

# Analysis II

Sebastian Baader

Frühlingssemester 2021

## Über diese Vorlesung

Diese Vorlesung besteht aus drei Teilen, die in das Studium von Funktionen in mehreren reellen Variablen einführen soll. Der ganze Inhalt dieser Vorlesung (und mehr) ist in [1] zu finden, konkret in den Kapiteln XIV, XV für gewöhnliche Differentialgleichungen, XX für die Differentialrechnung, und XXI, XXIV für Gradientenfelder und Differentialformen.

Im Kapitel I geht es um “gewöhnliche Differentialgleichungen”. Wir studieren dort Kurven  $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ , deren Ableitung durch die Position  $\gamma(t)$  bestimmt ist. Wir werden Vektorfelder einführen um das präziser zu formulieren, und diese dann untersuchen. Im Kapitel II geht es um differenzierbare Ableitungen  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  (was sich von Kurven dadurch unterscheidet, dass auch der Definitionsbereich dieser Funktionen mehrdimensional sein darf). Dieses Kapitel wird den grössten Teil dieser Vorlesung formen. Im Kapitel III lernen wir Gradientenfelder und Differentialformen kennen. Dort studieren wir Abbildungen  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . Die leitende Frage in diesem Kapitel wird sein, welche Vektorfelder  $X: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  Gradientenfelder sind.

## Über dieses Dokument

Das ist eine Mitschrift der Vorlesung “Analysis 2” von Prof. Dr. Sebastian Baader im Frühlingssemester 2021. Du darfst sie so verwenden, wie sie dir am meisten beim Verständnis des Materials hilft. Verantwortlich dafür was hier drin steht ist Levi Ryffel. Denke daran dass der Dozent dieses Dokument nicht schreibt (und vielleicht auch nicht liest). Ihn trifft keine Verantwortung, falls Unsinn steht.

## Dein Beitrag zu den Notizen

Diese Vorlesungsnotizen werden in Echtzeit während der Vorlesung mitgeschrieben und werden deshalb viele Probleme enthalten. Damit sind allerlei Missgeschicke gemeint wie zum Beispiel Symbolverwechslungen, unpräzise Aussagen und Argumente, alternative Rechtschreibung und Grammatik, oder unattraktives Layout. Falls dir so etwas auffällt, auch wenn es dich nicht stark stört, und auch wenn du es als etwas subjektiv empfindest, poste doch auf

<https://github.com/raw-bacon/ana2-notes>,

ein “Issue”, oder sende eine E-Mail an [levi.ryffel@math.unibe.ch](mailto:levi.ryffel@math.unibe.ch). Auf demselben Weg kannst du Wünsche und Verbesserungsvorschläge zu dieser Mitschrift anbringen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Gewöhnliche Differentialgleichungen</b>	<b>3</b>
1	Normen auf reellen Vektorräumen . . . . .	3
2	Stetigkeit . . . . .	7
3	Banachs Fixpunktsatz . . . . .	12
<b>II</b>	<b>Differentialrechnung</b>	<b>15</b>
<b>III</b>	<b>Gradientenfelder und Differentialformen</b>	<b>16</b>

# Kapitel I

## Gewöhnliche Differentialgleichungen

Bevor wir Differentialgleichungen studieren können, müssen wir den Raum  $\mathbb{R}^n$  besser verstehen. Wir erinnern uns nun an das Studium von Funktionen in einer Variable. Dort machen viele Definitionen vom Absolutbetrag Gebrauch.

### Beispiele.

(1) Konvergenz einer Folge  $a: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ , in Symbolen

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a(n) = \alpha \in \mathbb{R}$$

heisst folgendes. Für alle  $\varepsilon > 0$  existiert  $N \in \mathbb{N}$  so, dass für alle  $n \geq N$  gilt, dass  $|a(n) - \alpha| \leq \varepsilon$ .

(2) Stetigkeit einer Funktion  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  im Punkt  $p \in \mathbb{R}$  heisst, dass für alle  $\varepsilon > 0$  ein  $\delta > 0$  existiert, so dass für alle  $q \in \mathbb{R}$  mit  $|q - p| \leq \delta$  gilt, dass  $|f(q) - f(p)| \leq \varepsilon$ .

Beide dieser sehr zentralen Konzepte machen kritischen Gebrauch des Absolutbetrags. In  $\mathbb{R}^n$  gibt es aber keinen kanonischen Ersatz für diesen. Dies motiviert unseren ersten Abschnitt in diesem Kapitel.

## 1 Normen auf reellen Vektorräumen

Die Normaxiome greifen die wichtigsten Eigenschaften des Absolutbetrags in  $\mathbb{R}$  auf und verallgemeinern diese, so dass wir in allgemeinen reellen Vektorräumen Konzepte wie Konvergenz und Stetigkeit formalisieren können.

**Definition.** Sei  $V$  ein Vektorraum über  $\mathbb{R}$ . Eine Abbildung  $\|\cdot\|: V \rightarrow \mathbb{R}$  heisst *Norm* auf  $V$ , falls folgende Eigenschaften erfüllt werden.

