

# MATHE C KLAUSURZETTEL

HENRI HEYDEN

stu240825

## Analysis

### Integrierbarkeit

#### RIEMANN SUMME

Sei  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ , seien  $(x, \xi)$  Partition und Stützstellen aus  $[a, b]$ .

Dann nennen wir  $R(f, x, \xi) := \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1}) \cdot f(\xi_i)$  Riemann Summe.

#### INTEGRIERBARKEIT

Wir nennen  $f$  integrierbar, wenn

$\exists R_0 \in \mathbb{R} \forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall (x, \xi) \in \text{PS}(a, b, \delta) : |R(f, x, \xi) - R_0| < \epsilon$  gilt.

Das Integral ist eindeutig, schreibe  $\int_a^b f$  oder  $\int f$  hierfür.

Wir schreiben auch  $\int f(x)dx := \int f$

Ist  $f$  integrierbar, dann kann man das Integral mit einer Beliebigen Folge an  $(x_n, \xi_n)_n$  finden wessen Feinheit den Limes 0 hat, sodass die Riemann-Summe konvergiert.

$f$  ist genau dann integrierbar, wenn für alle 2 solcher Folgen ihre Differenz immer zu 0 konvergiert.

#### STETIG UND KOMPAKT

Eine Funktion  $f$ :

...ist stetig in  $x \in \text{dom}(f)$ , wenn alle Funktionslimes zu  $x$  gleich sind.

...ist beschränkt, wenn ihre Domain eine obere und untere Schranke hat.

...ist abgeschlossen, wenn das komplement ihrer Domain offen ist.

...ist kompakt, wenn sie beschränkt und abgeschlossen ist.

Ist eine Funktion kompakt stetig, dann ist sie gleichmäßig stetig und somit integrierbar.

#### ABSCHÄTZUNGEN

Für  $f \leq g$  gilt:  $\int f \leq \int g$ .

Es gilt:  $(b - a) \cdot \inf(f) \leq \int_a^b f \leq (b - a) \cdot \sup(f)$

### Integrationstechniken

#### HAUPTSATZ DER DIFFERENZIALRECHNUNG

Schreibe  $[\phi]_u^v := \phi(v) - \phi(u)$

Sei  $f, F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  so, dass  $F' = f$  gilt.

Dann gilt:  $\int f = F(\sup(\Omega)) - F(\inf(\Omega)) = F(b) - F(a) = [F]_a^b$  für  $\Omega = [a, b]$ .

## STAMMFUNKTIONEN

Domain	$f(x)$	$F(x)$	args
$\mathbb{R}$	$c$	$cx$	$c \in \mathbb{R}$
$\mathbb{R}$	$\sum_{k=0}^n a_k x^k$	$\sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1}$	$a_0 \dots a_n \in \mathbb{R}$
$\mathbb{R}_{>0}$	$x^{-1}$	$\ln(x)$	
$\mathbb{R}$	$b^x$	$\frac{b^x}{\ln(b)}$	$b \in \mathbb{R}_{>0} \setminus \{1\}$
$\mathbb{R}_{>0}$	$\log_b(x)$	$\frac{x \ln(x) - x}{\ln(b)}$	$b \in \mathbb{R}_{>0} \setminus \{1\}$
$] -1, 1[$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$\arcsin(x)$	
$\mathbb{R}$	$\frac{1}{1+x^2}$	$\arctan(x)$	

## PARTIELLE INTEGRATION

Für  $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  gilt:  $\int_a^b f g' = [f g]_a^b - \int_a^b f' g$

## SUBSTITUTION

Für  $f$  stetig reel und  $\phi$  stetig differenzierbar reel mit  $u, v \in \text{dom}(\phi)$ , sodass  $[u, v] \subseteq \text{dom}(\phi)$  und  $\phi^{-1}([u, v]) \subseteq \text{dom}(f)$  ist, gilt:

$$\int_{\phi(u)}^{\phi(v)} f = \int_u^v (f \circ \phi) \cdot \phi'$$

## Uneigentliche Integrale

### INTEGRAL ÜBER $x^{-\alpha}$

- 1)  $\forall \alpha > 1 : \int_1^{+\infty} x^{-\alpha} dx = \frac{1}{\alpha-1}$ . Für  $\alpha \in ]0, 1]$  divergiert das Integral.
- 2)  $\forall \alpha \in ]0, 1[ : \int_0^1 x^{-\alpha} dx = \frac{1}{1-\alpha}$ . Für  $\alpha \geq 1$  divergiert das Integral.

