

## Lösungen Serie 1

---

Entscheiden Sie bei den folgenden 9 Aufgaben, ob die angegebene Funktion  $f$  linear ist oder nicht.

1.  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, (x, y)^\top \mapsto (x + y, 2x, 0)^\top$

✓ (a)  $f$  ist linear

(b)  $f$  ist nicht linear

Eine Abbildung  $f : V \rightarrow W$  zwischen zwei reellen Vektorräumen  $V$  und  $W$  heisst linear, falls für alle  $x, y \in V$  und  $\alpha \in \mathbb{R}$  gilt

- $f(x + y) = f(x) + f(y)$ ,
- $f(\alpha x) = \alpha f(x)$ .

Für eine Abbildung der Form

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, v \mapsto Av,$$

wobei  $A$  eine  $m \times n$ -Matrix ist, sind diese Eigenschaften erfüllt. Diese erste Abbildung und die dritte, vierte und fünfte Abbildung sind von dieser Form für die Matrizen

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}, (0), (1).$$

Daher sind diese Abbildungen linear.

2.  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, (x, y)^\top \mapsto (x + y, 2x, 1)^\top$

(a)  $f$  ist linear

✓ (b)  $f$  ist nicht linear

Jede lineare Abbildung muss Null auf Null abbilden. Also  $f(0_V) = 0_W$  für ein Abbildung  $f : V \rightarrow W$  ( $V, W$  seien Vektorräume und  $0_V, 0_W$  die jeweiligen Nullvektoren). Denn Linearität (siehe Aufgabe 1) bedingt u.a.  $f(0) = f(0+0) = f(0) + f(0)$  und, nach Subtraktion von  $f(0)$ , ergibt dies  $f(0) = 0$ . Für die vorliegende Abbildung (und die sechste und achte Abbildung) ist dies nicht erfüllt. Wir rechnen nach:  $f(0) = (0, 0, 1)^\top \neq 0 = (0, 0, 0)^\top$ ; die Abbildung ist also nicht linear.

**3.**  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

- ✓ (a)  $f$  ist linear  
(b)  $f$  ist nicht linear

Siehe Erklärung zur ersten Abbildung.

**4.**  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 0$

- ✓ (a)  $f$  ist linear  
(b)  $f$  ist nicht linear

Siehe Erklärung zur ersten Abbildung.

**5.**  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, f$  die Identität

- ✓ (a)  $f$  ist linear  
(b)  $f$  ist nicht linear

Siehe Erklärung zur ersten Abbildung.

**6.**  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 1$

- (a)  $f$  ist linear  
✓ (b)  $f$  ist nicht linear

Falsch:  $f(0) = 1 \neq 0$ ; siehe Erklärung zu Aufgabe 2.

**7.**  $f : C^2(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}, h \mapsto h''(0)$

- ✓ (a)  $f$  ist linear  
(b)  $f$  ist nicht linear

Die Linearität folgt aus den Ableitungsregeln: Es gilt  $(g + h)'' = g'' + h''$  und  $(\alpha h)'' = \alpha h''$  für alle  $g, h \in C^2(\mathbb{R})$  und  $\alpha \in \mathbb{R}$ .

**8.**  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, f$  die Spiegelung an der Geraden  $y = x + 1$

- (a)  $f$  ist linear  
✓ (b)  $f$  ist nicht linear

Falsch:  $f(0) = (-1, 1)^\top \neq 0$ ; siehe Erklärung zu Aufgabe 2.

**9.**  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow C^\infty(\mathbb{R})$ ,  $(x, y)^\top \mapsto h$ , wobei  $h$  diejenige Linearkombination der Funktionen  $\sin$  und  $\cos$  ist, deren Graph durch die Punkte  $(-1, x)$  und  $(1, y)$  geht.

✓ (a)  $f$  ist linear

(b)  $f$  ist nicht linear

Das Bild von  $(x, y)^\top$  unter dieser Abbildung ist gleich  $\alpha \cdot \sin + \beta \cdot \cos$ , wobei  $(\alpha, \beta)$  die Lösung des linearen Gleichungssystems

$$\begin{aligned}\alpha \sin(-1) + \beta \cos(-1) &= x \\ \alpha \sin(1) + \beta \cos(1) &= y\end{aligned}$$

ist. Dieses hat die eindeutige Lösung

$$\alpha = \frac{y - x}{2 \cdot \sin 1}, \quad \beta = \frac{x + y}{2 \cdot \cos 1}.$$

