Vorlesung Analysis II im Sommersemester 2013

Wilhelm Singhof

Teil I: Differenzialrechnung mehrerer Veränderlicher

1. Normierte und metrische Räume: Definitionen und Beispiele

Def. Sei V ein (reeller) Vektorraum. Eine *Norm* auf V ist eine Abbildung

$$\| \, . \, \| : V \to \mathbb{R} \, , \; v \mapsto \| \, v \, \| \; ,$$

die die folgenden Eigenschaften hat:

(1) $\| \, v \, \| \geq \; 0$ für alle $v \in V$.

(2) $\| \, v \, \| = 0 \Longleftrightarrow v = 0$.

(3) $\| \, \alpha v \, \| = | \, \alpha \, | \cdot \| \, v \, \|$ für $v \in V$ und $\alpha \in \mathbb{R}$.

(4) $\| \, v + w \, \| \leq \| \, v \, \| + \| \, w \, \|$ für alle $v, w \in V$ (*Dreiecksungleichung*).

Ein *normierter Raum* ist ein Paar $(V, \| \, . \, \|)$, wobei V ein Vektorraum und $\| \, . \, \|$ eine Norm auf V ist. Meist sagt man: "Sei V ein normierter Raum" statt "sei $(V, \| \, . \, \|)$ ein normierter Raum".

Beispiel: Auf $V = \mathbb{R}^n$ erhält man Normen $\| \, . \, \|_1$, $\| \, . \, \|_\infty$ und $\| \, . \, \|_2$ folgendermaßen: Ist $v = (x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, so sei

$$\begin{aligned} \| \, v \, \|_1 &:= | \, x_1 \, | \; + \ldots + \; | \, x_n \, |, \\ \| \, v \, \|_\infty &:= \; \max\{ \, | \, x_1 \, |, \ldots, | \, x_n \, | \}, \\ \| \, v \, \|_2 &:= \; (x_1^2 + \ldots + x_n^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

Um die Dreiecksungleichung für $\| \, . \, \|_2$, die sog. *Euklidische Norm*, nachzuweisen, braucht man:

Satz 1. (Cauchy-Schwarzsche Ungleichung)

Sind $v = (x_1, \ldots, x_n)$, $w = (y_1, \ldots, y_n) \in \mathbb{R}^n$, so ist

$$| \, x_1 y_1 + \ldots + x_n y_n \, | \leq \| \, v \, \|_2 \cdot \| \, w \, \|_2 \; .$$

Bem. Für $v \in \mathbb{R}^n$ ist $\| \, v \, \|_\infty \leq \| \, v \, \|_2 \leq \| \, v \, \|_1 \leq \; n \cdot \| \, v \, \|_\infty$.

Allgemeiner gilt: Zwei Normen $\| \, . \, \|$ und $| \, . \, |$ auf einem endlich-dimensionalen reellen Vektorraum V sind äquivalent in dem Sinn, dass es positive reelle Zahlen a, A gibt mit

$$a \; \| \, v \, \| \leq | \, v \, | \leq \; A \; \| \, v \, \| \; \; \forall \, v \in V.$$

Def. Sei X eine Menge. Eine *Metrik* auf X ist eine Abbildung

$$d : X \times X \longrightarrow \mathbb{R}$$

mit den folgenden vier Eigenschaften:

(I) $d(x, y) \geq \; 0$ für alle $x, y \in X$.

(II) $d(x, y) = 0 \Longleftrightarrow x = y$.

(III) $d(x, y) = d(y, x)$ für alle $x, y \in X$.

(IV) $d(x,z) \leq d(x,y) + d(y,z)$ für alle $x, y, z \in X$ (*Dreiecksungleichung*).

Ein *metrischer Raum* ist ein Paar (X, d), wobei X eine Menge und d eine Metrik auf X ist. Man sagt oft „X ist metrischer Raum " statt „(X, d) ist metrischer Raum".

