

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**
 $d(x, y) \geq 0$ und $d(x, y) = 0 \iff x = y$
- 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 Eisenbahnmeterik:

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

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 -Norm** $||x||_1 = |x_1| + \dots + |x_n|$
- l_p -Norm** $||x||_p = \sqrt[p]{|x_1|^p + \dots + |x_n|^p}$ mit $p \geq 1$
- Maximum-Norm** $||x||_\infty = \max\{|x_i| : i = 1, \dots, n\}$

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:

$$\begin{aligned} \langle \alpha x + \beta y, z \rangle_A &= \alpha \langle x, z \rangle_A + \beta \langle y, z \rangle_A \\ \langle z, \alpha x + \beta y \rangle_A &= \alpha \langle z, x \rangle_A + \beta \langle z, y \rangle_A \end{aligned}$$

Weitere, mögliche Eigenschaften:

- Symmetrie:** $\forall x, y \in \mathbb{R}^n : \langle x, y \rangle_A = \langle y, x \rangle_A$
- 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:
 $\forall a \in A : \exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \subseteq A$ bsp: $\mathbb{R}^n, \{\}, U_r(a)$

Abgeschlossenes Intervall: Komplement ist offen
bsp: $\mathbb{R}^n, \{\}$

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

Kompakt: Abgeschlossen und beschränkt

- Mengenoperationen**
 $(U \cup V)^C = U^C \cap V^C$
 $(U \cap V)^C = U^C \cup V^C$

Die vier Quadranten

- I: $x \geq 0, y \geq 0$
- II: $x < 0, y \geq 0$
- III: $x < 0, y < 0$
- IV: $x \geq 0, y < 0$

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

Bsp: \mathbb{R}^n mit l_p -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 $f : D \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$

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

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

Linear $(f + g)' = f' + g'$ $(c \cdot f)' = c \cdot f'$ | **Produkt** $(f \cdot g)' = f' \cdot g + f \cdot g'$ | **Quot** $\left(\frac{f}{g}\right)' = \frac{f' \cdot g - f \cdot g'}{g^2}$ | **Ketten** $(f(g(x)))' = f'(g(x)) \cdot g'(x)$ |

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

Trig $(\sin(x))' = \cos(x)$ | $(\cos(x))' = -\sin(x)$ | $(\tan(x))' = 1 + \tan^2(x) = \frac{1}{\cos^2(x)}$ | $\arctan(x)' = \frac{1}{x^2+1}$ | $\arccos(x)' = \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}}$ | $\arcsin(x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$

Exp $(\ln(x))' = \frac{1}{x}$ | $(e^x)' = e^x$

Shortcuts $(a^x)' = \ln(a) \cdot a^x$ | $(\sqrt{x})' = \frac{1}{2\sqrt{x}}$ | $(\sqrt[n]{x})' = \frac{1}{n \cdot \sqrt[n]{x^{n-1}}}$ | $\left(\sqrt{f(x)}\right)' = \frac{f'(x)}{2\sqrt{f(x)}}$ | $\left(\frac{1}{x^2}\right)' = -\frac{2}{x^3}$ | $(\ln(f(x)))' = \frac{f'(x)}{f(x)}$ | $((x^n f(x))' = nx^{n-1} f(x) + x^n f'(x))$

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

$$\frac{\partial}{\partial e} f(a) := \partial_e f(a) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a+te) - f(a)}{t}$$
 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 $t_0 = 0$.

Mit Jacobimatrix In Punkt a in Richtung e ist $J_f(a) \cdot e$

Mit Phi Im Punkt (x, y) in Richtung $e = (a, b)$

$$\phi_{(a,b)}(t) = f(x + ta, y + tb)$$
 Dann $\phi'_{(a,b)}(t) = 0$

Mit Grenzwert Im Punkt (x, y) in Richtung $e = (a, b)$

$$\frac{\partial f}{\partial e}((x, y)) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f((x, y) + te) - f((x, y))}{t}$$

2.3 Die Ableitung

Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Gebiet, dann heißt $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ 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

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

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

Die Kettenregel Sei $h(x) = f(g(x)) = (f \circ g)(x)$

$$\text{Dann lautet } J_h(x) = J_f(g(x)) \cdot J_g(x)$$

Ableitung der Umkehrfunktion $g(f(x)) = x$ Sei $b = f(a)$, dann ist

$$J_g(b) = (J_f(a))^{-1} \rightarrow \text{Matrixinversion}$$

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

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

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

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

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

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: $y = h(x)$.

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

$$\text{grad}(f) = \nabla f = J_f^T = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^T \text{ (Transponieren !)}$$

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

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

Das totale Differential

Sei $f(x,y) = x^2y^4, x(t) = \cos(t), y(t) = e^t$, dann ist

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = -2xy^4 \sin(t) + 4x^2y^3e^t$$

Implizites Differenzieren $h'(x) = -\frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\frac{\partial f}{\partial y}}$

Taylorpolynome

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

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

Vektorraumdarstellung

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ f(x_0, y_0) \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ f_x(P) \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ f_y(P) \end{pmatrix}$$

2.4 Analysis

Sattelpunkt, Extrema: $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : f'(t) = 0$

$$\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} : \nabla f(t) = 0 \iff J_f(t) = 0 \text{ (Nullmatrix)}$$