Somit ist  $f$  durch

$$(x, y)^\top \mapsto \frac{y - x}{2 \cdot \sin 1} \sin + \frac{x + y}{2 \cdot \cos 1} \cos$$

gegeben und es gilt

$$\begin{aligned}f((x, y)^\top + (x', y')^\top) &= f((x + x', y + y')^\top) \\ &= \frac{(y + y') - (x + x')}{2 \cdot \sin 1} \sin + \frac{(x + x') + (y + y')}{2 \cdot \cos 1} \cos \\ &= \frac{y - x}{2 \cdot \sin 1} \sin + \frac{x + y}{2 \cdot \cos 1} \cos + \frac{y' - x'}{2 \cdot \sin 1} \sin + \frac{x' + y'}{2 \cdot \cos 1} \cos \\ &= f((x, y)^\top) + f((x', y')^\top)\end{aligned}$$

sowie für  $\alpha \in \mathbb{R}$

$$\begin{aligned}f(\alpha(x, y)^\top) &= f((\alpha x, \alpha y)^\top) \\ &= \frac{\alpha y - \alpha x}{2 \cdot \sin 1} \sin + \frac{\alpha x + \alpha y}{2 \cdot \cos 1} \cos = \alpha \left( \frac{y - x}{2 \cdot \sin 1} \sin + \frac{x + y}{2 \cdot \cos 1} \cos \right) \\ &= \alpha f((x, y)^\top).\end{aligned}$$

Somit ist  $f$  linear.

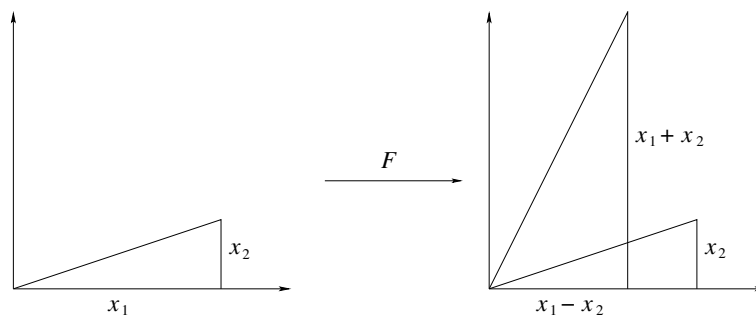
10. Betrachten Sie die folgende Abbildung  $\mathcal{F}$  von  $\mathbb{R}^2$  in sich:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \xrightarrow{\mathcal{F}} x' = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ x_1 + x_2 \end{pmatrix}.$$

- a) Interpretieren Sie diese Abbildung geometrisch.  
 b) Durch welche Matrix  $A$  wird  $\mathcal{F}$  beschrieben?

**Lösung:**

- a) Es handelt sich um eine Drehstreckung:



Das sehen wir, indem wir für  $x = (x_1, x_2)^\top \in \mathbb{R}^2$  und  $x' := \mathcal{F}(x) = (x_1 - x_2, x_1 + x_2)^\top$  die Länge  $\|x'\|$  von  $x'$  und den Winkel  $\phi$  zwischen  $x$  und  $x'$  berechnen:

$$\begin{aligned} \|x'\| &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2 + x_1^2 + x_2^2 - 2x_1x_2} \\ &= \sqrt{2}\sqrt{x_1^2 + x_2^2} = \sqrt{2}\|x\| \Rightarrow \text{Streckung um } \sqrt{2}. \\ \cos \phi &= \frac{(x', x)}{\|x'\| \|x\|} \stackrel{\|x'\| = \sqrt{2}\|x\|}{=} \frac{(x_1 - x_2)x_1 + (x_1 + x_2)x_2}{\sqrt{2}\|x\|^2} \\ &= \frac{x_1^2 + x_2^2}{\sqrt{2}\|x\|^2} = \frac{\|x\|^2}{\sqrt{2}\|x\|^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

$\Rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} \Rightarrow$  Drehung um  $\phi = \frac{\pi}{4}$  (um den Ursprung in der positiven Richtung).

- b) Die Spalten von  $A$  sind die Bilder der kanonischen Basisvektoren  $e^{(1)} = (1, 0)^\top$  und  $e^{(2)} = (0, 1)^\top$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(e^{(1)}) &= \mathcal{F}\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} =: a^{(1)}, \\ \mathcal{F}(e^{(2)}) &= \mathcal{F}\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} =: a^{(2)} \\ \Rightarrow A &= (a^{(1)}, a^{(2)}) = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

**11.** Gegeben sei der 4-dimensionale Vektorraum  $\mathcal{P}_3$  der Polynome vom Grad  $\leq 3$ . Zeigen Sie, dass die ersten vier Tschebyscheff-Polynome zweiter Art

$$U_0(x) = 1, U_1(x) = 2x, U_2(x) = 4x^2 - 1, U_3(x) = 8x^3 - 4x$$

eine Basis von  $\mathcal{P}_3$  bilden.

**Lösung:** In einem Vektorraum  $V$  der Dimension  $n$  gilt:  $n$  linear unabhängige Vektoren bilden eine Basis (siehe Nipp/Stoffer, Seite 87, Satz 4.3 (iii.)). Da  $\mathcal{P}_3$  4-dimensional ist, ist also zu zeigen:

Aus  $\lambda_0 U_0(x) + \lambda_1 U_1(x) + \lambda_2 U_2(x) + \lambda_3 U_3(x) = 0$  folgt  $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$ .