- (i) (Strikte Positivität) Für alle  $v \in V$  gilt  $\|v\| \geq 0$  und  $\|v\| = 0$  genau dann, wenn  $v = 0$ .

(ii) (Homogenität) Für alle  $v \in V$  und alle  $\lambda \in \mathbb{R}$  gilt  $\|\lambda v\| = |\lambda| \cdot \|v\|$ .

(iii) (Dreiecksungleichung) Für alle  $v, w \in V$  gilt  $\|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$ .

Eigenschaft (ii) hätten wir auch folgendermassen formulieren können: Die Norm  $\|\cdot\|$  auf einen eindimensionalen Unterraum von  $V$  verhält sich (bis auf Streckung) genau so wie der Absolutbetrag auf  $\mathbb{R}$ .

**Definition.** Sei  $\|\cdot\|$  eine Norm auf einem reellen Vektorraum  $V$ . Die Menge

$$B_1 = \{v \in V \mid \|v\| \leq 1\} \subset V$$

heisst *Norm-Einheitsball*.

**Beispiele.** Sei  $V = \mathbb{R}^n$  mit Standardbasis  $e_1, \dots, e_n$ . Einen Vektor  $v \in V$  können wir dann ausdrücken durch  $v = v_1 e_1 + \dots + v_n e_n$  mit  $v_i \in \mathbb{R}$ .

(1) Die *Summennorm* ist die Norm

$$\|v\|_1 = |v_1| + \dots + |v_n|.$$

Wir prüfen nun die Normaxiome.

(i) Dank den Eigenschaften des Absolutbetrags auf  $\mathbb{R}$  haben wir sofort  $\|v\|_1 \geq 0$  und  $\|v\|_1 = 0$  genau dann, wenn alle  $v_i$  null sind.

(ii) Berechne  $\|\lambda v\|_1 = |\lambda v_1| + \dots + |\lambda v_n| = |\lambda| \cdot \|v\|_1$ .

(iii) Berechne

$$\begin{aligned} \|v + w\|_1 &= |v_1 + w_1| + \dots + |v_n + w_n| \\ &\leq |v_1| + |w_1| + \dots + |v_n| + |w_n| \\ &= \|v\|_1 + \|w\|_1. \end{aligned}$$

(2) Die *Maximumnorm* ist die Norm

$$\|v\|_\infty = \max\{|v_1|, \dots, |v_n|\}.$$

Wir prüfen wieder die Normaxiome.

(i) Wir haben  $\|v\|_\infty \geq 0$  und auch  $\|v\|_\infty = 0$  genau dann, wenn alle  $v_i$  null sind.

(ii) Es gilt  $\|\lambda v\|_\infty = \max\{|\lambda v_1|, \dots, |\lambda v_n|\} = |\lambda| \cdot \|v\|_\infty$ .

(iii) Berechne

$$\begin{aligned} \|v + w\|_\infty &= \max\{|v_1 + w_1|, \dots, |v_n + w_n|\} \\ &\leq \max\{|v_1|, \dots, |v_n|\} + \max\{|w_1|, \dots, |w_n|\} \\ &= \|v\|_\infty + \|w\|_\infty, \end{aligned}$$

da jeweils  $|v_i + w_i| \leq |v_i| + |w_i|$  gilt.

(3) die *euklidische Norm* ist die Norm

$$\|v\|_2 = \sqrt{v_1^2 + \cdots + v_n^2}.$$

Auch für diese Norm prüfen wir die Axiome.

- (i) Es gilt  $\|v\|_2 \geq 0$  und  $\|v\|_2 = 0$  genau dann, wenn  $v_1^2 + \cdots + v_n^2 = 0$  gilt, was äquivalent dazu ist, dass alle  $v_i$  null sind.
- (ii) Berechne  $\|\lambda v\|_2 = |\lambda| \cdot \|v\|_2$ , da  $\sqrt{\lambda^2} = |\lambda|$  gilt.
- (iii) Hier stoßen wir zum ersten mal auf Schwierigkeiten. Wir werden das im Lemma unten zeigen.

(4) Folgendes Beispiel rechtfertigt die Notation für obige Normen. Sei  $p \geq 1$  für  $p \geq 1$ . Die  $p$ -Norm ist

$$\|v\|_p = \sqrt[p]{|v_1|^p + \cdots + |v_n|^p}.$$

Die Dreiecksungleichung  $\|v + w\|_p \leq \|v\|_p + \|w\|_p$  heisst *Minkowski-Ungleichung*, die aus der Konkavität von  $\log$  folgt. Siehe hier Abschnitt 59.3 in [1]. Die Normen  $\|\cdot\|_1$  und  $\|\cdot\|_2$  sind Spezialfälle dieser Familie von Normen. Für alle  $p \geq 1$  gilt, dass  $\|v\|_\infty \leq \|v\|_p \leq \sqrt[p]{n} \|v\|_\infty$ . Im Grenzwert  $p \rightarrow \infty$  erhalten wir

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \|v\|_p = \|v\|_\infty$$

da  $\lim_{p \rightarrow \infty} \sqrt[p]{n} = 1$ .

