

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. $\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} < 0$)

Minimum

- Erforderliche Eigenschaft: $J_f(a) = 0$
- Hinreichende Eigenschaft:
 $\det(H_f(a)) > 0$ und $H_f(a)$ positiv definit (z.B. $\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} > 0$)

2.5 Lagrange-Funktion

Funktion $f(x,y) = x^4 + y^5$
Nebenbedingung $30 = 2x + 2y \iff g(x,y) = 30 - 2x - 2y = 0$
Lagrange-Funktion $\mathcal{L}(x,y,\lambda) = f(x,y) - \lambda g(x,y)$
Vorgehen $\mathcal{L}(x,y,\lambda)$ jeweils nach x,y,λ ableiten und daraus auflösen

3 Mehrdimensionale Integrale

Unbestimmte Integrale in R

- $\int x \sin(x) dx = -x \cos(x) + \sin(x) + C$
- $\int \cos(2x) dx = \frac{1}{2} \sin(\frac{x}{2}) + C$
- $\int \cos(x) dx = \sin(x) + C$
- $\int \sin(x) dx = -\cos(x) + C$
- $\int \frac{1}{x} dx = \ln(x) + C$
- $\int x e^{x^2} dx = \frac{e^{x^2}}{2}$
- $\int f'(x) \cdot g(x) dx = [f(x) \cdot g(x)]_a^b - \int f(x) \cdot g'(x) dx$

4 Differenzialgleichungen

Homogene DGs 1. Ordnung: Trennung der Variablen

$\dot{x} = f(t)g(x)$
 $\int \frac{1}{g(x)} dt = \int f(t) dt$

→ Nach x auflösen
Nichthomogene DGs 1. Ordnung Sei $\dot{x} = ax + g(t)$ Differenzialgleichung und $x_h(t)$ Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung $\dot{x} = ax$, dann ist $\alpha x_h + x_p$ eine Lösung für die Diffentialgleichung.
Beispiel Bestimmung von x_p :

$\dot{x} = 2x - 4t^2 - 4t + 2$

Dann haben x_p, \dot{x}_p die Form

$x_p = c_2 t^2 + c_1 t + c_0 \quad \text{und} \quad \dot{x}_p = 2c_2 t + c_1$

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 $\ddot{x} = ax + b\dot{x}$

- 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 koef-fizienten

- Ausgangspunkt: $x^{(n)} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i x^{(i)}$
- Charakteristisches Polynom: $\lambda^n - \sum_{i=0}^{n-1} a_i \lambda^i$

$$P(\lambda) = \lambda^n - \sum_{i=0}^{n-1} a_i \lambda^i$$

$$= \underbrace{\prod_{k=1}^{m_1} (\lambda - \lambda_k)^{s_k}}_{\text{Reelle Nullstellen}} + \underbrace{\prod_{k=m_1+1}^{m_1+m_2} ((\lambda - \lambda_k)(\lambda - \overline{\lambda_k}))^{s_k}}_{\substack{\text{Komplexe Nullstellen} \\ \lambda_k = x_k + y_k i}}$$

Lösungsbasis:

$$\begin{aligned} & e^{\lambda_1 t}, t e^{\lambda_1 t}, \dots, t^{s_1-1} e^{\lambda_1 t} \\ & e^{\lambda_2 t}, t e^{\lambda_2 t}, \dots, t^{s_2-1} e^{\lambda_2 t} \\ & \vdots \\ & e^{\lambda_{m_1} t}, t e^{\lambda_{m_1} t}, \dots, t^{s_{m_1}-1} e^{\lambda_{m_1} t} \\ & e^{x_{m_1+1} t} \cdot \cos(y_{m_1+1} t), e^{x_{m_1+1} t} \cdot \sin(y_{m_1+1} t) \\ & \vdots \\ & t^{s_{m_1+1}-1} e^{x_{m_1+1} t} \cdot \cos(y_{m_1+1} t), \dots \sin(y_{m_1+1} t) \\ & \vdots \\ & e^{x_{m_1+m_2} t} \cdot \cos(y_{m_1+m_2} t), \dots \sin(y_{m_1+m_2} t) \\ & \vdots \\ & t^{s_{m_1+m_2}-1} e^{x_{m_1+m_2} t} \cdot \cos(y_{m_1+m_2} t), \dots \sin(y_{m_1+m_2} t) \end{aligned}$$

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

$\{t^q e^{\lambda t} \mid P(\lambda) = 0 \wedge \lambda \in \mathbb{R}, t < \text{grad}(\lambda)\}$
 $\cup \{t^q e^{at} \sin(bt) \mid P(a+bi) = 0 \wedge t < \text{grad}(a+bi)\}$
 $\cup \{t^q e^{at} \cos(bt) \mid P(a+bi) = 0 \wedge t < \text{grad}(a+bi)\}$

Substitution Sei $\dot{x} = f(at + bx + c)$ Differentialgleichung. Substituiere $u = at + bx + c \implies \dot{u} = a + b \cdot \dot{x} = a + bf(u)$
Substitution → Lösen der DG → Rücksubstitution. Beispiel:

$\dot{x} = 2t - x, x(1) = 2$
 $u(t) = 2t - x$
 $u'(t) = 2 - u(t) = h(t)g(u)$
 $h(t) = 1, g(u) = 2 - u$
 $u(1) = 2 \cdot 1 - 2 + 0 = 0$

$\int \frac{1}{2-u} du = \int 1 dt$
 $-\ln(2-u) + a = t \quad c_1 - c_2 = a$
 $\ln(2-u) = a - t$
 $u = 2 - e^{a-t} \rightarrow a = \ln(2) \mid u(1) = 0$
 $x = 2t - u \leftarrow u = 2t - x$
 $x = 2t - 2 + 2e^{-t}$

3 Anhang

Matrixindizes

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}$$

Inverse Matrix

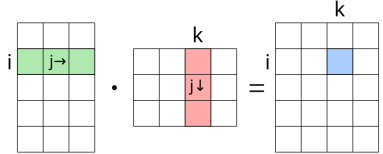
$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad-bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

Determinante

$$\det \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} = aei + bfg + cdh - ceg - bdi - afh$$

$$\det \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = ad - bc$$

Matrixmultiplikation



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