2$, falls

$$\sum_{j=1}^2 c_j R_i[\varphi_j(\cdot, \lambda)] = 0 \quad (i = 1, 2)$$

eine nichttriviale Lösung besitzt. Dies ist äquivalent zur Bedingung

$$\Delta(\lambda) := \det \begin{pmatrix} R_1[\varphi_1(\cdot, \lambda)] & R_1[\varphi_2(\cdot, \lambda)] \\ R_2[\varphi_1(\cdot, \lambda)] & R_2[\varphi_2(\cdot, \lambda)] \end{pmatrix} = 0.$$

b) Nach Satz 5.9 ist die Greensche Funktion reellwertig.

5.14 Satz. a) Der Operator A ist symmetrisch, d.h. es gilt

$$\langle Au, v \rangle = \langle u, Av \rangle \quad (u, v \in D(A)).$$

b) Alle Eigenwerte von A sind reell. Die zugehörigen Eigenfunktionen können reell gewählt werden.

c) Die Eigenfunktionen u_1, u_2 zu verschiedenen Eigenwerten $\lambda_1 \neq \lambda_2$ sind orthogonal, d.h. es gilt $\langle u_1, u_2 \rangle = 0$.

Beweis. a) Für $u, v \in D(A)$ gilt mit partieller Integration

$$\begin{aligned} \langle Au, v \rangle &= \int_a^b [(-p(t)u'(t))' + q(t)u(t)] \overline{v(t)} dt \\ &= -p(t)u'(t)\overline{v(t)} \Big|_{t=a}^b + \int_a^b ([p(t)u'(t)]\overline{v'(t)} + q(t)u(t)\overline{v(t)}) dt \end{aligned}$$

Die gleiche Rechnung für $\langle u, Av \rangle$ zeigt

$$\langle Au, v \rangle - \langle u, Av \rangle = p(t)[u(t)\overline{v'(t)} - u'(t)\overline{v(t)}] \Big|_{t=a}^b.$$

Da sowohl u als auch v die homogenen Randbedingungen $R_i x = 0$ erfüllen, folgt

$$[u(t)\overline{v'(t)} - u'(t)\overline{v(t)}] \Big|_{t=a}^b = 0. \quad (5-10)$$

Zum Beispiel gelten im Fall $\alpha_{11} \neq 0$ und $\beta_{21} \neq 0$ mit geeigneten Konstanten $c_1, c_2 \in \mathbb{C}$ die Gleichheiten

$$u(a) = c_1 u'(a),$$

$$\begin{aligned}v(a) &= c_1 v'(a), \\u(b) &= c_2 u'(b), \\v(b) &= c_2 v'(b).\end{aligned}$$

Eingesetzt erhält man (5-10).

b) Das folgt wie in der Linearen Algebra: Sei $u \in D(A) \setminus \{0\}$ und $Au = \lambda u$. Dann gilt

$$\lambda \|u\|^2 = \langle \lambda u, u \rangle = \langle Au, u \rangle = \langle u, Au \rangle = \bar{\lambda} \|u\|^2$$

und damit $\lambda = \bar{\lambda}$.

Da alle Koeffizienten der Dgl. $Lu - \lambda u = 0$ und die Randbedingungen reell sind, ist mit einer Eigenfunktion u auch $\operatorname{Re} u$ und $\operatorname{Im} u$ eine Lösung. Daher existieren stets reellwertige Eigenfunktionen.

c) Seien $u_1, u_2 \in D(A) \setminus \{0\}$ mit $Au_i = \lambda_i u_i$, wobei $\lambda_1 \neq \lambda_2$. Dann gilt

$$\lambda_1 \langle u_1, u_2 \rangle = \langle Au_1, u_2 \rangle = \langle u_1, Au_2 \rangle = \lambda_2 \langle u_1, u_2 \rangle.$$

Dabei wurde $\lambda_i \in \mathbb{R}$ verwendet. Wegen $\lambda_1 \neq \lambda_2$ folgt $\langle u_1, u_2 \rangle = 0$. \square

Wir wollen im folgenden die Eigenwerte von A näher untersuchen. Dazu betrachten wir die Eigenwerte von A^{-1} .