Die Normbälle der ersten drei Normen im Fall  $n = 2$  sind in Abbildung I.1 zu sehen.



Abbildung I.1: Normbälle der Normen  $\|\cdot\|_1, \|\cdot\|_\infty, \|\cdot\|_2$

## Normen aus Skalarprodukten

**Definition.** Ein *Skalarprodukt* auf einem reellen Vektorraum  $V$  ist eine strikt positive, symmetrische, bilineare Abbildung  $\langle \cdot, \cdot \rangle: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ . Das heisst,

- (i) für alle  $v \in V$  gilt  $\langle v, v \rangle \geq 0$  und  $\langle v, v \rangle = 0$  genau dann, wenn  $v = 0$ ,

- (ii) für alle  $v, w \in V$  gilt  $\langle v, w \rangle = \langle w, v \rangle$ ,
- (iii) für alle  $u, v, w \in V$  und  $t \in \mathbb{R}$  gilt  $\langle u, v + tw \rangle = \langle u, v \rangle + t\langle u, w \rangle$ .

**Lemma.** Sei  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  ein Skalarprodukt auf  $V$ . Dann ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \|\cdot\|: V &\rightarrow \mathbb{R} \\ v &\mapsto \sqrt{\langle v, v \rangle} \end{aligned}$$

eine Norm auf  $V$ .

*Beweis.* Wir prüfen die Normaxiome folgendermassen.

- (i) Es gilt  $\|v\| = \sqrt{\langle v, v \rangle} \geq 0$  und  $\|v\| = 0$  genau dann, wenn  $\langle v, v \rangle = 0$ , das heisst  $v = 0$  gilt.
- (ii) Berechne  $\|\lambda v\| = \sqrt{\langle \lambda v, \lambda v \rangle} = \sqrt{\lambda^2 \cdot \langle v, v \rangle} = |\lambda| \cdot \|v\|$ .
- (iii) Seien  $v, w \in V$ . Wir wollen zeigen, dass  $\sqrt{\langle v + w, v + w \rangle} \leq \sqrt{\langle v, v \rangle} + \sqrt{\langle w, w \rangle}$ . Da Quadrieren auf  $\mathbb{R}_{\geq 0}$  monoton ist, reicht es zu zeigen, dass

$$\langle v + w, v + w \rangle \leq \langle v, v \rangle + \langle w, w \rangle + 2 \cdot \sqrt{\langle v, v \rangle} \cdot \sqrt{\langle w, w \rangle}.$$

Ausmultiplizieren der linken Seite und Subtraktion der Terme, die dann auf beiden Seiten erscheinen liefert, dass die Dreiecksungleichung für  $\|\cdot\|$  äquivalent zur *Cauchy-Schwarz Ungleichung*

$$\langle v, w \rangle \leq \sqrt{\langle v, v \rangle} \cdot \sqrt{\langle w, w \rangle}$$

ist. Wir beweisen nun diese. Betrachte dazu die Funktion  $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , die durch

$$h(t) = \langle v + tw, v + tw \rangle \geq 0$$

definiert ist. Es gilt also  $h(t) = t^2 \langle w, w \rangle + 2t \langle v, w \rangle + \langle v, v \rangle$ . Dies beschreibt eine Parabel mit Diskriminante

$$D = b^2 - 4ac = 4\langle v, w \rangle^2 - 4\langle w, w \rangle \cdot \langle v, v \rangle.$$

Aus  $h(t) \geq 0$  für alle  $t \in \mathbb{R}$  folgt, dass  $D \leq 0$  ist. Wir schliessen, dass  $\langle v, w \rangle^2 \leq \langle w, w \rangle \cdot \langle v, v \rangle$  gelten muss.  $\square$

**Beispiele.**

- (1) Sei  $V = \mathbb{R}^n$  und

$$\langle v, w \rangle = v_1 w_1 + \cdots + v_n w_n$$

das *Standardskalarprodukt*. Dann ist

$$\|v\| = \sqrt{v_1^2 + \cdots + v_n^2} = \|v\|_2$$

die euklidische Norm.

- (2) Sei  $V = C[0, 1]$  der Raum von stetigen Funktionen  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ . Das ist ein unendlichdimensionaler Vektorraum. Die Funktionen  $1, x, x^2, \dots$  sind linear unabhängig. Für  $f, g \in V$  definieren wir

$$\langle f, g \rangle = \int_0^1 f(x) \cdot g(x) dx.$$

Die Skalarproduktaxiome sind leicht zu überprüfen.

