

Lineare Algebra S2

Raphael Nambiar

Version: 4. Juni 2022

Vektorgeometrie

Begriffe

Kollinear: Es existiert eine Gerade g , zu der beide Vektoren parallel sind.

Komplanar: Existiert eine Ebene e , zu der alle drei Vektoren parallel.

Ortsvektor: Beginnt im Ursprung. Schreibweise: $\vec{r}(P)$

Nullvektor: Vektor mit Betrag 0, keine Richtung.: $\vec{0}$

Betrag

$$|\vec{a}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Skalarprodukt

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\varphi)$$
$$\cos(\varphi) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \rightarrow \arccos\left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}\right)$$

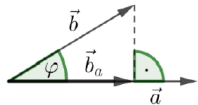
Orthogonal

Wenn zwei Vektoren senkrecht zueinander sind.

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$

Orthogonale Projektion

Projektion des Vektors \vec{b} auf den Vektor \vec{a} .



$$\vec{b}_a = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a}$$

$$|\vec{b}_a| = \frac{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}{|\vec{a}|}$$

$$|\vec{b}_a| = |\vec{a}| \cdot \cos(\varphi)$$

Zwischenwinkel

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}\right)$$

Einheitsvektor

$$\vec{e}_a = \frac{1}{|\vec{a}|} \cdot \vec{a}; |\vec{e}_a| = 1$$

Vektorprodukt / Kreuzprodukt

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix}$$

$$|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\alpha)$$

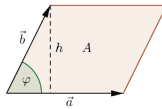
$\vec{a} \times \vec{b}$ ist orthogonal zu \vec{a} und zu \vec{b}

Kreuzprodukt in R²

Seien a und b zwei Vektoren, dann gilt für das Kreuzprodukt in R^2 :

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix}$$
$$\vec{a} \times \vec{b} = \det(\vec{a} \vec{b}) = \begin{vmatrix} a_x & b_x \\ a_y & b_y \end{vmatrix} = a_x \cdot b_y - b_x \cdot a_y$$

Fläche / Parallelogramm



$$|\vec{a} \times \vec{b}| = A$$

Dreieck = $\frac{1}{2} A$

Volumen / Spatprodukt

Das Spatprodukt der drei Vektoren $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$, $\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$ und $\vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$

berechnest du mit

- $(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}$ oder mit
- der Determinante $\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$ Volumen: \rightarrow | Betrag nehmen |

Geraden

Parameterdarstellung

$$g: \vec{r}(P) + \lambda \cdot \vec{a}$$

P: Aufpunkt

$\vec{a} = \vec{PQ}$; = Richtungsvektor

Koordinatendarstellung

$$g: ax + by + c = 0$$

Koordinatendarstellung zu Parameterdarstellung

Zwei Punkte auf g bestimmen: 2 beliebige x Koordinaten wählen und in g einsetzen. Danach jeweils y auslesen. Dies ergibt zwei Punkte P, Q . In Parameterdarstellung bringen.

Parameterdarstellung zu Koordinatendarstellung

$$\text{Gerade } g: \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Gleichungssystem aufstellen und Lösen:

$$x = 7 - 2\lambda$$

$$y = 1 - 4\lambda$$

In Koordinatendarstellung bringen: $-2x + y + 13 = 0$

Abstand Punkt zu Geraden

$$\text{Gerade } g: \begin{pmatrix} 1 \\ 13 \\ -5 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Punkt A: $(3, -1, 4)$

$$\vec{PA} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 13 \\ -5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -14 \\ 9 \end{pmatrix}$$

$$l = \frac{|\vec{PA} \times \vec{a}|}{|\vec{a}|}$$

$\vec{a} \Rightarrow$ aus der Parameterdarstellung

Ebene

Normalenvektor der Ebene (orthogonal zur Ebene)

Auf der Ebene E senkrecht stehender Vektor \vec{n} .

$$\vec{n} = \vec{a} \times \vec{b}$$

Parameterdarstellung

$$E: \vec{r}(P) + \lambda \cdot \vec{a} + \mu \cdot \vec{b}$$

P: Aufpunkt

$\vec{a} = \overrightarrow{PQ}$; $\vec{b} = \overrightarrow{PR}$ = Richtungsvektoren

Koordinatendarstellung

$$E: ax + by + cz + d = 0$$

Parameterdarstellung zu Koordinatendarstellung

$$E: \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ -4 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ -4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -14 \\ 6 \\ -4 \end{pmatrix}$$

② Koordinatendarstellung $E: -14x + 6y - 4z + d = 0$

③ Aufpunkt einsetzen: $\begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow E: -14 \cdot 2 + 6 \cdot 4 - 4 \cdot 1 + d = 0$

④ d ausrechnen: $E: -14 \cdot 2 + 6 \cdot 4 - 4 \cdot 1 + d = 0 \Rightarrow d = 8$

⑤ $E: -14x + 6y - 4z + 8 = 0$
 $\Rightarrow \frac{-14x + 6y - 4z + 8 = 0}{2} \Rightarrow E: -7x + 3y - 2z + 4 = 0$