Beispiel: Sei V ein normierter Raum. Definiere $d : V \times V \to \mathbb{R}$ durch

$$d(x,y) := \| x - y \| .$$

Dann ist V ein metrischer Raum.

Beispiel: Ist (X, d) ein metrischer Raum und $Y \subseteq X$, so wird Y mit der Einschränkung von d auf $Y \times Y$ ein metrischer Raum.

Def. Sei X ein metrischer Raum, $a \in X$ und $r \in \mathbb{R}$ mit $r > 0$. Dann heißt die Menge

$$B_r(a) := \{x \in X \mid d(a,x) < r\}$$

die *offene Kugel* und

$$\overline{B}_r(a) := \{x \in X \mid d(a,x) \leq r\}$$

die *abgeschlossene Kugel* mit Mittelpunkt a und Radius r.

2. Einige grundlegende topologische Begriffe

Def. Sei X ein metrischer Raum und $A \subseteq X$. Dann heißt A *offen in* X, wenn gilt: Ist $x \in A$, so existiert ein $r > 0$ mit $B_r(x) \subseteq A$.

Satz 1. Eine offene Kugel in einem metrischen Raum X ist offen in X.

Satz 2. Sei X ein metrischer Raum. Dann gilt:

a) X und $\emptyset$ sind offen in X.

b) Ist I irgendeine Menge und sind die A_i mit $i \in I$ offen in X, so ist auch $\bigcup_{i \in I} A_i$ offen in X.

c) Ist $n \in \mathbb{N}$ und sind $A_1, \ldots, A_n$ offen in X, so ist $A_1 \cap \ldots \cap A_n$ offen in X.

Beispiel: $\left]-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right[$ ist offen in $\mathbb{R}$. Aber $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \left]-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right[= \{0\}$ ist nicht offen in $\mathbb{R}$.

Def. Sei X ein metrischer Raum, $x \in X$. Eine Teilmenge U von X heißt *Umgebung* von x in X, wenn es eine offene Teilmenge A von X gibt mit

$$x \in A \subseteq U.$$

Eigenschaften von Umgebungen:

(1) Sei $x \in X$ und $U \subseteq X$. Dann sind äquivalent:

   (a) U ist Umgebung von x.

   (b) Es gibt ein $r > 0$ mit $B_r(x) \subseteq U$.

(2) Eine Menge ist genau dann offen, wenn sie Umgebung aller ihrer Punkte ist.

(3) Ist U Umgebung von x und $V \supseteq U$, so ist V Umgebung von x.

(4) Der Durchschnitt endlich vieler Umgebungen von x ist eine Umgebung von x.

Beispiel: Betrachte $\mathbb{R}^n$ mit den Normen $\| \ . \ \|_p$, $p = 1, 2, \infty$. Diese drei Normen besitzen dieselben offenen Mengen.

Def. Sei X ein metrischer Raum, $A \subseteq X$ und $x \in X$.
x heißt *Häufungspunkt* von A, falls in jeder Umgebung von x ein von x verschiedener Punkt von A liegt.
x heißt *Berührungspunkt* von A, falls in jeder Umgebung von x ein Punkt von A liegt.

Bem. x ist Berührungspunkt von $A \iff x \in A$ oder x ist Häufungspunkt von A.

Satz 3. und Def. Sei X metrischer Raum, $A \subseteq X$. Dann sind äquivalent:

(a) A enthält alle Häufungspunkte von A.

(b) A enthält alle Berührungspunkte von A.

(c) $X \setminus A$ ist offen in X.

Wenn A diese Eigenschaften hat, so heißt A *abgeschlossen* in X.

Satz 4. Sei X ein metrischer Raum. Dann gilt:

1) $\emptyset$ und X sind abgeschlossen.

2) Der Durchschnitt von beliebig vielen abgeschlossenen Mengen ist abgeschlossen.

3) Die Vereinigung von endlich vielen abgeschlossenen Mengen ist abgeschlossen.

