

1 Funktionen in \mathbb{R}^n

1.1 Metrik

Eine Funktion $d : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ mit $\forall x, y, z \in \mathbb{R}^n$:

Positive Definitheit

$$d(x, y) \geq 0 \quad \text{und} \quad d(x, y) = 0 \iff x = y$$

Symmetrie $d(x, y) = d(y, x)$

Dreiecksungleichung $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$

Triviale Metrik:

$$d(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x \neq y \\ 0 & \text{falls } x = y \end{cases}$$

Französische Eisenbahnmetrik:

$$d(x, y) = \begin{cases} \|x - y\| & \text{falls } \exists \lambda \in \mathbb{R} : x = \lambda y \\ \|x\| + \|y\| & \text{sonst} \end{cases}$$

1.2 Normen in \mathbb{R}^n

Eine Funktion $\|\cdot\| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ mit

Positive Definitheit $\|x\| \geq 0 \wedge \|x\| = 0 \iff x = 0$

Homogenität $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$

Dreiecksungleichung $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

$$l_1\text{-Norm} \quad \|x\|_1 = |x_1| + \dots + |x_n|$$

$$l_p\text{-Norm} \quad \|x\|_p = \sqrt[p]{x_1^p + \dots + x_n^p}$$

$$\text{Maximum-Norm} \quad \|x\|_\infty = \max\{|x_i| : i = 1, \dots, n\}$$

Satz Jede Norm induziert über $d(x, y) = \|x - y\|$ eine Metrik.

1.3 Bilinearform

Eine Funktion $\langle \cdot, \cdot \rangle_A : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt bilinearform, wenn sie in beiden Argumenten linear ist:

$$\langle \alpha x + \beta y, z \rangle_A = \alpha \langle x, z \rangle_A + \beta \langle y, z \rangle_A$$

$$\langle z, \alpha x + \beta y \rangle_A = \alpha \langle z, x \rangle_A + \beta \langle z, y \rangle_A$$

Weitere, mögliche Eigenschaften:

$$\text{Symmetrie: } \forall x, y \in \mathbb{R}^n : \langle x, y \rangle_A = \langle y, x \rangle_A$$

$$\text{Positive Definitheit: } \forall x \in \mathbb{R}^n \wedge x \neq 0 : \langle x, x \rangle_A > 0$$

Jede Quadratische Matrix B erzeugt eine Bilinearform über $x^T B y$

1.4 Topologie in \mathbb{R}^n

Offene Kugel mit Radius r um a:

$$U_R(a) := \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - a\| < r\}$$

Innerer Punkt $a \in A \subseteq \mathbb{R}^n : \exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \subseteq A$

Offenes Intervall: Jeder Punkt ist innerer Punkt:

$$\forall a \in A : \exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \subseteq A \quad \text{bsp: } \mathbb{R}^n, \{\}, U_r(a)$$

Abgeschlossenes Intervall: Komplement ist offen

$$\text{bsp: } \mathbb{R}^n, \{\}$$

Beschränkt: $\exists M \in \mathbb{R} : A \subset U_M(0)$

Kompakt: Abgeschlossen und beschränkt

Mengenoperationen

$$(U \cup V)^C = U^C \cap V^C$$

$$(U \cap V)^C = U^C \cup V^C$$

1.5 Folgen in \mathbb{R}^n

Konvergenz:

$$\exists g \in \mathbb{R}^n : \forall \varepsilon > 0 : \exists M \in \mathbb{N} : \forall m \geq M : \|a_m - g\| < \varepsilon$$

Mehrdimensionale Konvergenz: Konvergiert genau dann, wenn alle Komponenten gegen den jeweiligen Wert konvergieren.