1. Möglichkeit: Als Basis in  $\mathcal{P}_3$  wählen wir die Standardbasis  $1, x, x^2, x^3$ . Bezüglich dieser Basis haben  $U_0(x), U_1(x), U_2(x), U_3(x)$  die folgenden Koordinatenvektoren:

$$U_0(x) : \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad U_1(x) : \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad U_2(x) : \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad U_3(x) : \begin{pmatrix} 0 \\ -4 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Diese Vektoren sind linear unabhängig, weil die Determinante der Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{pmatrix}$$

gleich  $1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 8 = 64$ , also  $\neq 0$  ist.

2. Möglichkeit: Es gilt:

$$\begin{aligned} 0 &= \lambda_0 U_0(x) + \lambda_1 U_1(x) + \lambda_2 U_2(x) + \lambda_3 U_3(x) \\ &= \lambda_0 1 + \lambda_1 2x + \lambda_2 (4x^2 - 1) + \lambda_3 (8x^3 - 4x) \\ &= (\lambda_0 - \lambda_2) 1 + (2\lambda_1 - 4\lambda_3) x + 4\lambda_2 x^2 + 8\lambda_3 x^3. \end{aligned}$$

Durch Koeffizientenvergleich folgen die Gleichungen

$$\lambda_0 - \lambda_2 = 0, \quad 2\lambda_1 - 4\lambda_3 = 0, \quad 4\lambda_2 = 0, \quad 8\lambda_3 = 0,$$

welche umgeschrieben werden können als

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = A\lambda = 0. \quad (1)$$

Es gilt  $\det A = 64 \neq 0$ , deshalb hat (1) nur die triviale Lösung  $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$ . Somit sind  $U_0(x), U_1(x), U_2(x), U_3(x)$  linear unabhängig und bilden also eine Basis.

12. Die Vektoren  $a = (1, -2, 5, -3)^T$ ,  $b = (2, 3, 1, -4)^T$  und  $c = (3, 8, -3, -5)^T$  erzeugen einen Unterraum  $W$  von  $\mathbb{R}^4$ .

- Bestimmen Sie  $\dim W$  und eine Basis von  $W$ .
- Vervollständigen Sie diese Basis zu einer Basis von  $\mathbb{R}^4$ .
- Geben Sie ein homogenes LGS an, welches  $W$  als Lösungsraum hat.

**Lösung:**

- Wir wenden das Gaussverfahren auf die Matrix mit den Zeilen  $a$ ,  $b$  und  $c$  an:

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 5 & -3 \\ 2 & 3 & 1 & -4 \\ 3 & 8 & -3 & -5 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -2 & 5 & -3 \\ 0 & 7 & -9 & 2 \\ 0 & 14 & -18 & 4 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -2 & 5 & -3 \\ 0 & 7 & -9 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Beim Gaussverfahren wird der von den Zeilen erzeugte Unterraum nicht verändert. Deshalb ist  $\dim W = 2$  und

$$\{(1, -2, 5, -3)^T, (0, 7, -9, 2)^T\}$$

eine Basis von  $W$ .

- Eine mögliche Vervollständigung dieser Basis zu einer Basis von  $\mathbb{R}^4$  ist

$$\{(1, -2, 5, -3)^T, (0, 7, -9, 2)^T, (0, 0, 1, 0)^T, (0, 0, 0, 1)^T\}.$$

Dies ist eine Basis, weil die Matrix  $A$  mit diesen Zeilen in Zeilenstufenform ist mit  $\det A = 7 \neq 0$ .

- Die lineare Gleichung  $u_1x_1 + u_2x_2 + u_3x_3 + u_4x_4 = 0$  hat die Basisvektoren  $(1, -2, 5, -3)^T$ ,  $(0, 7, -9, 2)^T$  von  $W$  als Lösung für  $(x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ , falls  $(u_1, u_2, u_3, u_4)^T$  eine Lösung des linearen Gleichungssystems mit der Koeffizientenmatrix

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 5 & -3 \\ 0 & 7 & -9 & 2 \end{pmatrix}$$

ist. Durch Rückwärtseinsetzen sehen wir, dass dies genau dann der Fall ist, wenn

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{9}{7}u_3 - \frac{2}{7}u_4, \\ u_1 &= 2u_2 - 5u_3 + 3u_4 = -\frac{17}{7}u_3 + \frac{17}{7}u_4 \end{aligned}$$

gilt, wobei  $u_3$  und  $u_4$  frei gewählt werden können. Wir wählen  $(u_3, u_4) = (7, 0)$  und  $(u_3, u_4) = (1, 1)$  und sehen, dass das LGS

$$\begin{aligned} -17x_1 + 9x_2 + 7x_3 &= 0 \\ x_2 + x_3 + x_4 &= 0 \end{aligned}$$

die Basisvektoren  $(1, -2, 5, -3)^T$ ,  $(0, 7, -9, 2)^T$  von  $W$  als Lösung hat. Die Koeffizientenmatrix dieses LGS ist in Zeilenstufenform und hat Rang 2. Daher hat der Lösungsraum dieses LGS die Dimension  $4 - 2 = 2$ . Da die obigen Basisvektoren von  $W$  im Lösungsraum liegen, ist dieser gleich  $W$ .