5.15 Lemma. *Das homogene Randwertproblem $Lx = 0$, $R_i x = 0$ besitze nur die triviale Lösung (d.h. $\lambda = 0$ ist kein Eigenwert von A). Sei G die zugehörige Greensche Funktion.*

a) *Der Operator $A: D(A) \rightarrow C([a, b]; \mathbb{C})$ ist bijektiv, d.h. der inverse Operator $M := A^{-1}: C([a, b]; \mathbb{C}) \rightarrow C([a, b]; \mathbb{C})$ ist wohldefiniert.*

b) *Es gilt $(Mf)(t) = \int_a^b r(s)G(t, s)f(s)ds$ für $f \in C([a, b]; \mathbb{C})$.*

c) *Der Operator M ist symmetrisch.*

d) *Eine Zahl $\mu \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ ist genau dann Eigenwert von M , falls $\frac{1}{\mu}$ Eigenwert von A ist.*

e) *Für alle $f \in C([a, b]; \mathbb{C})$ ist $\langle Mf, f \rangle \in \mathbb{R}$.*

Beweis. Das folgt alles direkt aus den Definitionen bzw. durch einfaches Nachrechnen. \square

Man beachte in obigem Lemma, dass der inverse Operator M zunächst als Abbildung $M: C([a, b]; \mathbb{C}) \rightarrow D(A)$ definiert ist. Da aber $D(A)$ ein linearer Teilraum von $C([a, b]; \mathbb{C})$ ist, betrachtet man M meist als Abbildung von $C([a, b]; \mathbb{C})$ nach $C([a, b]; \mathbb{C})$ (die dann natürlich nicht surjektiv ist). Der Vorteil dieser Sichtweise liegt darin, dass $C([a, b]; \mathbb{C})$ ein normierter Raum und sogar ein Banachraum ist.

5.16 Lemma. Falls 0 kein Eigenwert von A ist, so gilt:

a) Es existiert ein $f \in C([a, b]; \mathbb{C})$ mit $\langle Mf, f \rangle \neq 0$.

b) Für die Operatornorm $\|M\| := \sup_{f \neq 0} \frac{\|Mf\|}{\|f\|}$ gilt

$$\|M\| = \sup_{\|f\|=1} |\langle Mf, f \rangle|.$$

Beweis. Da M symmetrisch ist, gilt für alle $f, g \in C([a, b], \mathbb{C})$:

$$\langle M(f \pm g), f \pm g \rangle = \langle Mf, f \rangle \pm 2 \operatorname{Re}(\langle Mf, g \rangle) + \langle Mg, g \rangle. \quad (5-11)$$

a) Falls $\langle Mf, f \rangle = 0$ für alle $f \in C([a, b], \mathbb{C})$ gilt, so folgt

$$2 \operatorname{Re}(\langle Mf, g \rangle) = \langle M(f + g), f + g \rangle = 0 \quad (f, g \in C([a, b]; \mathbb{C})).$$

Setzt man $g = Mf$, so erhält man $\|Mf\| = 0$ für alle f und damit $M = 0$, Widerspruch.

b) Mit Cauchy-Schwarz und Definition der Operatornorm gilt

$$c := \sup_{\|f\|=1} |\langle Mf, f \rangle| \leq \sup_{\|f\|=1} \|Mf\| \cdot \|f\| = \|M\|.$$

Wir müssen noch die umgekehrte Abschätzung zeigen. Aus (5-11) erhalten wir

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\langle Mf, g \rangle) &= \frac{1}{4} [\langle M(f + g), f + g \rangle - \langle M(f - g), f - g \rangle] \\ &\leq \frac{c}{4} [\|f + g\|^2 + \|f - g\|^2] \\ &= \frac{c}{4} [2\|f\|^2 + 2\|g\|^2]. \end{aligned}$$

Sei $f \in C([a, b]; \mathbb{C})$ mit $\|f\| = 1$. Wähle $g := \frac{Mf}{\|Mf\|}$ und erhalte aus obiger Abschätzung $\|Mf\| \leq c$. \square

Der nächste Satz ist wichtig in vielen Bereichen der Analysis.