Cauchyfolge:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists M \in \mathbb{N} : \forall s, m \geq M : \|a_s - a_m\| < \varepsilon$$

Banachraum: Jede Cauchyfolge konvergiert und die Metrik wird durch eine Norm induziert

$$\text{Bsp: } \mathbb{R}^n \text{ mit } l_p\text{-Norm}$$

1.6 Funktionen

Graph von $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$:

$$\Gamma_f := \{(x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_m) \in D \times \mathbb{R}^m : z_i = f_i(x_1, \dots, x_n)\}$$

Höhen/Niveaulinie von $f : D \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$

$$H_c(f) := \{(x, y) \in D \mid f(x, y) = c\}$$

Niveaulinie von $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$:

$$H_c(f) := \{(x_1, \dots, x_n) \in D \mid f(x_1, \dots, x_n) = c\}$$

Eindimensionaler Schnitt

$$f(a_1, \dots, a_{i-1}, x_i, a_{i+1}, a_n) \text{ mit } a_k \text{ konst.}$$

Kurve

Ist $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Funktion mit $f(x_1, \dots, x_n)$, dann ist $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Kurve im \mathbb{R}^n und $f(\phi(t))$ die Funktion entlang dieser Kurve.

Stetigkeit von Funktionen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ($\varepsilon - \delta$ -Kriterium) Eine Funktion ist stetig in einem Punkt a, gdw. Gilt: $\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \|x - a\| < \delta \implies \|f(x) - f(a)\| < \varepsilon$

Satz Eine Funktion $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ist genau dann stetig in $a \in D$, wenn dies für die Funktionen f_1, \dots, f_m gilt.

Polynom in n Variablen vom Grad m

$$\sum_{i=0}^m \sum_{\substack{\alpha \in \mathbb{N}_0^n \\ |\alpha|=i}} a_\alpha x_1^{\alpha_1} \dots x_n^{\alpha_n}$$

mit $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ Multiindex, $a_\alpha \in \mathbb{R}$ (Vorfaktoren) und $|\alpha| = \alpha_1 + \dots + \alpha_n$.

2 Differenzierbarkeit in \mathbb{R}^n

2.1 Ableitungsregeln in \mathbb{R}^1

Linearität $(f + g)' = f' + g' \quad (c \cdot f)' = c \cdot f'$

Produktregel $(f \cdot g)' = f' \cdot g + f \cdot g'$

Quotientenregel $(f/g)' = \frac{f' \cdot g - f \cdot g'}{g^2}$

Kettenregel $(f \circ g)'(x) = f'(g(x)) \cdot g'(x)$

Potenzregel $(x^n)' = n x^{n-1}$

Ableitung des Logarithmus $(\ln(f(x)))' = \frac{f'(x)}{f(x)}$

Ableitung der Sinusfunktion $(\sin(f(x)))' = f'(x) \cdot \cos(f(x))$

Ableitung der Kosinusfunktion $(\cos(f(x)))' = -f'(x) \cdot \sin(f(x))$

Weitere

$$\left(\frac{1}{x}\right)' = \frac{-1}{x^2}$$

$$(\ln(x))' = \frac{1}{x}$$

$$\arctan(x)' = \frac{1}{x^2+1}$$

$$\arccos(x)' = \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$\arcsin(x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

2.2 Richtungsableitungen

Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Gebiet und $e \in \mathbb{R}^n$ eine Richtung mit $\|e\| = 1$. Dann heißt eine Funktion $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ im Punkt $a \in D$ **in Richtung e differenzierbar**, wenn der Grenzwert

$$\frac{\partial}{\partial e} f(a) := \partial_e f(a) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a+te) - f(a)}{t} \text{ existiert.}$$

Satz Sei $f : D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Dann ist f in $x_0 = (x_1^0, \dots, x_n^0) \in D$ genau dann in Richtung e differenzierbar, wenn die Funktion $\varphi_e(t) := f(x_0 + te)$ im Punkt $t_0 = 0$ nach t differenzierbar ist. Weiter ist die Ableitung von f im Punkt x_0 in Richtung e gleich der Ableitung von $\varphi_e(t)$ im Punkt $t_0 = 0$.