**Bemerkung.** Nicht jede Norm auf  $V$  stammt von einem Skalarprodukt. In den Übungen wird gezeigt, dass jede von einem Skalarprodukt induzierte Norm  $\|\cdot\|$  die *Parallelogrammidentität*

$$\|v + w\|^2 + \|v - w\|^2 = 2(\|v\|^2 + \|w\|^2)$$

erfüllt, und dass die Normen  $\|\cdot\|_1$  und  $\|\cdot\|_\infty$  diese nicht erfüllen.

## 2 Stetigkeit

**Definition.** Seien  $V$  und  $W$  reelle Vektorräume mit Normen  $\|\cdot\|_V$  und  $\|\cdot\|_W$ . Eine Abbildung  $f: V \rightarrow W$  heisst *stetig im Punkt*  $p \in V$ , falls für alle  $\varepsilon > 0$  ein  $\delta > 0$  existiert, so dass für alle  $q \in V$  mit  $\|q - p\|_V \leq \delta$  folgt, dass  $\|f(q) - f(p)\|_W \leq \varepsilon$ . Wir sagen, dass  $f$  *stetig* ist, falls  $f$  in allen Punkten von  $V$  stetig ist.

**Beispiel.** Im Fall  $V = W = \mathbb{R}$  und  $\|\cdot\| = |\cdot|$  erhalten wir den üblichen Stetigkeitsbegriff.

Wir untersuchen nun, wie der Stetigkeitsbegriff von den Normen auf  $V$  und  $W$  abhängt. Betrachte zunächst folgenden günstigen Fall. Sei  $V = W = \mathbb{R}$ . Sei  $\|\cdot\|$  eine Norm auf  $\mathbb{R}$ . Für alle  $x \in \mathbb{R}$  gilt dann

$$\|x\| = \|x \cdot 1\| = |x| \cdot \|1\|.$$

Sei nun  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  bezüglich der Norm  $|\cdot|$  im Punkt  $p \in \mathbb{R}$  stetig. Wir zeigen nun, dass  $f$  auch bezüglich der Norm  $\|\cdot\|$  im Punkt  $p$  stetig ist. Wähle  $\delta > 0$  so, dass für alle  $q \in \mathbb{R}$  mit  $|q - p| \leq \delta/\|1\|$  gilt, dass  $|f(q) - f(p)| \leq \varepsilon/\|1\|$ . Das geht, da  $\|1\| > 0$  aus  $1 \neq 0$  folgt. Sei nun  $q \in \mathbb{R}$  mit  $\|q - p\| \leq \delta$ . Dann gilt  $|q - p| \leq \delta/\|1\|$ . Wir schliessen, dass  $|f(q) - f(p)| \leq \varepsilon/\|1\|$ , also  $\|f(q) - f(p)\| = |f(q) - f(p)| \cdot \|1\| \leq \varepsilon$ . Insgesamt hängt also der Stetigkeitsbegriff auf  $\mathbb{R}$  nicht von der Norm auf  $\mathbb{R}$  ab.

Es gibt aber auch einen ungünstigen Fall. Sei  $\mathbb{R}^\infty$  der Raum aller Folgen  $(x_1, x_2, \dots) \in \mathbb{R}^\mathbb{N}$  für welche  $N > 0$  existiert, so dass für alle  $n \geq N$  gilt, dass  $x_n = 0$ . Betrachte auf  $\mathbb{R}^\infty$  die beiden Normen

$$\begin{aligned} \|v\|_2 &= \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots} \\ \|v\|_\infty &= \max\{|v_1|, |v_2|, \dots\}. \end{aligned}$$



Es gilt für alle  $v \in \mathbb{R}^\infty$ , dass  $\|v\|_\infty \leq \|v\|_2$ . Sei  $V = (\mathbb{R}^\infty, \|\cdot\|_2)$  und  $W = (\mathbb{R}^\infty, \|\cdot\|_\infty)$ . Die Identitätsabbildung

$$\begin{aligned}\text{Id}: \mathbb{R}^\infty &\rightarrow \mathbb{R}^\infty \\ v &\mapsto v\end{aligned}$$

kann auf vier Arten als Abbildung zwischen normierten Räumen betrachtet werden, nämlich

- $f_1: V \rightarrow V$ ,
- $f_2: W \rightarrow W$ ,
- $f_3: V \rightarrow W$ ,
- $f_4: W \rightarrow V$ .

Wir bemerken, dass  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  stetig sind, indem wir  $\delta = \varepsilon$  wählen. Aber  $f_4$  ist nicht stetig!. Betrachte dazu die Folge von Punkten  $p_n = (1/n, 1/n, \dots, 1/n, 0, \dots) \in \mathbb{R}^\infty$ , wobei das Glied  $1/n$  gerade  $n^2$  mal vorkommt. Es gilt  $\|p_n\|_\infty = 1/n$  und  $\|p_n\|_2 = 1$ . Insbesondere gilt

$$\|f_4(p_n) - f_4(0)\|_2 = \|p_n\|_2 = 1$$

und  $\|p_n\|_\infty = 1/n$ , also ist  $f_4$  im Punkt  $p = 0$  nicht stetig.