5.17 Satz (von Arzelá-Ascoli). Sei $K \subset \mathbb{R}^n$ kompakt, und sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset C(K; \mathbb{R}^m)$ eine Folge von Funktionen. Die Folge $(f_n)_n$ sei gleichgradig stetig, d.h. es gelte

$$\forall x \in K \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall y \in K, |x - y| < \delta \forall n \in \mathbb{N} : |f_n(x) - f_n(y)| < \varepsilon,$$

und (gleichmäßig) beschränkt, d.h. es gelte

$$\exists C > 0 \forall x \in K \forall n \in \mathbb{N} : |f_n(x)| \leq C.$$

Dann gibt es eine konvergente Teilfolge $(\tilde{f}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von $(f_n)_n$ und ein $f \in C(K; \mathbb{R}^m)$ mit

$$\|\tilde{f}_n - f\|_\infty \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty).$$

Beweis. (i) Wir zeigen, dass die Folge $(f_n)_n$ gleichmäßig gleichgradig stetig ist, d.h. dass gilt

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x, y \in K, |x - y| < \delta \forall n \in \mathbb{N} : |f_n(x) - f_n(y)| < \varepsilon. \quad (5-12)$$

Falls dies nicht gilt, existiert ein $\varepsilon > 0$ mit

$$\forall \delta > 0 \exists x, y, |x - y| < \delta, \exists n : |f_n(x) - f_n(y)| \geq \varepsilon. \quad (5-13)$$

Zu $\delta := \frac{1}{k}$ existieren also x_k, y_k mit $|x_k - y_k| < \frac{1}{k}$ und n_k mit

$$|f_{n_k}(x_k) - f_{n_k}(y_k)| \geq \varepsilon.$$

Da K kompakt ist, existiert nach dem Satz von Bolzano-Weierstraß eine konvergente Teilfolge $x_k \rightarrow x$ von $(x_k)_k$. Wegen $|x_k - y_k| < \frac{1}{k}$ gilt auch $y_k \rightarrow x$. Damit erhalten wir

$$|f_{n_k}(x_k) - f_{n_k}(y_k)| \leq |f_{n_k}(x_k) - f_{n_k}(x)| + |f_{n_k}(x) - f_{n_k}(y_k)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon,$$

falls k hinreichend groß ist. Dies ist aber ein Widerspruch zu (5-13).

(ii) Konstruktion einer punktweise konvergenten Teilfolge: Sei $Y = \{y_1, y_2, \dots\}$ eine dichte abzählbare Teilmenge von K und $f_{n,0} := f_n$. Sei $f_{n,1}$ eine Teilfolge von $f_{n,0}$, für welche $(f_{n,1}(y_1)) \subset \mathbb{R}^m$ konvergent ist. (Beachte hier, dass $(f_n)_n$ gleichmäßig beschränkt ist und wende den Satz von Bolzano-Weierstraß an.)

Wähle eine Teilfolge $(f_{n,2})_n$ von $(f_{n,1})$, welche (zusätzlich) an der Stelle y_2 konvergent ist etc.

Man erhält iterativ eine Teilfolge $(g_n)_{n \in \mathbb{N}} := (f_{n,n-1})_{n \in \mathbb{N}}$, welche an jeder Stelle y_n konvergiert.

(iii) Nachweis der gleichmäßigen Konvergenz von g in K : Sei $\varepsilon > 0$. Nach (i) existiert ein $\delta(\varepsilon) > 0$ mit

$$\forall x, y \in K, |x - y| < \delta \forall n \in \mathbb{N} : |g_n(x) - g_n(y)| < \frac{\varepsilon}{3}. \quad (5-14)$$

Da Y dicht in K ist, existiert eine endliche Teilmenge $Z = \{z_1, \dots, z_M\} \subset Y$ mit

$$\forall x \in K \exists z_j \in Z : |x - z_j| < \delta(\varepsilon). \quad (5-15)$$

Nach (ii) konvergiert die Folge $(g_n)_n$ punktweise und ist daher eine Cauchyfolge, d.h. zu jedem $z_j \in Z$ existiert ein $N_j \in \mathbb{N}$ mit

$$|g_n(z_j) - g_m(z_j)| < \frac{\varepsilon}{3} \quad (n, m \geq N_j). \quad (5-16)$$

Für $N := \max\{N_1, \dots, N_M\}$ gilt dann

$$\forall z \in Z \forall n, k \geq N : |g_n(z) - g_k(z)| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

Sei nun $x \in K$ beliebig. Zu x wähle nach $z_j \in Z$ aus (5-15). Dann gilt für alle $n, k \geq N$

$$\begin{aligned} |g_n(x) - g_m(x)| &\leq |g_n(x) - g_n(z_j)| + |g_n(z_j) - g_m(z_j)| + |g_m(z_j) - g_m(x)| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon. \end{aligned}$$