Sattelpunkt in a $\det(H_f(a)) < 0$ wobei gilt

$$\text{sg} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} \right) \neq \text{sg} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial^2 y} \right)$$

Extrema $\det(H_f(a)) > 0$ und

Maximum: $H_f(a)$ negativ definit (z.B. $\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} < 0$)

Minimum: $H_f(a)$ 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 aufösen

3 Mehrdimensionale Integrale

Unbestimmte Integrale in \mathbb{R} **Bei Integralen + C nicht vergessen!**

Trig $\int x \sin(x) dx = -x \cos(x) + \sin(x) \mid \int \cos(2x) dx = \frac{1}{2} \sin(2x) \mid$
 $\int \sin^2(x) dx = \frac{1}{2} (x - \sin(x) \cos(x)) \mid \int \cos^2(x) dx = \frac{1}{2} (x + \sin(x) \cos(x)) \mid$
 $\int \cos(x) dx = \sin(x) \mid \int \sin(x) dx = -\cos(x) \mid$ **Pot** $\int \frac{1}{x} dx = \ln(|x|) \mid$
 $\int \frac{1}{ax+b} dx = \frac{1}{a} \ln(|ax+b|) \mid \int \frac{1}{x^2} dx = \frac{-1}{x} \mid \int \frac{1}{x^n} dx = \frac{x^{1-n}}{1-n} \mid \int \frac{1}{\sqrt{x}} dx =$

$$2\sqrt{x} \mid$$
 Exp $\int xe^{x^2} dx = \frac{e^{x^2}}{2} \mid \int xe^{ax} dx = \frac{e^{ax}}{a} \mid$ **Arc** $\int \frac{1}{\sqrt{a^2-x^2}} dx =$

$$\arcsin(\frac{x}{a}) \mid \int \frac{-1}{\sqrt{a^2-x^2}} dx = \arccos(\frac{x}{a}) \mid \int \frac{1}{x^2+a^2} dx = \frac{1}{a} \arctan(\frac{x}{a})$$

Partielle Integration

$$\int f'(x) \cdot g(x) dx = f(x) \cdot g(x) - \int f(x) \cdot g'(x) dx$$

Wahl von f: $\ln(x) > \arcsin(x) > x^n > \sin(x) > e^x$

Polarkoordinaten

$$(x,y) = (r \cos(\phi), r \sin(\phi))$$

$$\int_a^b \int_c^d f(x,y) dx dy = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{r_1(\phi)}^{r_2(\phi)} f(r \cos(\phi), r \sin(\phi)) \color{red}{r} dr d\phi$$

4 Differentialgleichungen

DGs 1. Ordnung $\dot{x} = ax + g(t)$ **Homogene DGs 1. Ordnung:**

Trennung der Variablen DG heißt homogen, wenn gilt: $g(t) = 0$

$$\dot{x} = f(t)h(x(t))$$

$$\int \frac{1}{h(s)} ds = \int f(t) dt$$

→ Nach x auflösen

Nichthomogene DGs 1. Ordnung Sei $\dot{x} = ax + g(t)$ Differentialgleichung und $x_h(t)$ Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung $\dot{x} = ax$, dann ist $\color{red}{\alpha}x_h + \color{red}{x_p}$ 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

$$\dot{x}_p - 2x_p = (-4t^2 - 4t + 2)$$

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

→ 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: $\lambda^n - \sum_{i=0}^{n-1} a_i \lambda^i$

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

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

Lösungsbasis:

Sei $\text{grad}(k)$ Grad der Nullstelle k und $b > 0$ o.b.d.a., dann gilt:

$$\{t^q e^{\lambda t} \mid P(\lambda) = 0 \wedge \lambda \in \mathbb{R}, t < \text{grad}(\lambda)\}$$

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

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

(Formell nicht ganz korrekt, aber hier anschaulicher)

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:

$$\dot{x} = 2t - x, x(1) = 2$$

$$u(t) = 2t - x$$

$$u'(t) = 2 - u(t) = h(t)g(u)$$

$$h(t) = 1, g(u) = 2 - u$$

$$u(1) = 2 \cdot 1 - 2 + 0 = 0$$

$$\int \frac{1}{2-u} du = \int 1 dt$$

$$-\ln(2-u) + a = t \quad c_1 - c_2 = a$$

$$\ln(2-u) = a - t$$

$$u = 2 - e^{a-t} \rightarrow a = \ln(2) \mid u(1) = 0$$

$$x = 2t - u \leftarrow u = 2t - x$$

$$x = 2t - 2 + 2e^{-t}$$

Standardlösungen $\dot{x} = nx \rightarrow x = e^{nt+k}$

5 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

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

$$\det \left(\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \right) = ad - bc$$

Matrixmultiplikation

$$\begin{matrix} & & & \\ & & & \\ \text{i} & \begin{matrix} \color{green}{\text{j} \rightarrow} \end{matrix} & & \\ & & & \\ & & & \end{matrix} \cdot \begin{matrix} & & \text{k} \\ & & \color{red}{\text{j} \downarrow} \\ & & \\ & & \\ & & \end{matrix} = \begin{matrix} & & \text{k} \\ & & \\ \text{i} & & \color{blue}{\phantom{\text{j}}} \\ & & \\ & & \end{matrix}$$

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot b_{jk}$$

abc-Formel $f(x) = ax^2 + bx + c = 0$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

pq-formel $f(x) = x^2 + px + q$

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$$