Zusammengefasst erkennen wir, dass auf  $\mathbb{R}^\infty$  das Verhältnis der Normen  $\|\cdot\|_2$  und  $\|\cdot\|_\infty$  beliebig hohe Werte annimmt. Im Sinne folgender Definition bedeutet das, dass in  $\mathbb{R}^\infty$  diese beiden normen nicht äquivalent sind.

**Definition.** Zwei Normen  $\|\cdot\|$  und  $\widetilde{\|\cdot\|}$  heißen *äquivalent*, falls es Konstanten  $0 < c \leq C$  gibt, so dass für alle  $v \in V \setminus \{0\}$  gilt, dass

$$c \leq \frac{\widetilde{\|v\|}}{\|v\|} \leq C.$$

Bildlich können wir uns die Äquivalenz von Normen so vorstellen, dass der  $\widetilde{\|\cdot\|}$ -Normball sowohl eine skalierte Version vom  $\|\cdot\|$ -Normball enthält, wie auch in einer skalierten Version vom  $\|\cdot\|$ -Normball enthalten ist.

### Beispiele.

- (1) Sei  $\|\cdot\|$  eine Norm auf  $\mathbb{R}$ . Dann gilt für alle  $x \in \mathbb{R}$ , dass  $\|x\| = \|1\| \cdot |x|$ , also sind  $\|\cdot\|$  und  $|\cdot|$  äquivalent.
- (2) Für alle  $v \in \mathbb{R}^n$  gilt, dass

$$\|v\|_\infty \leq \|v\|_2 \leq \sqrt{n} \cdot \|v\|_\infty.$$

also sind die beiden Normen  $\|\cdot\|_\infty$  und  $\|\cdot\|_2$  äquivalent auf  $\mathbb{R}^n$ .

(3) Auf  $\mathbb{R}^\infty$  sind die Normen  $\|\cdot\|_\infty$  und  $\|\cdot\|_2$  nicht äquivalent.

**Bemerkung.** Die Äquivalenz von Normen ist eine Äquivalenzrelation. Die Symmetrie und die Reflexivität sind leicht zu überprüfen. Für die Transitivität bemerke, dass aus  $a \leq x/y \leq A$  und  $b \leq y/z \leq B$  folgt, dass  $ab \leq x/z \leq AB$ .

**Theorem.** Auf  $\mathbb{R}^n$  sind alle Normen äquivalent.

*Beweis.* Es reicht zu zeigen, dass jede Norm  $\|\cdot\|$  auf  $\mathbb{R}^n$  zur euklidischen Norm  $\|\cdot\|_2$  äquivalent ist. In einem ersten Schritt zeigen wir, dass eine Konstante  $C > 0$  existiert, so dass  $\|\cdot\|/\|\cdot\|_2 \leq C$  gilt. Sei  $v = v_1 e_1 + \cdots + v_n e_n$  mit  $v_i \in \mathbb{R}$ . Schätze ab, dass

$$\begin{aligned}\|v\| &= \|v_1 e_1\| + \cdots + \|v_n e_n\| \\ &= |v_1| \cdot \|e_1\| + \cdots + |v_n| \cdot \|e_n\| \\ &\leq \|v\|_2 \cdot (\|e_1\| + \cdots + \|e_n\|).\end{aligned}$$

Wir erhalten das gewünschte Resultat, indem wir  $C = \|e_1\| + \cdots + \|e_n\|$  setzen, dann gilt nämlich  $\|v\| \leq C \cdot \|v\|_2$ .

Wir suchen nun im zweiten Schritt eine Konstante  $c > 0$ , für die  $\|\cdot\|/\|\cdot\|_2 \geq c$  gilt. Nimm widerspruchswise an, dass das Verhältnis  $\|\cdot\|/\|\cdot\|_2$  beliebig kleine Werte annimmt. Dann gibt es eine Folge von Vektoren  $v_k \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$  mit  $\|v_k\|/\|v_k\|_2 \leq 1/k$ . Für die normierten Vektoren  $w_k = v_k/\|v_k\|_2 \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$  gilt dann, dass  $\|w_k\|_2 = 1$  und  $\|w_k\| \leq 1/k$ . Somit liegen alle Koordinaten von  $w_k$  im Intervall  $[-1, 1]$ . Also existiert eine Teilfolge der  $w_k$ , so dass die erste Koordinatenfolge mit Grenzwert in  $[-1, 1]$  konvergiert. Wir iterieren dieses Verfahren  $n$ -mal, und erhalten eine Teilfolge  $w_{k_i}$  der  $w_k$ , Welche in allen Koordinaten konvergiert. Wir behaupten nun, dass  $\|w\|_2 = 1$  und  $\|w\| = 0$  gilt, was natürlich den Widerspruch  $w = 0$  impliziert. Bemerke dazu, dass für alle  $i \in \mathbb{N}$  gilt, dass

$$\begin{aligned}1 - \|w - w_{k_i}\| &= \|w_{k_i}\|_2 - \|w - w_{k_i}\|_2 \\ &\leq \|w\|_2 \\ &\leq \|w - w_{k_i}\|_2 + \|w_{k_i}\|_2 \\ &= 1 + \|w - w_{k_i}\|_2.\end{aligned}$$