Hier wurden (5-16) und (5-14) verwendet. Da N nicht von $x \in K$ abhängt, ist $(g_n)_n \subset C(K; \mathbb{R}^m)$ eine gleichmäßige Cauchyfolge und damit gleichmäßig konvergent. \square

5.18 Satz. *In der Situation von Lemma 5.15 gilt: Der Operator $M : C([a, b]; \mathbb{C}) \rightarrow C([a, b]; \mathbb{C})$ ist kompakt, d.h. falls $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset C([a, b]; \mathbb{C})$ eine (bzgl. $\|\cdot\|_\infty$) beschränkte Folge ist, so besitzt $(Mf_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset C([a, b]; \mathbb{C})$ eine konvergente Teilfolge.*

Beweis. Man rechnet die Voraussetzungen des Satzes von Arzelá-Ascoli nach.

(i) $(Mf_n)_n$ ist gleichmäßig beschränkt, denn

$$\begin{aligned} |Mf_n(t)| &= \left| \int_a^b r(s)G(t, s)f_n(s)ds \right| \\ &\leq \max_{t, s \in [a, b]} |G(t, s)| \cdot \|f_n\|_\infty \cdot \int_a^b r(s)ds. \end{aligned}$$

(ii) $(Mf_n)_n$ ist gleichgradig stetig: Sei $\varepsilon > 0$. Da G stetig ist, existiert ein $\delta > 0$ mit

$$\forall t_1, t_2 \in [a, b], |t_1 - t_2| < \delta \forall s \in [a, b] : |G(t_1, s) - G(t_2, s)| < \varepsilon.$$

Für $|t_1 - t_2| < \delta$ erhalten wir

$$\begin{aligned} |Mf_n(t_1) - Mf_n(t_2)| &\leq \int_a^b r(s)|G(t_1, s) - G(t_2, s)| \cdot |f_n(s)|ds \\ &\leq \varepsilon \|f_n\|_\infty \int_a^b r(s)ds. \end{aligned}$$

\square

Eine der zentralen Ziele bei der Betrachtung von Differentialgleichungen ist eine genaue Kenntnis der Eigenwerte. Dies wird z.B. in Entwicklungssätzen (siehe unten) benötigt. Obwohl die Kompaktheit aus Satz 5.18 recht abstrakt wirkt, ist sie die entscheidende Eigenschaft, die es ermöglicht, genauere Aussagen über das Spektrum zu treffen.

5.19 Satz. *Der Operator M besitzt einen Eigenwert $\mu \in \mathbb{R}$ mit $|\mu| = \|M\|$.*

Beweis. Nach Lemma 5.16 b) existiert eine Folge $f_n \in C([a, b]; \mathbb{C})$ mit $\|f_n\| = 1$ und $|\langle Mf_n, f_n \rangle| \rightarrow \|M\|$. Da $\langle Mf_n, f_n \rangle \in \mathbb{R}$, gibt es unendlich viele $n \in \mathbb{N}$ mit $\langle Mf_n, f_n \rangle > 0$ oder unendlich viele $n \in \mathbb{N}$ mit $\langle Mf_n, f_n \rangle < 0$.

Sei nun o.E. $\langle Mf_n, f_n \rangle > 0$ für alle n , d.h. $\langle Mf_n, f_n \rangle \rightarrow \|M\|$. Da M kompakt ist, können wir $(f_n)_n$ so wählen, dass $(Mf_n)_n$ konvergiert. Es gilt

$$\begin{aligned} \left\| Mf_n - \|M\|f_n \right\|^2 &= \|Mf_n\|^2 - 2\|M\| \cdot \langle Mf_n, f_n \rangle + \|M\|^2 \|f_n\|^2 \\ &\leq 2\|M\|^2 - 2\|M\| \langle Mf_n, f_n \rangle \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty). \end{aligned}$$

Da $(Mf_n)_n$ konvergent ist, existiert daher auch $f := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$, und es gilt

$$Mf = M \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} Mf_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \|M\|f_n = \|M\|f.$$

Also ist $\|M\|$ ein Eigenwert von M .