Satz 5. Sei X ein metrischer Raum und A eine endliche Teilmenge von X. Dann ist A abgeschlossen in X.

Def. Sei $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ eine Folge in einem metrischen Raum X. Ein Punkt $x_0 \in X$ heißt *Grenzwert* der Folge (x_n), wenn eine der vier folgenden äquivalenten Bedingungen erfüllt ist:

1. Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert ein $N \in \mathbb{N}$ mit $d(x_n, x_0) < \varepsilon$ für $n \geq N$.
2. $\lim\limits_{n\to\infty} d(x_n, x_0) = 0$ im Sinne von Analysis I.
3. Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert ein $N \in \mathbb{N}$ mit $x_n \in B_\varepsilon(x_0)$ für $n \geq N$.
4. Für jede Umgebung U von x_0 existiert ein $N \in \mathbb{N}$ mit $x_n \in U$ für $n \geq N$.

Eine Folge besitzt höchstens einen Grenzwert. Wenn (x_n) den Grenzwert x_0 besitzt, so sagt man, dass (x_n) gegen x_0 *konvergiert* und schreibt $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = x_0$ oder $x_n \to x_0$.

Beispiel: Sei $X = \mathbb{R}^n$ mit einer der Normen $\| \ . \ \|_p$, $p = 1, 2, \infty$. Sei $(x^k)_{k\in\mathbb{N}}$ eine Folge in $\mathbb{R}^n$ mit $x^k = (\xi_1^k, \ldots, \xi_n^k)$ und sei $x^0 = (\xi_1^0, \ldots, \xi_n^0) \in \mathbb{R}^n$.
Genau dann ist $\lim\limits_{k\to\infty} x^k = x^0$, wenn für jedes ν mit $1 \leq \nu \leq n$ gilt: $\lim\limits_{k\to\infty} \xi_\nu^k = \xi_\nu^0$.

Bem. Sei X ein metrischer Raum, $A \subseteq X$ und $x \in X$.

a) x ist Berührungspunkt von $A \iff$ es existiert eine Folge (x_n) in A mit $x_n \to x$.

b) x ist Häufungspunkt von $A \iff$ es existiert eine Folge (x_n) in A mit $x_n \neq x$ für $n \in \mathbb{N}$ und $x_n \to x$.

c) A ist abgeschlossen in $X \iff$ ist (x_n) eine Folge in A, so dass $x_0 = \lim x_n$ in X existiert, so ist $x_0 \in A$.

Def. Sei X ein metrischer Raum, $A \subseteq X$ und $x \in X$. Dann heißt x ein *innerer Punkt* von A, wenn A eine Umgebung von x ist. Sei $\mathring{A}$ die Menge aller inneren Punkte von A; sie heißt das *Innere* von A.

Satz 6. Sei X ein metrischer Raum und $A \subseteq X$. Dann ist $\mathring{A}$ die größte offene Teilmenge von X, die in A enthalten ist.

Satz 7. Ist V ein normierter Raum, $x \in V$, $r > 0$ und $A := \overline{B}_r(x)$, so ist $\mathring{A} = B_r(x)$.

Def. Sei X ein metrischer Raum, $A \subseteq X$. Sei $\overline{A}$ die Menge aller Berührungspunkte von A in X. Sie heißt der *Abschluss* von A.

Satz 8. a) $X \setminus \overline{A} = (X \setminus A)^\circ$.

b) $\overline{A}$ ist die kleinste abgeschlossene Teilmenge von X, die A umfasst.

Def. Sei X ein metrischer Raum, $A \subseteq X\,, x \in X$.
x heißt *Randpunkt* von A in X, wenn x Berührungspunkt von A und von $X \setminus A$ ist.
Sei ∂A die Menge der Randpunkte von A in X, also $\partial A = \overline{A} \cap \overline{X \setminus A}$.
∂A heißt der *Rand* von A in X.

Bem. ∂A ist abgeschlossen in X.
X ist die disjunkte Vereinigung von $\mathring{A}\,, \partial A$ und $(X \setminus A)^\circ$.