## VERGLEICHSKRITERIUM

Seien  $f, g : [a, b[ \rightarrow \mathbb{R}$  integrierbar über alle Teilintervalle und  $|f| \leq g$ .

Konvergiert das uneigentliche Integral über  $g$ , dann konvergiert das uneigentliche Integral über  $f$ .

## INTEGRALKRITERIUM

Warnung nicht im Skript, trotzdem leichtes Argument.

Sei  $p \in \mathbb{Z}$  und  $f : [p, \infty[ \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$  monoton fallend.

Dann ist  $f$  integrierbar genau dann, wenn  $\sum_{n=p}^{\infty} f(n)$  konvergiert.

Zur Motivation betrachte  $\sum_{n=p}^{\infty} f(n)$  als obere Schranke und Annäherung des Integrals mittels Riemann Summe mit gleichmäßiger Feinheit 1.

## Analytische Grundstrukturen

### Metrische Räume

#### METRIK

Eine Metrik ist eine Funktion  $d : M^2 \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  mit folgenden Eigenschaften:

- 1)  $d(x, y) = 0 \iff x = y$  (positive Definitheit)
- 2)  $d(x, y) = d(y, x)$  (Symmetrie)
- 3)  $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$  (Dreiecksungleichung)

#### EIGENSCHAFTEN DER METRIK

Für Metrische Räume gelten alle analytischen Gesetze und Sätze aus MatheB nur mit jeder Metrik nicht nur der Betragsmetrik. Somit sind Begriffe wie Stetigkeit, Limes, Kompaktheit, Funktionslimes etc. äquivalent.

### Normierte Räume

#### NORM

Sei  $V$  Vektorraum, dann ist  $\|\cdot\|$  Norm auf  $V$ , wenn folgende Gesetze gelten:

- 1)  $\|v\| = 0 \iff v = 0$
- 2)  $\|\lambda v\| = |\lambda| \cdot \|v\|$
- 3)  $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$

#### BEISPIELNORMEN ÜBER $\mathbb{R}^n$

Sei  $k \in \mathbb{N}_{>0}$ , dann ist  $\|\cdot\|_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, v \mapsto \sqrt[k]{\sum_{i=1}^n |v_i|}$  Norm

Die Funktion  $\|\cdot\|_\infty : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, v \mapsto \max_{i \in [n]} |v_i|$  ist Norm

#### EIGENSCHAFTEN DER NORM

Es gilt  $\| -v \| = \|v\|$

Außerdem ist  $V^2 \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, (u, v) \mapsto \|u - v\|$  Metrik. Somit lassen sich analytische Grundbegriffe für Vektorräume komposieren und alle Eigenschaften der Metrischen Räume für jene Metrik anwenden.

Normen sind stetig. Also  $\|\cdot\|$  ist eine stetige Funktion.

#### ÄQUIVALENZ VON NORMEN

Seien  $(V, \|\cdot\|)$  und  $(V, \|\cdot\|')$  normierte Räume. Wir nennen  $\|\cdot\|$  und  $\|\cdot\|'$  äquivalent, wenn folgendes gilt:  $\exists \alpha, \beta > 0 : \forall v \in V : \alpha \|v\| \leq \|v\|' \leq \beta \|v\|$

Umgebungen über äquivalente Normen sind äquivalent, genau wie Konvergenz mit den gleichen Limes, Stetigkeiten und Kompaktheiten.

Auf endlich dimensionalen Vektorräumen sind alle Normen äquivalent.