Koordinatendarstellung zu Parameterdarstellung

Wir bestimmen drei beliebige Punkte auf E , indem wir die x - und y -Koordinaten frei wählen und die zugehörigen z -Koordinaten aus der Koordinatendarstellung von E berechnen. Aus diesen drei Punkten können wir dann eine Parameterdarstellung von E gewinnen.

$$E: 2x + 7y - 4z + 1 = 0$$

$$\begin{aligned} x=0, y=0 & \quad -4z+1=0 \Rightarrow z=1/4 \Rightarrow P=(0;0;1/4) \\ x=1, y=0 & \quad 2-4z+1=0 \Rightarrow z=3/4 \Rightarrow Q=(1;0;3/4) \\ x=0, y=1 & \quad 7-4z+1=0 \Rightarrow z=2 \Rightarrow R=(0;1;2) \end{aligned}$$

$$\text{Eine mögliche Parameterdarstellung der Ebene } E: \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/4 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1/2 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Abstand Punkt zu Ebene

$$\text{Abstand } l = \frac{|ax_A + bx_A + cz_A + d|}{|\vec{n}|}$$

$$\text{Ebene } E: 3x - 6y - 2z + 67 = 0$$

$$\text{Punkt } A = (3, -4, 1)$$

① \vec{n} bestimmen: $\begin{pmatrix} 3 \\ -6 \\ -2 \end{pmatrix} \sqrt{3^2 + (-6)^2 + (-2)^2} = 7$

② $l = \frac{(3 \cdot 3) - (6 \cdot (-4)) - (2 \cdot 1)}{7} = 14$

normierte Koordinatendarstellung der Ebene

$$E: 2x + 7y - 4z + 1 = 0$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 2 \\ -6 \\ 3 \end{pmatrix} \quad |\vec{n}| = \sqrt{2^2 + (-6)^2 + 3^2} = \sqrt{49} = 7$$

normierte Koordinatendarstellung der Ebene

$$E: \frac{2}{7} \cdot x - \frac{6}{7} \cdot y + \frac{3}{7} \cdot z + \frac{4}{7} = 0$$

Linearen Gleichungssysteme

Rang

Matrix muss in Zeilenstufenform sein.

$rg(A)$ = Gesamtanzahl Zeilen - Anzahl Nullzeilen .

$$A = \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 6 & 4 \\ 0 & 3 & 2 \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 6 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \Rightarrow \begin{matrix} \text{rang}(A) = 2 \\ \text{rang}(A|b) = 2 \end{matrix}$$

A

Lösbarkeit von LGS

n = Anzahl Spalten (Variablen)

Das LGS $A \cdot \vec{x} = \vec{c}$ ist genau dann lösbar, wenn $rg(A) = rg(A | \vec{c})$.

Es hat genau eine Lösung, falls zusätzlich gilt: $rg(A) = n$.

Es hat unendlich viele Lösungen, falls zusätzlich gilt: $rg(A) < n$.

Freie Variable

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

freie Variable λ_3

Lösungsmenge: λ_3 = kann beliebig gewählt werden, ∞ -viele Lösungen.

Vektorräume

Unterräume

Eine Teilmenge U eines Vektorraums V heisst Unterraum von V wenn U selber auch ein Vektorraum ist.

Unterraumkriterien

- (1) Für beliebige Elemente $\vec{a}, \vec{b} \in U$ ist $\vec{a} + \vec{b} \in U$.
- (2) Für jeden Skalar $\lambda \in \mathbb{R}$ und jeden Vektor $\vec{a} \in U$ ist $\lambda \cdot \vec{a} \in U$.

Unterraumkriterien überprüfen

(a) Ja, Vektorraum

$$1. \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & b_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 & 0 \\ 0 & b_1 + b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} \in M_1$$

$$2. \lambda \cdot \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda \cdot a & 0 \\ 0 & \lambda \cdot b \end{pmatrix} \in M_1$$

$$\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} \text{ Nein} \rightarrow \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & b_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 & 1 \\ 1 & b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 & 2 \\ 2 & b_1 + b_2 \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} a & 1 \\ 1 & b \end{pmatrix}.$$

Linearkombination

Stellen Sie $\vec{d} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}$ als Linearkombination von

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ dar.}$$

$$\text{Gesucht sind } \lambda, \mu \text{ und } \nu \text{ mit } \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Lineareabhängigkeit prüfen

Quadratische Matrix:

$\det(a) = 0 \Rightarrow$ Lineare Abhängigkeit

$\det(a) \neq 0 \Rightarrow$ Lineare Unabhängigkeit

Nicht Quadratische Matrix:

Vektoren nebeneinander in eine Matrix schreiben \rightarrow Gauss

Nullzeile oder -Spalte in der Matrix \Rightarrow Lineare Abhängigkeit der Vektoren

Keine Nullzeile oder -Spalte in der Matrix \Rightarrow Lineare Unabhängigkeit der Vektoren.

Linearer Spann (Lineare Hülle)

Diese Menge besteht aus allen Vielfachen der Vektoren und deren Summen, ist also die Menge aller möglichen Linearkombinationen, die mit den gegebenen Vektoren gebildet werden können.