3. Stetige Abbildungen

Def. Seien $(X,d), (Y,d')$ metrische Räume, $f : X \to Y$ eine Abbildung, $x_0 \in X$. Dann heißt f *stetig im Punkt* x_0, wenn eine der folgenden 3 äquivalenten Bedingungen erfüllt ist:

1. Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert $\delta > 0$, so dass gilt: Ist $x \in X$ mit $d(x_0, x) < \delta$, so ist $d'(f(x_0), f(x)) < \varepsilon$.
2. Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert $\delta > 0$ mit $f(B_\delta(x_0)) \subseteq B_\varepsilon(f(x_0))$.
3. Zu jeder Umgebung V von $f(x_0)$ gibt es eine Umgebung U von x_0 mit $f(U) \subseteq V$.

Die Abbildung $f : X \to Y$ heißt *stetig*, wenn sie in jedem Punkt von X stetig ist.

Beispiele:1) Eine konstante Abbildung ist stetig.

2) Die identische Abbildung $\mathrm{id}_X : X \to X$ ist stetig.

3) Seien X, Y, Z metrische Räume, $f : X \to Y$ und $g : Y \to Z$ Abbildungen, $x_0 \in X$. Wenn f in x_0 und g in $f(x_0)$ stetig ist, so ist $g \circ f : X \to Z$ in x_0 stetig.

Satz 1. Seien X, Y metrische Räume, $f : X \to Y$. Dann sind äquivalent:

a) f ist stetig.

b) Ist A offen in Y, so ist $f^{-1}(A)$ offen in X.

c) Ist B abgeschlossen in Y, so ist $f^{-1}(B)$ abgeschlossen in X.

d) Ist (x_n) eine konvergente Folge in X, so ist $(f(x_n))$ konvergente Folge in Y und $\lim\limits_{n\to\infty} f(x_n) = f(\lim\limits_{n\to\infty} x_n)$.

Satz 2. Seien X, Y metrische Räume, $f, g : X \to Y$ stetig.
Dann ist $A := \{x \in X \mid f(x) = g(x)\}$ abgeschlossen in X.

Satz 3. Sei X ein metrischer Raum, $f, g : X \to \mathbb{R}$ stetig.
Dann ist $A := \{x \in X \mid f(x) \leq g(x)\}$ abgeschlossen in X.

Bem. Sei X ein metrischer Raum und $f : X \to \mathbb{R}^n$ eine Abbildung. Dann ist $f(x) = (f_1(x), \ldots, f_n(x))$ mit Abbildungen $f_k : X \to \mathbb{R}$. Wir versehen $\mathbb{R}^n$ mit einer der Normen $\| \,.\, \|_\infty$, $\| \,.\, \|_2$, $\| \,.\, \|_1$.
Genau dann ist f stetig, wenn alle f_k stetig sind.

Def. Eine Teilmenge X eines normierten Raumes V heißt *beschränkt*, wenn es ein $M \geq 0$ gibt mit $\| v \| \leq M$ für alle $v \in X$.

Satz 4. Sei X eine beschränkte, abgeschlossene Teilmenge von $\mathbb{R}^n$, und $f : X \to \mathbb{R}$ sei stetig. Dann ist $f(X)$ eine beschränkte und abgeschlossene Teilmenge von $\mathbb{R}$. Insbesondere nimmt f auf X sein Maximum und sein Minimum an.