## Differentiation im Mehrdimensionalen

Es seien  $V, W$  Vektorräume über  $\mathbb{R}$ ,  $\Omega \subseteq V$ .

### Differenzierbarkeit

DEFINITION DER DIFFERENZIERBARKEIT

Wir nennen  $f : \Omega \rightarrow W$  differenzierbar in  $v$ , wenn

$$\exists \phi \in L(V, W) : \lim_{\tilde{v} \rightarrow v} \frac{\|f(\tilde{v}) - (f(v) + \phi(\tilde{v} - v))\|_W}{\|\tilde{v} - v\|_V} = 0_{\mathbb{R}}$$

gilt. Dann nennen wir  $\phi$  Ableitung von  $f$  und schreiben  $D(f) := \phi$ . Offenbar da  $\phi$  linear stetig ist, existiert eine Matrix für  $\phi$ . Folgende Definition ist äquivalent:

$$\exists \phi \in L(V, W) : \lim_{h \rightarrow 0_V} \frac{\|f(v+h) - (f(v) + \phi(h))\|_W}{\|h\|_V} = 0_{\mathbb{R}}$$

Gilt  $V = W = \mathbb{R}$ , dann ist die Definition äquivalent zur Differenzierbarkeit im bekannten Sinne.

### Ableitungsregeln

Ist  $f$  differenzierbar, dann sind alle Komponentenfunktionen von  $f$  ( $V, \mathbb{R}$ )-differenzierbar.

KOMBINATIONSSÄTZE

Für  $\lambda : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f, g : \Omega \rightarrow V$  differenzierbar gelten folgende Regeln:

- 1)  $D(f + g) = D(f) + D(g)$
- 2)  $D(\lambda f) = \lambda D(f)$
- 3)  $D\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{D(\lambda)}{\lambda^2}$
- 4)  $D\left(\frac{f}{\lambda}\right) = \frac{\lambda D(f) - f D(\lambda)}{\lambda^2}$

### Partielle Ableitungen

Seien  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ ,  $i \in [n]$ ,  $j \in [d]$ ,  $v \in \Omega$ .

PARTIELLE DIFFERENZIERBARKEIT

Wir nennen  $f_j$  partiell differenzierbar in  $v$  nach der  $i$ -ten Variable, wenn  $f_{j,v,i}$  in  $v_i$  differenzierbar ist.

Wir definieren  $\partial_i f_j(v) := f'_{j,v,i}(v_i)$ .

#### BEISPIEL

Sei  $f : \mathbb{R} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}^4, (x, y) \mapsto (x + y, xy, x^2 + 3y - 6, -2\sqrt{y})$ .

Dann gilt:

$$\partial_1 f_2(x, y) = y, \quad \partial_1 f_3(x, y) = 2x, \quad \partial_1 f_4(x, y) = 0,$$

$$\partial_2 f_1(x, y) = 1, \quad \partial_2 f_3(x, y) = 3$$

#### GRADIENT UND JACOBI-MATRIX

Wir definieren den Gradienten von  $f_j$  als  $\text{grad}_{f_j}(v) := (\partial_1 f_j(v), \dots, \partial_n f_j(v))$ .

Des Weiteren definieren wir die Jacobi-Matrix von  $f$ :

$$\mathbf{J}_f(v) := \begin{bmatrix} \partial_1 f_1(v) & \dots & \partial_n f_1(v) \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_1 f_d(v) & \dots & \partial_n f_d(v) \end{bmatrix}$$

Somit gilt:

$$\mathbf{J}_f(v) = \begin{bmatrix} \text{grad}_{f_1}(v) \\ \vdots \\ \text{grad}_{f_d}(v) \end{bmatrix}$$

Ist  $f$  differenzierbar in  $v$ , dann ist  $\mathbf{J}_f(v)$  Ableitung von  $f$ , aber Achtung: Vollständige partielle Differenzierbarkeit impliziert NICHT totale Differenzierbarkeit!