Falls für unendlich viele $n \in \mathbb{N}$ gilt $\langle Mf_n, f_n \rangle < 0$, erhält man analog, dass $-\|M\|$ ein Eigenwert von M ist. \square

5.20 Bemerkung. a) Nach Lemma 5.16 ist $\mu_1 := \pm\|M\|$ der betragsgrößte Eigenwert von M . Wir haben also mit Satz 5.19 eine Eigenfunktion u_1 von M gefunden, d.h. $Mu_1 = \mu_1 u_1$. Wegen $Mu_1 \in D(A)$ ist u_1 auch eine Eigenfunktion von A zum Eigenwert $\lambda_1 := \frac{1}{\mu_1}$.

b) Das Verfahren von Satz 5.19 kann nun fortgesetzt werden: Betrachte für $n \in \mathbb{N}$ sukzessive

$$c_n := \sup\{|\langle Mf, f \rangle| : \|f\| = 1, \langle f, u_1 \rangle = \dots = \langle f, u_{n-1} \rangle = 0\}.$$

Dann kann man leicht zeigen: Es existiert ein Eigenwert μ_n von M mit $|\mu_n| = c_n$. Betrachte dazu die Einschränkung von M auf

$$E_n := \{f \in C([a, b]; \mathbb{C}) : \langle f, u_1 \rangle = \dots = \langle f, u_{n-1} \rangle = 0\} \subset C([a, b]; \mathbb{C}).$$

Es gilt $M|_{E_n} : E_n \rightarrow E_n$, $M|_{E_n}$ ist symmetrisch und kompakt. Nur diese Eigenschaften gingen in den Beweis von Satz 5.19 ein. Die Anwendung von Satz 5.19 auf $M|_{E_n}$ ergibt also einen Eigenwert μ_n von $M|_{E_n}$, der auch Eigenwert von M ist.

Insgesamt erhalten wir also eine Folge $(\mu_n)_n \subset \mathbb{R}$ von Eigenwerten von M mit $|\mu_1| \geq |\mu_2| \geq \dots$ und zugehörige Eigenfunktionen $(u_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset C([a, b]; \mathbb{C})$ von M . Damit sind $\lambda_n := \frac{1}{\mu_n}$ Eigenwerte des Operators A und u_n die zugehörigen Eigenfunktionen. Wir können $\|u_n\| = 1$ annehmen und erhalten dann nach Satz 5.14 $\langle u_n, u_m \rangle = \delta_{nm}$.

5.21 Satz. Sei $|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq \dots$ die oben konstruierte Folge von Eigenwerten von A . Dann gilt

$$|\lambda_n| \rightarrow \infty \quad (n \rightarrow \infty),$$

insbesondere besitzt A unendlich viele Eigenwerte, und die Folge $(\lambda_n)_{n \in \mathbb{N}}$ besitzt keinen (endlichen) Häufungspunkt. Jeder Eigenwert von A ist in obiger Folge enthalten.

Beweis. (i) Da $C([a, b]; \mathbb{C})$ unendlich-dimensional ist, ist $E_n \neq \{0\}$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Da $M = A^{-1}$ injektiv ist, ist $M|_{E_n} \neq 0$, und es existiert ein zugehöriger Eigenwert μ_n . Also ist die Folge $(\lambda_n)_n$ unendlich.

(ii) Wir setzen

$$G_n(t, s) := \sum_{j=1}^n \frac{u_j(t)u_j(s)}{\lambda_j}.$$

Dann gilt für jedes feste $t \in [a, b]$:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \|G(t, \cdot) - G_n(t, \cdot)\|^2 \\ &= \|G(t, \cdot)\|^2 - 2 \operatorname{Re} \langle G(t, \cdot), G_n(t, \cdot) \rangle + \|G_n(t, \cdot)\|^2 \end{aligned}$$

Wir müssen das obige Skalarprodukt genauer ansehen und verwenden dazu

$$\frac{u_j}{\lambda_j} = Mu_j = \int_a^b r(s)G(t, s)u_j(s)ds = \langle G(t, \cdot), u_j \rangle$$

Damit ergibt sich

$$\begin{aligned} \langle G(t, \cdot), G_n(t, \cdot) \rangle &= \left\langle G(t, \cdot), \sum_{j=1}^n \frac{u_j(t)u_j(\cdot)}{\lambda_j} \right\rangle = \sum_{j=1}^n \frac{u_j(t)}{\lambda_j} \langle G(t, \cdot), u_j \rangle \\ &= \sum_{j=1}^n \frac{u_j^2(t)}{\lambda_j^2}. \end{aligned}$$