Da die  $w_{k_i}$  koordinatenweise gegen  $w$  konvergieren folgt, dass

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|w - w_{k_i}\|_2 = 0$$

gilt. Schätze weiterhin ab, dass

$$\|w\| \leq \|w_{k_i}\| + \|w - w_{k_i}\|,$$

also existiert nach Schritt 1 eine Konstante  $C > 0$  so, dass  $\|w\| \leq 1/k_i + C \cdot \|w - w_{k_i}\|_2$  gilt, woraus im Grenzwert  $i \rightarrow \infty$  folgt, dass  $\|w\| = 0$  gilt.  $\square$

**Korollar 1.** Der Stetigkeitsbegriff für Abbildungen  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  hängt nicht von den Normen auf  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}^m$  ab.

Der Beweis hier lässt sich durch einfache Ajustierung der  $\delta$  und  $\varepsilon$  führen. Siehe dazu unseren Beweis für den Fakt, dass alle Normen auf  $\mathbb{R}$  zum selben Stetigkeitsbegriff führen.

## Lineare Abbildungen

**Frage.** Seien  $V, W$  normierte Vektorräume und  $A: V \rightarrow W$  linear. Ist  $A$  dann stetig?

Die Antwort ist im allgemeinen nein, was unsere Abbildung  $f_4$  oben zeigt. Wir untersuchen nun noch ein weiteres Beispiel.

**Beispiel.** Sei  $V = \mathbb{R}^\infty$  mit der Maximumsnorm  $\|\cdot\|_\infty$ . Definiere  $A: \mathbb{R}^\infty \rightarrow \mathbb{R}^\infty$  als die Lineare Erweiterung der Abbildung  $e_k \mapsto ke_k$ . Setze  $q_k = e_k/k \in \mathbb{R}^\infty$ . Es gilt, dass  $\|q_k - 0\|_\infty = \|q_k\|_\infty = 1/k$  und  $\|A(q_k) - A(0)\|_\infty = \|e_k - 0\|_\infty = 1$ . Somit ist  $A$  im Nullpunkt (und auch in allen anderen Punkten) nicht stetig.

**Definition.** Seien  $\|\cdot\|_V, \|\cdot\|_W$  Normen auf normierten Vektorräumen  $V, W$ . Sei  $A: V \rightarrow W$  linear. Die *Operatornorm* von  $A$  ist

$$\|A\|_{\text{op}} = \sup \left\{ \frac{\|Av\|_W}{\|v\|_V} \mid v \in V \setminus \{0\} \right\} \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}.$$

**Beispiele.**

(1) Betrachte die Abbildung

$$\begin{aligned} A: \mathbb{R}^\infty &\rightarrow \mathbb{R}^\infty \\ e_k &\mapsto ke_k \end{aligned}$$

auf  $\mathbb{R}^\infty$  mit der Norm  $\|\cdot\|_\infty$ . Dann gilt  $\|A\|_{\text{op}} = \infty$ .

(2) Sei  $A: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  auf  $\mathbb{R}^2$  mit der euklidischen Norm  $\|\cdot\|_2$  die Abbildung, die durch die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

gegeben ist. Bemerke folgende Eigenschaften.

(i)  $A = 0$  genau dann, wenn  $\|A\|_{\text{op}} = 0$ .

(ii) Betrachte

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

Sei  $v = (x, y)$ . Es gilt dann  $Av = (y, 0)$ , also gilt

$$\frac{\|Av\|_2}{\|v\|_2} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \leq 1.$$

Für  $x = 0$  erhalten wir 1 für diesen Quotienten, also gilt  $\|A\|_{\text{op}} = 1$ .

(iii) Betrachte die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & d \end{pmatrix}$$

für  $d \geq 1$ . Um  $\|A\|_{\text{op}}$  zu bestimmen reicht es, Vektoren der Form  $v = (1, 0)$  und  $v = (x, 1)$  zu betrachten. Es gilt  $A(1, 0) = (1, 0)$ , also ist  $\|A\|_{\text{op}} \geq 1$ . Weiter ist  $A(x, 1) = (x, d)$ . Wir schliessen, dass für  $v = (x, 1)$  gilt, dass

$$\frac{\|Av\|_2}{\|v\|_2} = \frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{\sqrt{x^2 + 1^2}} \leq d.$$

Aber  $d$  wird im Fall  $x = 0$  angenommen, also folgt  $\|A\|_{\text{op}} = d$ .

**Proposition 1.** Sei  $A: V \rightarrow W$  eine lineare Abbildung zwischen normierten Vektorräumen. Dann ist  $A$  stetig, genau dann, wenn  $\|A\|_{\text{op}} < \infty$  gilt.