#### TOTALE DIFFERENZIERBARKEIT AUS PARTIELLER DIFFERENZIERBARKEIT

Ist  $f$  vollständig partiell differenzierbar und alle Ableitungen sind stetig, dann ist  $f$  total differenzierbar.

#### $C^1$ -FUNKTIONEN UND $C^2$ -FUNKTIONEN

Wir nennen  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$  eine  $C^1$ -Funktion, wenn sie vollständig stetig partiell differenzierbar ist. Somit ist also eine  $C^1$ -Funktion total differenzierbar.

$f$  ist  $C^1$ -Funktion, wenn all ihre Komponentenfunktionen aus Kombinationen von Projektionen stetiger differenzierbaren eindimensionalen Funktionen bestehen.

Wir nennen  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  eine  $C^2$ -Funktion, wenn sie eine  $C^1$ -Funktion ist, und  $\forall i \in [n] : \partial_i f$  stetig partiell differenzierbar ist.

Dies ist äquivalent dazu, dass  $\text{grad}_f$  eine  $C^1$ -Funktion ist.

Die partielle Ableitung von  $\partial_i f$  nach der  $j$ -ten Variable bezeichnen wir mit  $\partial_j \partial_i f$ .

#### HESSE-MATRIX

Sei  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  eine  $C^2$ -Funktion, wir definieren die Hesse-Matrix von  $f$  als:

$$\mathbf{H}_f := \begin{bmatrix} \partial_1 \partial_1 f(v) & \dots & \partial_1 \partial_n f(v) \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_n \partial_1 f(v) & \dots & \partial_n \partial_n f(v) \end{bmatrix}$$

offenbar gilt:  $\mathbf{H}_f(v) = (\mathbf{J}_{\text{grad}_f}(v))^T$ , denn die Spalten der Hesse-Matrix sind die Gradienten der Komponentenfunktionen von  $\text{grad}_f$ .

Die Transposition ist auch nicht nötig, da die Hesse-Matrix symmetrisch ist.

Das heißt es gilt:  $\forall i, j \in [n] : \partial_i \partial_j f = \partial_j \partial_i f$ .

## Lokale Extremstellen

### DEFINITION

Wir nennen  $v \in \Omega$  eine lokale Maximumstelle/Minimumstelle von  $f$ , wenn gilt:

$\exists U \in \mathcal{U}(v) : \forall u \in U : f(u) \leq f(v)$  bzw.  $f(u) \geq f(v)$ .

Wir bezeichnen die Menge der lokalen Maximumstellen  $\text{LMAX}(f)$  und die Menge der lokalen Minimumstellen  $\text{LMIN}(f)$ . Die Vereinigung beider Mengen ist  $\text{LEXT}(f)$ .

### DEFINITION

Sei  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  symmetrisch, dann nennen wir  $A$  ...

... positiv definit, wenn  $\forall k \in [n] : \det(A_k) > 0$

... negativ definit, wenn  $\forall k \in [n] : \det(A_k) < 0$

... indefinit, sonst.

### DEFINITION DER HESSE-MATRIX

Definiere die Menge der kritischen Stellen von  $f$  als  $K(f) := \text{grad}_f^{\leftarrow}(0_{\mathbb{R}^n})$ .

Es gilt für alle  $v \in K(f)$ :

1)  $\mathbf{H}_f(v)$  positiv definit  $\implies v \in \text{LMIN}(f)$

2)  $\mathbf{H}_f(v)$  negativ definit  $\implies v \in \text{LMAX}(f)$

3)  $\mathbf{H}_f(v)$  indefinit  $\implies v \notin \text{LEXT}(f)$

### DEFINITION EINER $2 \times 2$ -MATRIX

Definiere  $A := \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix}$  für  $a, b, c \in \mathbb{R}$ . Dann gilt:

1)  $A$  positiv definit  $\iff a > 0 \wedge \det(A) > 0$ .

2)  $A$  negativ definit  $\iff a < 0 \wedge \det(A) > 0$ .

3)  $A$  indefinit  $\iff \det(A) < 0$

## Stochastik

... *TODO* ...