2.3 Die Ableitung

Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Gebiet, dann heißt $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ differenzierbar in $a \in D$, wenn es $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ gibt mit

$$\lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|f(a+h) - f(a) - Lh\|}{\|h\|} = 0$$

Jacobimatrix & Hessematrix

$$f : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n; J_f(a) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_k} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times k}$$

$$H_f(a) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{bmatrix}$$

Tangentialebene an Punkt a $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

$$T(x) = f(a) + \nabla f(a) \cdot (x - a) \text{ mit } x, a \in \mathbb{R}^n \text{ beziehungsweise}$$

$$T(x_1, \dots, x_n) = f(a_1, \dots, a_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(a_1, \dots, a_n) \cdot (x_i - a_i)$$

Gradient $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

$$\text{grad}(f) = \nabla f = J_f^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

Divergenz $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$\text{div}(f) = \nabla f := \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_i}$$

Rotation: $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$\nabla \times f(a) := \left(\frac{\partial f_3}{\partial x_2}(a) - \frac{\partial f_2}{\partial x_3}(a), \frac{\partial f_1}{\partial x_3}(a) - \frac{\partial f_3}{\partial x_1}(a), \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(a) - \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(a) \right)$$

Lokale Auflösung / Satz von der impliziten Funktion

Sei $f : D \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ stetig differenzierbar, $(a, b) \in D$ mit $f(a, b) = 0$ und $\frac{\partial f}{\partial y}(a, b) \neq 0$. Dann existiert eine offene Umgebung I von a und eine eindeutig bestimmte, stetig differenzierbare Funktion $h : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $h(a) = b$, sodass

$$f(x, h(x)) = 0 \quad \text{für alle } x \in I$$

und es gibt ein $c > 0$, sodass für alle $(x, y) \in D$ mit $\|(x, y) - (a, b)\| < c$ und $f(x, y) = 0$ gilt: $y = h(x)$.

Taylorpolynome

$$T(a+h) = f(a) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(a) \cdot h_i \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(a) \cdot h_i h_j \right) + R$$

$$T(a+h) = f(a) + J_f(a)h + \frac{1}{2} h^T H_f(a)h + R \cdot (x_1^2, \dots, x_n^2)$$

2.4 Analysis

Sattelpunkt in a
Erforderliche Eigenschaft: J_f(a) = 0
Hinreichende Eigenschaft: det(H_f(a)) < 0
Maximum
Erforderliche Eigenschaft: J_f(a) = 0
Hinreichende Eigenschaft:
det(H_f(a)) > 0 und H_f(a) negativ definit (z.B. d^2f/d^2x < 0)
Minimum
Erforderliche Eigenschaft: J_f(a) = 0
Hinreichende Eigenschaft:
det(H_f(a)) > 0 und H_f(a) positiv definit (z.B. d^2f/d^2x > 0)

2.5 Lagrange-Funktion

Funktion f(x,y) = x^4 + y^5
Nebenbedingung 30 = 2x + 2y <=> g(x,y) = 30 - 2x - 2y = 0
Lagrange-Funktion L(x,y,lambda) = f(x,y) - lambda g(x,y)
Vorgehen L(x,y,lambda) jeweils nach x,y,lambda ableiten und daraus auflosen

3 Mehrdimensionale Integrale

Unbestimmte Integrale in R
integral x sin(x) dx = -x cos(x) + sin(x) + C
integral cos(2x) dx = 1/2 sin(x/2) + C
integral cos(x) dx = sin(x) + C
integral sin(x) dx = -cos(x) + C
integral 1/x dx = ln(x) + C
integral x e^x^2 dx = e^x^2/2
integral f'(x) * g(x) dx = [f(x) * g(x)]_a^b - integral f(x) * g'(x) dx

4 Differenzialgleichungen

Homogene DGs 1. Ordnung: Trennung der Variablen

dx/dt = f(t)g(x)
integral 1/g(x) dt = integral f(t) dt

-> Nach x auflösen
Nichthomogene DGs 1. Ordnung
Sei dx/dt = ax + g(t) Differenzialgleichung und x_h(t) Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung
dx/dt = ax, dann ist alpha x_h + x_p eine Lösung für die Diffentialgleichung.
Beispiel Bestimmung von x_p:

dx/dt = 2x - 4t^2 - 4t + 2

Dann haben x_p, x'_p die Form

x_p = c_2 t^2 + c_1 t + c_0 und x'_p = 2c_2 t + c_1

Einsetzen

x_p - x'_p = (-4t^2 - 4t + 2)

(2c_2 t + c_1) - 2(c_2 t^2 + c_1 t + c_0) = (-4t^2 - 4t + 2)