$\text{span}(\vec{a}, \vec{b}) =$ Ebene

$\text{span}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}) =$ eine Gerade mit Aufpunkt.

Dimension

Wir betrachten einen reellen Vektorraum V . Die Anzahl Vektoren, die eine Basis von V bilden, heisst *Dimension* von V .

Bezeichnung: $\dim(V)$

Beispiele:

Vektorraum $\{\vec{0}\} \rightarrow \dim 0$

$$\dim(\text{span}(\vec{a}, \vec{b})) = 2$$

$$\dim(R^{2 \times 2}) = 2$$

$$\dim = \text{rg}(A)$$

$$\dim(R^{3 \times 3}) = 2$$

Erzeugendensystem

Eine Menge von Vektoren heisst Erzeugendensystem, wenn man mit ihnen alle Vektoren eines Vektorraumes durch Linearkombination erzeugen kann.

Menge von Vektoren auf Erzeugendeneigenschaft überprüfen

\rightarrow Bestimmung des Rangs $\text{rg}(A)$

Wenn $\text{rg}(A) < \text{Anzahl Zeilen}(m) \rightarrow$ kein Erzeugendensystem

Basis eines Vektorraums

Eine Basis eines Vektorraumes ist ein "minimales Erzeugendensystem" des Vektorraumes. Die Vektoren einer Basis nennt man Basisvektoren.

Überprüfung, ob eine Menge von Vektoren eine Basis ist
Quadratische Matrix $\rightarrow \det(A) \neq 0$

Generell:

① Die Anzahl der Vektoren stimmt überein mit der Dimension des Vektorraumes.

② Die Vektoren sind linear unabhängig.

Wichtige Basen

Für R^n : Basis S heisst *Standardbasis*

Für $P_n[x]$: Basis M heisst *Monombasis*

Umrechnung von Basis B zur Standardbasis S

$$\vec{a} = a_1 \cdot \vec{b}_1 + a_2 \cdot \vec{b}_2 + a_3 \cdot \vec{b}_3 \dots + a_n \cdot \vec{b}_n$$

$$\text{Beispiel: } {}_B = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \right\}$$

$(7, -3, -1)$ von B nach S

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} 7 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix}_B = 7 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_S - 3 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}_S + 1 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}_S = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix}_S$$

Umrechnung von Standardbasis S zur Basis B

LGS bilden:

$$\text{Beispiel: } {}_B = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \right\}$$

$(2, -1, 3)$ von S nach B

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 3 & 2 \\ 0 & 2 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 3 & 3 \end{array} \right) \downarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}_B$$

Lineare Abbildungen

Definition: Lineare Abbildung

Gegeben sind zwei reelle Vektorräume V und W (können auch identisch sein).

Eine Abbildung $f : V \rightarrow W$ heisst *lineare Abbildung*, wenn für alle Vektoren $\vec{x}, \vec{y} \in V$ und jeden Skalar $\lambda \in \mathbb{R}$ gilt:

$$(1) f(\vec{x} + \vec{y}) = f(\vec{x}) + f(\vec{y})$$

$$(2) f(\lambda \cdot \vec{x}) = \lambda \cdot f(\vec{y})$$

Der Vektor $\vec{x} \in W$, der herauskommt, wenn f auf einen Vektor \vec{x} angewendet, heisst **Bild** von \vec{x} .

Beispiele:

$$(a) f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2: \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \checkmark \quad \text{↯}$$

$$(c) f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2: \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

$$(e) f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2: \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 2x_1 - x_2 \\ -3x_1 + 5x_3 \end{pmatrix}$$

$$(a) \text{ Bed 1: } f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = f\left(\begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) + f\left(\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{o.k.}$$

$$\text{Bed 2: } f\left(\lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = f\left(\begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 \\ \lambda \cdot x_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$\lambda \cdot f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = \lambda \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{o.k.} \Rightarrow f \text{ ist linear.}$$

$$(b) \text{ Bed 1: } f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = f\left(\begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 + 2 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}$$
$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) + f\left(\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x_1 + 2 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 + 2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 + 4 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}$$

nicht gleich $\Rightarrow f$ ist nicht linear

$$(c) \text{ Bed 1: } f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = f\left(\begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 + 2(x_2 + y_2) \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}$$
$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) + f\left(\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 + 2y_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 + y_1 + 2y_2 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix}$$

o.k.

$$\text{Bed 2: } f\left(\lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = f\left(\begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 \\ \lambda \cdot x_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 + 2\lambda \cdot x_2 \\ \lambda \cdot x_2 \end{pmatrix}$$
$$\lambda \cdot f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda \cdot (x_1 + 2x_2) \\ \lambda \cdot x_2 \end{pmatrix} \quad \text{o.k.} \Rightarrow f \text{ ist linear.}$$

Abbildungsmatrix

lineare Abbildungen in der Ebene

linearen Abbildungen im Raum

Rotationen

Kern einer Matrix

Bild eine Matrix