4. Partielle Ableitungen

Def. Sei U offen in $\mathbb{R}^n$, $f : U \to \mathbb{R}$ eine Abbildung, $x = (x_1, \ldots, x_n) \in U$. Für $i = 1, \ldots, n$ sei $U_i := \{t \in \mathbb{R} \mid (x_1, \ldots, x_{i-1}, t, x_{i+1}, \ldots, x_n) \in U\}$.
Dann ist U_i eine offene Umgebung von x_i in $\mathbb{R}$.
Man definiert $F_i : U_i \to \mathbb{R}$ durch

$$F_i(t) := f(x_1, \ldots, x_{i-1}, t, x_{i+1}, \ldots, x_n).$$

f heißt *im Punkt x partiell differenzierbar*, wenn für $i = 1, \ldots, n$ die Funktion F_i in x_i differenzierbar ist. Schreibe dann

$$D_i f(x) := \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) := \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} := \frac{\partial}{\partial x_i} f(x) := F_i'(x),$$

und nenne dies die *i-te partielle Ableitung* von f in x.
f heißt *partiell differenzierbar*, wenn es in jedem Punkt von U partiell differenzierbar ist.

Bem. a)Man berechnet die i-te partielle Ableitung, indem man f als Funktion der i-ten Variablen allein auffasst und die anderen Variablen konstant hält.
b) Für $n = 2$ schreibt man meist (x, y) statt (x_1, x_2) und $\frac{\partial f}{\partial x}$ statt $\frac{\partial f}{\partial x_1}$ und $\frac{\partial f}{\partial y}$ statt $\frac{\partial f}{\partial x_2}$. Für $n = 3$ schreibt man oft (x, y, z) statt (x_1, x_2, x_3).

Beispiel: $f(x, y) = e^{xy} \Longrightarrow \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = ye^{xy}$, $\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = xe^{xy}$.

Beispiel: Betrachte $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$,

$$f(x, y) := \begin{cases} \dfrac{xy}{x^2 + y^2} & \text{für } (x, y) \neq (0, 0), \\ 0 & \text{für } (x, y) = (0, 0). \end{cases}$$

In jedem Punkt $(x, y) \neq (0, 0)$ ist f offensichtlich partiell differenzierbar. f ist aber auch in $(0, 0)$ partiell differenzierbar:
$f_1(\xi) = f(\xi, 0) = 0$ und $f_2(\xi) = f(0, \xi) = 0$ für alle $\xi \in \mathbb{R} \Longrightarrow D_1 f(0, 0) = 0$ und $D_2 f(0, 0) = 0$.
f ist also auf ganz $\mathbb{R}^2$ partiell differenzierbar.

Aber f ist in $(0, 0)$ *nicht* stetig: Denn für $x \in \mathbb{R}, x \neq 0$, ist $f(x, x) = \dfrac{x^2}{x^2 + x^2} = \dfrac{1}{2}$, während $f(0, 0) = 0$.

Def. Sei U offen in $\mathbb{R}^n$ und $f : U \to \mathbb{R}$ partiell differenzierbar in U. Wenn alle partiellen Ableitungen $D_1 f, \ldots, D_n f : U \to \mathbb{R}$ wieder partiell differenzierbar sind, so kann man $D_j D_i f := D_j(D_i f)$ bilden und sagt, dass f zweimal partiell differenzierbar ist. Induktiv definiert man, was es für $k \in \mathbb{N}$ bedeutet, dass f *k-mal partiell differenzierbar* ist. Schreibe auch

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} := D_j D_i f \ , \ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} := D_i^2 f := D_i D_i f \text{ usw.}$$

Wenn f k-mal partiell differenzierbar ist und wenn alle partiellen Ableitungen der Ordnung $\leq k$ stetig sind (dazu gehört insbesondere, dass f selbst als partielle Ableitung der Ordnung 0 stetig ist), so sagt man, f sei *von der Klasse* C^k. Wenn f stetige partielle Ableitungen von jeder Ordnung hat, so heißt f *von der Klasse* C^∞ oder *glatt*. Schließlich heißt f *von der Klasse* C^0, wenn es stetig ist.

Satz 1. (Satz von H. A. Schwarz) Sei U offen in $\mathbb{R}^n$ und $f : U \to \mathbb{R}$ von der Klasse C^2. Sei $a \in U$ und $i, j \in \{1, \ldots, n\}$. Dann ist

$$D_j D_i f(a) = D_i D_j f(a).$$