*Beweis.* Seien  $p \in V$  und  $\varepsilon > 0$  vorgegeben. Setze

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\|A\|_{\text{op}} + 1}.$$

Sei nun  $q \in V$  mit  $\|q - p\|_V \leq \delta$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} \|A(q) - A(p)\|_W &= \|A(q - p)\|_W \\ &\leq \|A\|_{\text{op}} \cdot \|q - p\|_V \\ &\leq \|A\|_{\text{op}} \cdot \frac{\varepsilon}{\|A\|_{\text{op}} + 1} \\ &\leq \varepsilon. \end{aligned}$$

Somit ist  $A$  stetig im Punkt  $p \in V$ . Für die Umkehrung, siehe Serie 2.  $\square$

**Spezialfall.** Sei  $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  linear. Schätze  $\|A\|_{\text{op}}$  bezüglich der Maximumsnorm  $\|\cdot\|_{\infty}$  auf  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}^m$  wie folgt ab. Schreibe

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

als Matrix, das heisst  $A(e_i) = \sum_{j=1}^m a_{ji} e_j$ . Setze  $a = \max \{|a_{ij}| \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$ . Für  $v \in \mathbb{R}^n$  gilt dann  $\|Av\|_{\infty} \leq n \cdot a \cdot \|v\|_{\infty}$ . Insbesondere ist  $\|a\|_{\text{op}} \leq n \cdot a$  endlich. Wir schliessen, dass  $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  stetig ist.

**Korollar 2.** Lineare Abbildungen  $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  sind stetig.

*Beweis.* Wir haben soeben gezeigt, dass  $A$  bezüglich der Maximumsnorm stetig ist. Aus Korollar 1 folgt, dass  $A$  bezüglich jeder Norm stetig ist.  $\square$

### 3 Banachs Fixpunktsatz

**Motivation.** Sei  $V$  ein normierter reeller Vektorraum, und sei  $A: V \rightarrow V$  linear und *kontrahierend*, das heisst für lineare Abbildungen  $A$ , dass  $\|A\|_{\text{op}} < 1$  gilt. Wir wollen die Abbildung  $\text{Id} - A: V \rightarrow V$  wie folgt invertieren:

$$(\text{Id} - A)^{-1} = \text{Id} + A + A^2 + A^3 + \dots$$

Als Analogie dazu erinnern wir uns an den Fakt, dass für  $q \in \mathbb{R}$  mit  $|q| < 1$  gilt, dass

$$\frac{1}{1 - q} = 1 + q + q^2 + \dots$$

Für alle  $Y \in V$  suchen wir ein eindeutiges  $X \in V$  mit  $(\text{Id} - A)(X) = Y$ , also  $X - A(X) = Y$ . Definiere

$$\begin{aligned} f: V &\rightarrow V \\ X &\mapsto A(X) + Y. \end{aligned}$$

Gesucht ist also eine (offenbar eindeutige) Lösung der Fixpunktgleichung  $f(X) = X$ .

**Bemerkung.** Die Bedingung  $\|A\|_{\text{op}}$  ist stärker als die Bedingung  $\|Av\|_V < \|v\|_V$  für alle  $v \in V \setminus \{0\}$ . Betrachte dazu  $V = \mathbb{R}^\infty$  mit der Maximumnorm  $\|\cdot\|_\infty$ . Definiere  $A: \mathbb{R}^\infty \rightarrow \mathbb{R}^\infty$  als die Lineare Erweiterung der Abbildung

$$e_k \mapsto \frac{k}{k+1} e_k.$$

Wir stellen fest, dass  $\|Av\|_\infty < \|v\|_\infty$  für alle  $v \in \mathbb{R}^\infty \setminus \{0\}$  gilt, aber  $\|A\|_{\text{op}} = 1$ , da

$$\sup \left\{ \frac{k}{k+1} \mid k \in \mathbb{N} \right\} = 1$$

gilt. Somit ist  $A$  nicht kontrahierend.

Wir stossen auch auf ein Problem beim invertieren von

$$\begin{aligned} \text{Id} - A: \mathbb{R}^\infty &\rightarrow \mathbb{R}^\infty \\ e_k &\mapsto \left(1 - \frac{k}{k+1}\right) e_k = \frac{1}{k+1} e_k. \end{aligned}$$

Die inverse Abbildung

$$\begin{aligned} (\text{Id} - A)^{-1}: \mathbb{R}^\infty &\rightarrow \mathbb{R}^\infty \\ e_k &\mapsto (k+1)e_k \end{aligned}$$

ist also nicht stetig, da  $\|(\text{Id} - A)^{-1}\|_{\text{op}} = +\infty$ .

## Metrische Räume

**Definition.** Sei  $X$  eine Menge. Eine *Metrik* auf  $X$  ist eine Abbildung  $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  mit folgenden Eigenschaften.

- (i) *Positivität:* Für alle  $p, q \in X$  gilt  $d(p, q) \geq 0$ , und  $d(p, q) = 0$  genau dann, wenn  $p = q$ .
- (ii) *Symmetrie.* Für alle  $p, q \in X$  gilt  $d(q, p) = d(p, q)$ .
- (iii) *Dreiecksungleichung.* Für alle  $a, b, c \in X$  gilt  $d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$ .