Mit $\langle u_j, u_k \rangle = \delta_{jk}$ erhalten wir

$$\begin{aligned} \|G_n(t, \cdot)\|^2 &= \sum_{j,k=1}^n \frac{1}{\lambda_j \lambda_k} \langle u_j(t)u_j(\cdot), u_k(t)u_k(\cdot) \rangle \\ &= \sum_{j,k=1}^n \frac{u_j(t)u_k(t)}{\lambda_j \lambda_k} \langle u_j, u_k \rangle \\ &= \sum_{j=1}^n \frac{u_j^2(t)}{\lambda_j^2}. \end{aligned}$$

Oben eingesetzt, erhalten wir

$$\sum_{j=1}^n \frac{u_j^2(t)}{\lambda_j^2} \leq \|G(t, \cdot)\|^2. \quad (5-17)$$

Wir multiplizieren beide Seiten mit $r(t)$ und integrieren über $[a, b]$:

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j^2} \leq \int_a^b \int_a^b r(t)r(s)G(t,s)^2 ds dt < \infty. \quad (5-18)$$

Somit ist die Reihe auf der linken Seite konvergent. Insbesondere folgt $|\lambda_j| \rightarrow \infty$ ($j \rightarrow \infty$).

(iii) Sei λ ein Eigenwert von A mit $\lambda \neq \lambda_j$ für alle $j \in \mathbb{N}$ und u eine zugehörige Eigenfunktion mit $\|u\| = 1$. Dann ist $\mu := \frac{1}{\lambda}$ ein Eigenwert von M , und wegen $\langle u, u_n \rangle = 0$ folgt nach Definition von μ_n

$$\mu = \langle Mu, u \rangle \leq \sup_{f \in E_n, \|f\|=1} |\langle Mf, f \rangle| = |\mu_n| \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty).$$

Aber $\mu = \frac{1}{\lambda} \neq 0$, Widerspruch. □

5.22 Definition (Verallgemeinerte Fourier-Reihe). Sei 0 kein Eigenwert von A , und seien $(\lambda_n)_{n \in \mathbb{N}}$ bzw. $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ die Eigenwerte bzw. Eigenfunktionen von A mit $\langle u_n, u_m \rangle = \delta_{nm}$. Für eine Funktion $f \in D(A)$ heißt

$$f_n := \langle f, u_n \rangle$$

der n -te verallgemeinerte Fourier-Koeffizient von f , und die Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \langle f, u_n \rangle u_n$$

die verallgemeinerte Fourier-Reihe von f .

5.23 Satz (Entwicklung nach Eigenfunktionen). In der Situation von Definition 5.22 gilt

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \langle f, u_n \rangle u_n(t),$$

wobei die Reihe absolut und gleichmäßig konvergiert.

Beweis. Sei $h := Af$, d.h. $f = Mh$. Für $h_n := \langle h, u_n \rangle$ gilt dann

$$f_n := \langle f, u_n \rangle = \langle Mh, u_n \rangle = \langle h, Mu_n \rangle = \frac{1}{\lambda_n} \langle h, u_n \rangle = \frac{h_n}{\lambda_n}.$$

Mit der Cauchy-Schwarz-Ungleichung erhalten wir für $N, M \in \mathbb{N}$, $N \geq M$:

$$\left(\sum_{n=M}^N |f_n u_n(x)| \right)^2 \leq \left(\sum_{n=M}^N |h_n|^2 \right) \left(\sum_{n=M}^N \frac{u_n^2(x)}{\lambda_n^2} \right).$$

Nach (5-17) gilt

$$\sum_{n=M}^N \frac{u_n^2(x)}{\lambda_n^2} \leq \|G(t, \cdot)\|^2 \leq \text{const}.$$

Nach der Besselschen Ungleichung gilt

$$\sum_{n=1}^{\infty} |h_n|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |\langle h, u_n \rangle|^2 \leq \|h\|^2,$$

somit ist die Reihe $\sum_n |h_n|^2$ konvergent. Damit ist $\sum_{n=1}^{\infty} f_n u_n(x)$ gleichmäßig und absolut konvergent.