-> Auflösen nach c_1, c_2, c_3

Homogene DGs 2. Ordnung dx/dt = ax + b
Ansatz: x = e^lambda t
Charakteristisches Polynom: (lambda^2 - b lambda - a) e^lambda t
Nullstellen finden und Lambda einsetzen
Allgemeiner Ansatz für lineare DGLs mit konstanten Koeffizienten
Ausgangspunkt: x^(n) = sum_{i=0}^{n-1} a_i x^(i)
Charakteristisches Polynom: lambda^n - sum_{i=0}^{n-1} a_i lambda^i

P(lambda) = lambda^n - sum_{i=0}^{n-1} a_i lambda^i
= product_{k=1}^{m_1} (lambda - lambda_k)^{s_k} + product_{k=m_1+1}^{m_1+m_2} ((lambda - lambda_k)(lambda - lambda_k_bar))^{s_k}
Reelle Nullstellen Komplexe Nullstellen
lambda_k = x_k + y_k i

Lösungsbasis:

e^{lambda_1 t}, t e^{lambda_1 t}, ..., t^{s_1-1} e^{lambda_1 t}
e^{lambda_2 t}, t e^{lambda_2 t}, ..., t^{s_2-1} e^{lambda_2 t}
...
e^{lambda_{m_1} t}, t e^{lambda_{m_1} t}, ..., t^{s_{m_1}-1} e^{lambda_{m_1} t}
e^{x_{m_1+1} t} * cos(y_{m_1+1} t), e^{x_{m_1+1} t} * sin(y_{m_1+1} t)
...
t^{s_{m_1+1}-1} e^{x_{m_1+1} t} * cos(y_{m_1+1} t), ... sin(y_{m_1+1} t)
...
e^{x_{m_1+m_2} t} * cos(y_{m_1+m_2} t), ... sin(y_{m_1+m_2} t)
...
t^{s_{m_1+m_2}-1} e^{x_{m_1+m_2} t} * cos(y_{m_1+m_2} t), ... sin(y_{m_1+m_2} t)

Annahme / Raten: Es gilt: Sei grad(k) Grad der Nullstelle k und b > 0
o.b.d.a., dann gilt:

{t^q e^{lambda t} | P(lambda) = 0 and lambda in R, t < grad(lambda)}
union {t^q e^{a t} sin(b t) | P(a + bi) = 0 and t < grad(a + bi)}
union {t^q e^{a t} cos(b t) | P(a + bi) = 0 and t < grad(a + bi)}

Substitution Sei dx/dt = f(at + bx + c) Differentialgleichung. Substituiere
u = at + bx + c -> du/dt = a + b * dx/dt = a + b f(u)
Substitution -> Lösen der DG -> Rücksubstitution. Beispiel:

dx/dt = 2t - x, x(1) = 2
u(t) = 2t - x
u'(t) = 2 - u(t) = h(t)g(u)
h(t) = 1, g(u) = 2 - u
u(1) = 2 * 1 - 2 + 0 = 0

integral 1/(2-u) du = integral 1 dt
-ln(2-u) + a = t c_1 - c_2 = a
ln(2-u) = a - t

u = 2 - e^{a-t} -> a = ln(2) | u(1) = 0
x = 2t - u <- u = 2t - x
x = 2t - 2 + 2e^{-t}

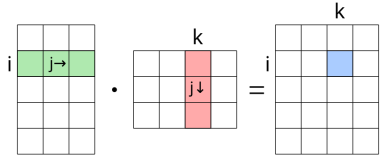
3 Anhang

Matrixindizes
[a_11 a_12 ... a_1n
a_21 a_22 ... a_2n
...
a_m1 a_m2 ... a_mn] in R^{m x n}

Inverse Matrix
[a b]^-1 = 1/(ad-bc) [d -b
c a]

Determinante
det([a b c
d e f
g h i]) = aei + bfg + cdh - ceg - bdi - afh
det([a b
c d]) = ad - bc

Matrixmultiplikation



c_{ik} = sum_{j=1}^n a_{ij} * b_{jk}
abc-Formel f(x) = ax^2 + bx + c = 0
x_{1,2} = (-b +/- sqrt(b^2 - 4ac)) / (2a)
pq-formel f(x) = x^2 + px + q
x_{1,2} = -p/2 +/- sqrt((p/2)^2 - q)