### Beispiele.

- (1) Sei  $V$  ein reeller Vektorraum mit Norm  $\|\cdot\|$ . Definiere

$$\begin{aligned} d: V \times V &\rightarrow \mathbb{R} \\ (p, q) &\mapsto \|q - p\|. \end{aligned}$$

Das erste Axiom für Metrische Räume folgt direkt aus dem ersten Axiom für normierte Räume. Zur Symmetrie bemerke, dass

$$d(p, q) = \|q - p\| = \|(-1)(p - q)\| = |-1| \cdot \|p - q\| = \|p - q\| = d(q, p).$$

Die Dreiecksungleichung erfordert keinen Trick.

- (2) Sei  $X$  beliebig. Definiere auf  $X$  die *diskrete Metrik* wie folgt:

$$d(p, q) = \begin{cases} 0 & q = p \\ 1 & q \neq p \end{cases}.$$

Das einzige interessante Axiom ist die Dreiecksungleichung. Falls  $d(a, c) = 0$  gilt, dann gilt sowieso  $d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$ . Der einzige Fall, den wir ausschliessen müssen, ist also  $d(a, c) = 1$  und  $d(a, b) = d(b, c) = 0$ . Aber aus  $d(a, b) = 0$  folgt  $a = b$ , und aus  $d(b, c) = 0$  folgt  $b = c$  und somit auch  $a = c$ , was  $d(a, c) = 0$  impliziert. Dies ist ein Widerspruch.

- (3) Folgende Metrik ist enorm wichtig in der Zahlentheorie. Wir werden sie aber bloss in den Übungen antreffen. Sei  $p \in \mathbb{N}$  eine Primzahl. Definiere die *p-adische Metrik* auf  $\mathbb{Z}$  wie folgt:

$$d_p(n, m) = \begin{cases} 0 & n = m \\ p^{-x} & n \neq m, \end{cases}$$

wobei  $x \in \mathbb{N}$  maximal mit der Eigenschaft ist, dass  $p^x$  die Zahl  $n - m$  teilt. Insbesondere gilt  $d_p(n, n + 1) = 1 = p^{-0}$ , da in diesem Fall  $x = 0$  gilt. Weiter ist  $d_p(0, p^n) = p^{-n}$ , ist also klein für grosse  $n$ .

**Definitionen.** Sei  $X$  ein metrischer Raum mit Metrik  $d$ .

- Eine Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  in  $X$  heisst *konvergent* mit Grenzwert  $a \in X$ , falls für alle  $\varepsilon$  ein  $N \in \mathbb{N}$  existiert, so dass für alle  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n \geq N$  gilt, dass  $d(a_n, a) \leq \varepsilon$ .
- Eine Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  in  $X$  heisst *Cauchyfolge*, falls für alle  $\varepsilon > 0$  ein  $N \in \mathbb{N}$  existiert, so dass für alle  $n, m \geq N$  gilt, dass  $d(a_n, a_m) \leq \varepsilon$ .
- Der metrische Raum  $X$  heisst *vollständig*, falls alle Cauchyfolgen in  $X$  konvergieren.

Ein vollständiger normierter Vektorraum heisst *Banachraum*.

**Beispiele.**

- (1) Der metrische Raum  $\mathbb{R}$  mit  $d(p, q) = |p - q|$  ist vollständig.
- (2) (a) Der metrische Raum  $X = (0, 1) \subset \mathbb{R}$  mit der von  $\mathbb{R}$  induzierten Metrik  $d(p, q) = |q - p|$  ist unvollständig.  
(b) Ebenso ist  $X = \mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$  mit der von  $\mathbb{R}$  induzierten Metrik unvollständig.
- (3) Sei  $X = \mathbb{Z}$  mit der  $p$ -adischen Metrik  $d_p$ . Betrachte die Folge  $a_n = p^n$ . Dies ist eine Cauchyfolge mit Grenzwert  $0 \in \mathbb{Z}$ . Man könnte nun vermuten, dass  $\mathbb{Z}$  mit dieser Metrik vollständig ist. Das ist jedoch nicht der Fall. Betrachte dazu die Folge  $b_n = 1 + p + p^2 + \cdots + p^n$ . Dies ist eine Cauchyfolge, leider aber ohne Grenzwert in  $\mathbb{Z}$ . Das heisst, dass  $\mathbb{Z}$  mit der  $p$ -adischen Metrik unvollständig ist. Siehe dazu auch die Übungen.

## Kapitel II

# Differentialrechnung



## Kapitel III

# Gradientenfelder und Differentialformen

# Literaturverzeichnis

- [1] H. Heuser. *Lehrbuch der Analysis*. Mathematische Leitfäden. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [2] E. Hairer and G. Wanner. *Analysis by Its History*. Undergraduate Texts in Mathematics / Readings in Mathematics. Springer New York, 2000.