Für $N \in \mathbb{N}$ gilt

$$\left\| f - \sum_{n=1}^N f_n u_n \right\| = \left\| M \left(h - \sum_{n=1}^N h_n u_n \right) \right\| \leq |\mu_{N+1}| \left\| h - \sum_{n=1}^N h_n u_n \right\|.$$

Es gilt

$$\left\langle h - \sum_{n=1}^N h_n u_n, u_m \right\rangle = \langle h, u_m \rangle - \sum_{n=1}^N h_n \langle u_n, u_m \rangle = \langle h, u_m \rangle - \langle h, u_m \rangle = 0.$$

Damit folgt $h - \sum_{n=1}^N h_n u_n \in E_{N+1}$. Andererseits ist

$$\left\| h - \sum_{n=1}^N h_n u_n \right\| \leq 2\|h\| \leq \text{const}.$$

Insgesamt erhalten wir

$$\left\| f - \sum_{n=1}^N f_n u_n \right\| \rightarrow 0 \quad (N \rightarrow \infty).$$

□

5.24 Beispiel. Betrachte das Eigenwertproblem in $C([0, 1]; \mathbb{C})$

$$\begin{aligned} Lu &:= -u'' = \lambda u, \\ R_1 u &:= u(0) = 0, \\ R_2 u &:= u(1) = 0. \end{aligned}$$

Für $\lambda = 0$ ist $u_1(t) := 1$, $u_2(t) := t$ ein Fundamentalsystem von $Lu = 0$. Es gilt

$$\Delta(\lambda) = \det \begin{pmatrix} R_1 u_1 & R_1 u_2 \\ R_2 u_1 & R_2 u_2 \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = 1 \neq 0.$$

Die Voraussetzung, dass 0 kein Eigenwert von A ist, ist also erfüllt.

Für $\lambda \neq 0$ ist ein Fundamentalsystem durch $u_1(t) := \exp(\sqrt{-\lambda}t)$, $u_2(t) := \exp(-\sqrt{-\lambda}t)$ gegeben. Jetzt ist

$$\Delta(\lambda) = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \exp(\sqrt{-\lambda}) & \exp(-\sqrt{-\lambda}) \end{pmatrix} = \exp(-\sqrt{-\lambda}) - \exp(\sqrt{-\lambda}).$$

Dies ist genau dann 0, wenn $\exp(-2\sqrt{-\lambda}) = 1$, also für $-2\sqrt{-\lambda} = 2k\pi i$ mit $k \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$. Die Eigenwerte von A sind also gegeben durch

$$\lambda = \lambda_k := k^2\pi^2 (k \in \mathbb{N}).$$

Die zugehörigen normierten Eigenfunktionen sind

$$u_k(t) := d_k \sin(k\pi t) \quad (k \in \mathbb{N}),$$

wobei die Konstante d_k so zu wählen ist, dass $\|u_k\| = 1$.

Aus Satz 5.23 erhalten wir also: Sei $f \in D(A)$, d.h. $f \in C^1([0, 1]; \mathbb{C})$ mit $f(0) = f(1) = 0$. Dann lässt sich f in eine Reihe von Eigenfunktionen entwickeln:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k \sin(k\pi t),$$

wobei

$$f_k := \langle f, u_k \rangle = \text{const} \int_0^1 f(t) \sin(k\pi t) dt.$$

Dies ist ein Spezialfall der komplexen Fourier-Reihen aus Analysis I: Da $f(0) = 0$, können wir f als ungerade Funktion auf das Intervall $[-1, 1]$ fortsetzen. Die komplexe Fourier-Reihe von f enthält dann nur ungerade Terme, also Sinus-Terme.

Das letzte Beispiel ist nur eines von vielen. Die Entwicklung nach Satz 5.23 ist viel allgemeiner, z.B. lassen sich auch Entwicklungen nach orthogonalen Polynomen (etwa Hermite-Polynome, Legendre-Polynome, siehe Abschnitt 2 c)) damit beweisen.

Literatur

- [Am] Amann, H.: Gewöhnliche Differentialgleichungen. De Gruyter, Berlin 1983.
- [Ar] Arnold, V. I.: Gewöhnliche Differentialgleichungen. Springer Berlin 2001.
- [Br] Braun, M.: Differentialgleichungen und ihre Anwendungen. Springer, Berlin 1979.
- [FH] Forst, W., Hoffmann, D.: Gewöhnliche Differentialgleichungen - Theorie und Praxis. Springer Berlin 2005.
- [Fo] Forster, O.: Analysis 2. Vieweg-Verlag 1979.
- [Heu] Heuser, H.: Gewöhnliche Differentialgleichungen. 3. Aufl., Teubner Stuttgart 1995.
- [PW] Prüss, J., Wilke, M.: Gewöhnliche Differentialgleichungen und dynamische Systeme. Birkhäuser Basel 2010.
- [Wa] Walter W.: Gewöhnliche Differentialgleichungen. 7. Aufl., Springer Berlin 2000.